

Unaprjeđenje procjene emisijskih faktora ispušnih plinova u stvarnim uvjetima eksploatacije broda

Knežević, Vlatko

Doctoral thesis / Disertacija

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:202159>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

Vlatko Knežević

**UNAPRJEĐENJE PROCJENE EMISIJSKIH
FAKTORA ISPUŠNIH PLINOVA U
STVARNIM UVJETIMA EKSPLOATACIJE
BRODA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2024

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

Vlatko Knežević

**UNAPRJEĐENJE PROCJENE EMISIJSKIH
FAKTORA ISPUŠNIH PLINOVA U
STVARNIM UVJETIMA EKSPLOATACIJE
BRODA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Josip Orović

Komentor: Prof. dr. sc. Dean Bernečić

Rijeka, 2024

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES

Vlatko Knežević

**IMPROVED ESTIMATION OF EXHAUST
GASES EMISSION FACTORS IN THE
SHIP'S REAL-TIME EXPLOITATION
CONDITIONS**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2024

Mentor doktorskog rada: Izv. prof. dr. sc. Josip Orović

Komentor doktorskog rada: Prof. dr. sc. Dean Bernečić

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Pomorskom fakultetu u Rijeci,
pred Povjerenstvom za obranu u sastavu:

- 1) Izv. prof. dr. sc. Radoslav Radonja, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, predsjednik
- 2) Prof. dr. sc. Goran Vukelić, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, član
- 3) Prof. dr. sc. Tomislav Senčić, Sveučilišta u Rijeci, Tehnički fakultet, član

Zamjenski član:

- 1) Prof. dr. sc. Predrag Kralj, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, član

Sažetak

Istraživanje u ovom doktorskom radu obuhvaća područje emisija ispušnih plinova iz brodskih dizelskih motora i problematiku procjene količine emisija. Kvantifikacija emisija iz brodskih postrojenja predstavlja izazov prilikom izrade inventara emisija za pomorski promet. Jedna od najvažnijih varijabli prilikom izračuna ukupne količine emisija je emisijski faktor za određene ispušne plinove. Emisijski faktori ovise o parametrima kao što su vrsta korištenog goriva, karakteristike pogonskih i pomoćnih motora, opterećenje motora i kvaliteta procesa izgaranja. U radu je provedeno istraživanje na tri Ro-Pax broda koji plove na području Jadranskog mora između luka Hrvatske, Italije i Crne Gore. Istraživanje uključuje mjerenja koncentracije ispušnih plinova na brodovima u stvarnim uvjetima eksploatacije prilikom različitih aktivnosti broda. Mjerenja su izvršena s Testo 350 Maritime v2 uređajem za mjerenje sastava ispušnih plinova, te je prikupljena CO₂ i NO_x baza podataka u fazama plovidbe i manevriranja. Rezultati mjerenja predstavljaju emisije ispušnih plinova iz glavnih motora ovisno o opterećenju motora i aktivnosti broda. Nakon procesa mjerenja i prikupljanja baze podataka, podaci su obrađeni s metodom strojnog učenja koristeći Gaussovu nelinearnu regresiju, gdje CO₂ i NO_x varijable ovise o opterećenju glavnih motora, temperaturi ispušnih plinova i udjelu kisika u ispušnim plinovima, što predstavlja tri nezavisne varijable. Rezultati modeliranja su prikazani na dijagramima gdje su uspoređene izmjerene vrijednosti s procijenjenim vrijednostima. Optimizacija modela ovisi o izboru odgovarajuće kovarijance, te su dobiveni CO₂ i NO_x modeli optimizirani u fazama plovidbe i manevriranja, što je prikazano s visokim koeficijentom determinacije. Nadalje, predloženi modeli omogućavaju odabir emisijskih faktora ovisno o onečišćivaču, opterećenju motora i aktivnosti broda. Procijenjeni emisijski faktori uspoređeni su s emisijskim faktorima iz relevantnih studija inventara emisija, gdje su opisane njihove prednosti i mogućnosti upotrebe. U rad je dokazana korelacija između emisijskih faktora i promjenjivih uvjeta eksploatacije, te predloženi modeli omogućavaju vjerodostojnije CO₂ i NO_x emisijske faktore od trenutno dostupnih. Upotrebom adekvatnih emisijskih faktora moguće je unaprijediti procjenu ukupnih emisija iz brodskih postrojenja, te su predložene dodatne mogućnosti unapređenja istraživanja na ovu temu.

Ključne riječi: emisijski faktori, mjerenja emisija na brodu, ispušni dimni plinovi, inventar emisija, procjene emisija

Abstract

The research in this doctoral thesis covers the area of exhaust gas emissions from marine diesel engines and the problem of estimating the amount of emissions. The quantification of emissions from ship powerplant is a challenge when creating an emissions inventory for maritime transport. One of the most important variables when calculating the total amount of emissions is the emission factor for certain exhaust gases. Emission factors depend on parameters such as the type of used fuel, the characteristics of the main and auxiliary engines, the engine load and the quality of the combustion process. In the thesis, research was carried out on three Ro-Pax ships sailing in the area of the Adriatic Sea between the ports of Croatia, Italy and Montenegro. The research includes measurements of the concentration of exhaust gases on ships in real-time exploitation conditions during various ship activities. Measurements were conducted with a Testo 350 Maritime device for measuring the content of exhaust gases, and a CO₂ and NO_x database was collected during the cruising and maneuvering phases. The measurement results represent exhaust gas emissions from the main engines depending on the engine load and the ship's activity. After the measurement and database collection process, the data was processed with the machine learning method using Gauss nonlinear regression, where the CO₂ and NO_x variables depend on the load of the main engines, the exhaust gas temperature and the oxygen content in the exhaust gas, which represents three independent variables. The modeling results are shown in diagrams where the measured values are compared with the estimated values. The optimization of the model depends on the choice of the appropriate covariance, and the obtained CO₂ and NO_x models were optimized in the cruising and maneuvering phases, which was indicated with a high coefficient of determination. Furthermore, the proposed models enable the selection of emission factors depending on the pollutant, engine load and ship activity. The estimated emission factors were compared with the emission factors from the relevant emissions inventory studies, where their advantages and possibilities of use were described. The correlation between emission factors and variable exploitation conditions was proven in the thesis, and the proposed models enable more reliable CO₂ and NO_x emission factors than currently available. By using adequate emission factors, it is possible to improve the estimation of total emissions from ship powerplants, and additional possibilities for improving research on this topic are proposed.

Key words: emission factors, on-board measurement, exhaust gases, emission inventory, emission estimation

Sadržaj:

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Problem i predmet istraživanja..... | 1 |
| 1.2. Svrha i cilj istraživanja..... | 3 |
| 1.3. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze..... | 5 |
| 1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja | 5 |
| 1.4.1. Procjena emisija ispušnih plinova | 5 |
| 1.4.2. Mjerenja emisija s brodskih postrojenja..... | 8 |
| 1.4.3. Strojno učenje i modeliranje procjena emisija | 11 |
| 1.5. Znanstvene metode..... | 12 |
| 1.6. Struktura rada | 13 |
| 2. PRAVNA REGULATIVA I UTJECAJ ISPUŠNIH PLINOVA S BRODSKIH POSTROJENJA | 15 |
| 2.1. Pravne regulative i međunarodne organizacije | 15 |
| 2.1.1. IMO regulative i strategije smanjenja emisija s brodova..... | 16 |
| 2.1.2. Novi energetske-tehnološki propisi i norme | 20 |
| 2.1.3. Pravne regulative Europske Unije..... | 23 |
| 2.2. Štetni utjecaj emisija ispušnih plinova | 25 |
| 2.2.1. Emisije iz brodskih energetskih postrojenja..... | 27 |
| 2.2.2. Emisije ugljikovog dioksida..... | 28 |
| 2.2.3. Emisije dušikovih oksida | 31 |
| 2.2.4. Emisije sumporovih oksida | 34 |
| 2.2.5. Emisije krutih čestica | 36 |
| 2.2.6. Emisije hlapljivih organskih spojeva | 37 |
| 3. METODE PROCJENE EMISIJA ISPUŠNIH PLINOVA S BRODSKIH POSTROJENJA | 39 |
| 3.1. 'Top-down' metoda procjene emisija..... | 40 |
| 3.2. 'Bottom-up' metoda procjene emisija | 43 |
| 3.3. Entec studija procjene emisijskih faktora..... | 46 |
| 3.3.1. Nepouzdanost emisijskih faktora | 50 |
| 3.4. EMEP/EEA metodologija procjene inventara emisija i emisijskih faktora | 52 |
| 3.4.1 Metoda razine 1 | 53 |
| 3.4.2 Metoda razine 2 | 55 |
| 3.4.3 Metoda razine 3 | 56 |

| | |
|---|-----|
| 3.5. US EPA studija procjene emisijskih faktora | 59 |
| 3.6. IMO studija | 64 |
| 4. MJERNA OPREMA I MJERENJE SASTAVA ISPUŠNIH PLINOVA | 68 |
| 4.1. Mjerni uređaj Testo 350 Maritime v2 | 68 |
| 4.1.1. Specifikacije i sastavni dijelovi uređaja | 69 |
| 4.2. Eksperimentalna mjerenja i prikupljanje podataka | 74 |
| 4.2.1. GUTTA projekt | 74 |
| 4.2.2. Opis postrojenja Ro-Pax brodova | 75 |
| 4.2.3. Rute plovidbe | 80 |
| 4.2.4. Eksperimentalna mjerenja | 85 |
| 4.3. Rezultati eksperimentalnog mjerenja | 88 |
| 4.3.1. Rezultati mjerenja u fazi plovidbe | 88 |
| 4.3.2. Rezultati mjerenja u fazi manevriranja | 94 |
| 5. MODELIRANJE I OBRADA PODATAKA | 97 |
| 5.1. Gaussova višestruka regresija | 97 |
| 5.1.1. Kovarijanca | 99 |
| 5.2. Modeliranje podataka u fazi manevriranja i plovidbe | 102 |
| 5.2.1. Procijenjene vrijednosti CO ₂ u fazi manevriranja | 104 |
| 5.2.2. Procijenjene vrijednosti NO _x u fazi manevriranja | 107 |
| 5.2.3. Procijenjene vrijednosti CO ₂ u fazi plovidbe | 111 |
| 5.2.4. Procijenjene vrijednosti NO _x u fazi plovidbe | 114 |
| 5.3. Validacija modela | 118 |
| 6. PRIMJENA REZULTATA I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA | 122 |
| 6.1. Pretvorba mjernih jedinica | 122 |
| 6.2. Usporedba emisijskih faktora | 126 |
| 6.3. Preporuke za daljnja istraživanja | 131 |
| 7. ZAKLJUČAK | 132 |
| LITERATURA | 135 |
| POPIS SLIKA | 144 |
| POPIS TABLICA | 146 |
| POPIS KRATICA, OZNAKA I SIMBOLA | 148 |
| PRILOG 1 | 153 |
| PRILOG 2 | 154 |

1. UVOD

Pomorski promet predstavlja međunarodnu gospodarsku granu koja ima trend porasta u aspektima broja brodova na globalnoj razini, veličini i porivnoj snazi brodskih postrojenja te broju novih plovnih puteva. Sve navedeno znatno povećava problem onečišćenja zraka i morskog okoliša iz brodskih energetske postrojenja. S ciljem smanjenja emisija ispušnih plinova razvijaju se mnoge strategije dekarbonizacije pomorskog prometa na međunarodnoj razini, gdje se donose zakonske regulative i pravila o sprječavanju onečišćenja morskog okoliša.

1.1. Problem i predmet istraživanja

Kako bi se proučili rizici onečišćenja morskog okoliša i propisale adekvatne mjere za smanjenje emisija potrebno je prethodno kvantificirati emisije ispušnih plinova s brodskih postrojenja. Ovaj zadatak nosi mnoge izazove zbog raznovrsnosti brodskih porivnih strojeva, brodskih goriva te različitih režima plovidbe broda i područja plovidbe. Posebna pozornost se posvećuje utjecaju ispušnih plinova iz brodskih energetske postrojenja u području pomorskih luka zbog štetnog utjecaja emisija na ljudsko zdravlje i priobalno područje. Pod pojmom 'emisije ispušnih plinova' smatraju se produkti izgaranja nastali u brodskim pogonskim strojevima izgaranjem goriva određenog kemijskog sastava. Sastav ispušnih plinova sačinjavaju : kisik (O₂), dušikovi oksidi (NO_x), sumporovi oksidi (SO_x), ugljikovodici (CH), ugljikov monoksid (CO), ugljikov dioksid (CO₂) te krute čestice (PM).

Procjene emisija od ukupnog pomorskog prometa za određeno područje plovidbe naziva se inventar odnosno skladište emisija ispušnih plinova. Svrha izrade inventara emisija (najčešće na godišnjoj razini) je postizanje uvida u količinu emisija onečišćujućih tvari s ciljem izrade strategije za smanjenje emisija s brodskih postrojenja. Procjena emisija je od izrazite važnosti jer predstavlja polazišnu točku za donošenje novih regulativa i mjera ograničenja onečišćenja morskog okoliša.

Dvije opće prihvaćene metodologije procjene emisija su „odozgo prema dolje“ (engl. 'top-down') i „odozdo prema gore“ (engl. 'bottom-up') metoda. Prva metoda zasniva se na podacima o utrošenom gorivu (engl. 'fuel-based method') te se na temelju utroška goriva i određenog emisijskog faktora dobiva ukupna količina emisija. Zbog nepouzdanosti i teško dostupnih podataka o prodanom i utrošenom gorivu ova metoda je odbačena te se najčešće koristi druga metoda koja se temelji na aktivnostima brodova (engl. 'activity-based method'). Ova metoda

uzima u obzir karakteristike brodskog pogona (snage i opterećenja glavnih i pomoćnih motora), vrijeme plovidbe ili boravka u luci te emisijske faktore. Pri izračunu emisija koriste se emisijski faktori (g/kWh) iz dostupnih baza podataka koje se temelje na izvješćima proizvođača motora ili klasifikacijskog društva. Vrijednosti emisijskih faktora zasnovane su na statističkim podacima koji se obrađuju uz pretpostavku da imaju prihvatljivu pouzdanost. Pouzdanost je upitna ponajviše u eksploatacijskim uvjetima gdje vrijednosti odstupaju zbog promjenjivih opterećenja rada pogonskih motora i utjecaja vanjskih čimbenika poput vjetera, valova i morskih struja.

Navedeni problemi dodatno se povećavaju kod plana izrade inventara (skladišta) emisija za određeno područje plovidbe gdje se nerijetko događa da ukupni pomorski promet predstavlja značajan broj brodova s različitim brodskim postrojenjima. Provesti mjerenja za vrijeme plovidbe na svim brodovima koji su uplovili u određeno područje iziskuje dugoročan proces. Radi ovog problema najčešće se primjenjuje spomenuta 'bottom-up' metoda koja uzima u obzir aktivnosti broda.

Ova metoda također ima dosta ograničenja jer izračun emisija ovisi o dosta ulaznih varijabli s upitnom pouzdanošću. Kod ulaznih varijabli najviše nepoznanica imaju emisijski faktori (g/kWh) koji ovise o mnogo eksploatacijskih parametara. Kod procjene emisijskih faktora za dušikove okside (NO_x) uzima se u obzir i godina proizvodnje motora što uključuje IMO Tehnički kodeks gdje se pretpostavlja da motori izgrađeni poslije 01. siječnja 2000. godine imaju 17% smanjenje emisije nego motori izgrađeni prije navedenog datuma. Nadalje, tvorba dušikovih oksida ponajviše ovisi o temperaturi izgaranja koja oscilira zbog povećanja ili smanjenja opterećenja motora. Vrijednosti emisijskih faktora za ugljikov dioksid (CO₂) zasnovane su na pretpostavci o sadržaju ugljika u brodskim dizel gorivima koji iznosi 86.7%, te pretpostavci o potpunom izgaranju ugljika. Također, vrijednost sumpornog oksida (SO₂) temelji se na pretpostavci o udjelu sumpora u brodskom gorivu. U svrhu prikazivanja emisijskih faktora (g/kWh) u obliku kg/t_{goriva} potrebno je u izračun uvrstiti i specifičnu potrošnju goriva koju se uzima kao statistički podatak proizvođača motora. Ova vrijednost nije konstantna jer zavisi o načinu plovidbe tj. opterećenju postrojenja, stoga pretvorba emisijskih faktora u kilograme i izračun ukupne količine emisija može dodatno odstupati od stvarne vrijednosti. Dodatno povećanje nepouzdanosti u vrijednosti iz baza podataka očituje se zbog nekonzistentnih ažuriranja i validacije podataka.

Sve navedeno predstavlja podlogu za definiranje **glavnih problema** ovog znanstvenog istraživanja:

- nepouzdana statističke vrijednosti emisijskih faktora te nekonzistentna ažuriranja istih
- nepostojanje pouzdanog numeričkog modela za procjenu emisijskih faktora, koji uzima u obzir parametre brodskog postrojenja za vrijeme eksploatacije broda
- nedostatak validacije emisijskih faktora za srednjeokretne četverotaktne motore koji su pogonjeni na brodska uljna goriva s ograničenim postotkom sumpora propisanim novim ekološkim propisima i normama.

Cjelokupna problematika ovog znanstvenog istraživanja obuhvaća kvalitativnu procjenu emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja pogonjenim četverotaktnim motorima. Iz navedene problematike proizlazi i **predmet istraživanja**: Metodologija procjene emisijskih faktora onečišćujućih tvari u različitim uvjetima plovidbe. Predmet obuhvaća istraživanje utjecaja promjenjivih parametara brodskih postrojenja na sastav ispušnih plinova. Objekti istraživanja su emisijski faktori onečišćujućih tvari, sastav ispušnih plinova za vrijeme plovidbe broda i procijenjena količina emisija ispušnih plinova.

1.2. Svrha i cilj istraživanja

Kako bi se odredila pouzdana procjena emisija ispušnih plinova potrebno je provesti detaljna istraživanja i mjerenja sastava produkata izgaranja iz brodskih postrojenja. Ovaj tip istraživanja predstavlja izazov zbog raznolikosti i kompleksnosti brodskih postrojenja te sam proces prikupljanja podataka uključuje nekoliko poteškoća. Pod poteškoćama istraživanja podrazumijeva se nabavka i upotreba adekvatnih mjernih uređaja za mjerenje emisija. Trenutačno postoji nekoliko metoda mjerenja poput daljinske kontrole emisija uz pomoć optičkih senzora ugrađenim na mjernim stanicama, koji očitavaju sastav i koncentraciju onečišćivača u dimnim plinovima. Ovaj postupak uglavnom se primjenjuje pri ulasku broda u luku ili posebno zaštićeno područje plovidbe, s ciljem utvrđivanja jesu li zadovoljena propisana ograničenja sastava goriva (poseban naglasak na sumporove okside).

Drugi način ispitivanja sastava ispušnih plinova je ugradnja mjernih instrumenata u brodski ispušni kolektor. Na taj način dobivaju se podaci u stvarnim uvjetima plovidbe, ali ovaj pristup uglavnom zahtijeva instaliranje mjerne opreme koja je često financijski nepovoljna brodaru. Kod suvremenih brodova mjerna oprema za nadzor i kontrolu emisija ispušnih plinova,

obrađuje podatke ali ih rijetko kad pohranjuju s ciljem procjena budućih emisija ili razvoja plana smanjena emisija i potrošnje energije. Nadalje, mnoga mjerenja i ispitivanja brodskih motora obavljaju se od strane proizvođača s ciljem dokazivanja ekološke prihvatljivosti koja je u skladu s najnovijim zakonskim regulativama. Takva ispitivanja su uglavnom u uvjetima koja nisu reprezentativna stvarnim uvjetima plovidbe nego stacionarnim uvjetima pošto se provode na probnom stolu. Rezultati tih mjerenja su često idealni i optimistični, te su u konačnici nepouzdana za korištenje pri izradi procjena budućih emisija. Osim eksploatacijskih uvjeta plovidbe koji utječu na rad motora, od značajnog utjecaja je i održavanje broskog pogona, odnosno tehničko stanje pogonskih motora i uređaja. Neispravno održavanje može dovesti do nepotpunog izgaranja goriva u cilindrima motora što će u određenoj mjeri utjecati i na sastav ispušnih plinova.

Sva navedena problematika ovog znanstvenog područja i opisani predmet istraživanja, poslužili su kao motivacija za ovo istraživanje iz kojeg proizlazi glavna svrha i cilj:

Svrha istraživanja - unaprijediti procjenu emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja na temelju predloženog numeričkog modela koji uzima u obzir operacijske parametre kako bi se dobila procjena emisijskih faktora onečišćujućih tvari. Nadalje, dobiveni rezultati mogu se implementirati u izračun ukupne količine ispušnih plinova i na taj način unaprijediti postojeće baze podataka i buduće izrade inventara emisija pomorskog prometa.

Cilj istraživanja – izraditi i optimizirati model procjene emisijskih faktora, zasnovan na izmjerenim podacima emisija ispušnih plinova za vrijeme eksploatacije broda, koji metodom višestruke parametarske nelinearne regresije predviđa emisijske faktore onečišćujućih tvari. Model usporediti s postojećim relevantnim studijama inventara brodskih emisija, te s ciljem unaprjeđenja istih predložiti pouzdanije metode procjena emisija ispušnih plinova za određene režime plovidbe broda.

1.3. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze

S ciljem rješavanja problema istraživanja te uzimajući u obzir opisani predmet, cilj i svrhu istraživanja, postavljane je temeljna znanstvena hipoteza i tri pomoćne hipoteze:

Temeljna hipoteza: Moguće je unaprijediti metodu procjene emisije štetnih plinova razvojem numeričkog modela za izračun emisijskih faktora koji uzima u obzir promjenjive uvjete eksploatacije broda.

Pomoćna hipoteza 1: Promjenjivi uvjeti eksploatacije broda utječu na koncentraciju onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima što rezultira i u promjenama emisijskih faktora

Pomoćna hipoteza 2: Primjenom predloženog modela dobit će se vjerodostojniji podaci o vrijednostima emisijskih faktora od onih dostupnih u trenutnim bazama podataka

Pomoćna hipoteza 3: Primjenom predloženog modela moguće je izraditi vjerodostojniji registar emisija ispušnih plinova za određeno brodsko postrojenje ili područje plovidbe

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Znanstveno istraživačke studije na temu emisija štetnih plinova su izrazito aktualne zadnjih godina posebice u transportnom sektoru. Literatura vezana za ovo područje istraživanja je sveobuhvatna i radi kvalitetnijeg pregleda podijeljena je u tri podcjeline. Prva podcjelina obuhvaća relevantne studije i znanstvene članke koji se bave proučavanjem i izračunom procjena emisija ispušnih plinova za određeno područje plovidbe broda. U drugoj podcjelini analizirana je literatura koja je isključivo vezana za mjerenja emisija za vrijeme plovidbe broda, dok treća podcjelina sadrži znanstvene članke u kojima se istražuje korištenje strojnog učenja u svrhu modeliranja procjena emisija. Sve tri podcjeline su usko vezane za problematiku ovog doktorskog rada.

1.4.1. Procjena emisija ispušnih plinova

Pri izradi inventara emisija ispušnih plinova, odnosno prilikom izračuna procjena količina emisija iz brodskih energetske postrojenja, uzimaju se u izračun statistički podaci vezani za plovidbu broda (vrijeme dolaska/odlaska, brzina broda, duljina putovanja) i podaci o karakteristikama brodskog pogona (instaliranoj snazi glavnih i pomoćnih motora, prosječno opterećenje motora, vrsta korištenog goriva i predviđeni emisijski faktori).

U opsežnoj Entec studiji [1] izrađen je inventar emisija za teritorijalne vode Velike Britanije od strane Delfra - Ministarstva gospodarstva i ruralnog razvoja. Korištena metoda za procjenu količina emisija je „odozgo prema gore“, te se ova studija smatra među najrelevantnijim u segmentu baze podataka vezanim za emisijske faktore. Autori u zaključcima navode da je potrebno ažurirati vrijednosti emisijskih faktora posebice kod novih brodskih goriva s ograničenim udjelom sumpora te pri plovidbi u posebno zaštićenim područjima. Druga sveobuhvatna studija inventara emisija izrađena je od strane Međunarodne pomorske organizacije (IMO), te u zadnjem (četvrtom) izdanju iz 2020 godine [2] procjenjuju emisije stakleničkih plinova na globalnoj razini. Rezultati studije ukazuju na povećanje stakleničkih plinova na globalnoj razini s 2,76 % na 2,89 % usporedno s 2012. godinom, ponajviše zbog povećanja ukupne globalne flote. Europska agencija za okoliš (EMEP/EEA) predlaže svoj Tehnički vodič za izradu nacionalnih inventara emisija [3]. Četvrta značajna studija inventara emisija izrađena je od strane Američke agencija za zaštitu okoliša (US EPA) [4] koja je fokusirana na procjeni emisija u područjima luka. U napomenama za buduća istraživanja naglašena je potreba za ažuriranjem emisijskih faktora za novije motore koji moraju zadovoljavati nove IMO tehničke zahtjeve u skladu s MARPOL Prilogom VI.

Na temelju ovih studija, odnosno predloženih metodologija izračuna i procjena emisijskih parametara, objavljeni su mnogobrojni znanstveni radovi s ciljem izrade inventara emisija za određenu pomorsku luku i područje plovidbe. Procjenu emisija za luku Samus na Crnom moru u razdoblju od 2010. do 2015. godine obrađuje Alver F. i dr. [5], Tichavska M. [6] za luku Las Palmas, dok Lee i dr. [7] također koriste „bottom-up“ metodologiju za pomorski promet luke Incheon, gdje predlažu uvođenjem posebnog zaštićenog područja s ciljem smanjenja emisija sumporovih oksida, odnosno ograničenja udjela sumpora u brodskom gorivu. Inventar emisija za luku Los Angeles [8] u 2019. godini uzima u obzir i procjenu emisija iz stacionarne opreme luke, poput lučkih dizalica, uređaja za ukrcaj/iskrcaj tereta te lučkih vozila. Utjecaj emisija na ekonomski i zdravstveni aspekt područja luke Yangshan Shanghai predstavljen je u radu [9]. Mnoga istraživanja procjena emisija temelje na prikupljenim podacima o kretanju brodova u određenom vremenu, dobivenim putem sustava automatske identifikacije plovila AIS (engl. 'Automatic Identification System'). Spomenuti sustav korišten je za procjenu emisija na području rijeke Yangtze [10], za pomorski promet luke Tianjin [11], Hong Kong [12] i Busan [13], te na području zaljeva Iskenderun [14].

Procjena emisija na području Mramornog mora prikazana je u radu [15], gdje autori koriste emisijske faktore zasnovane na utrošenom gorivu ($\text{kg}/t_{\text{goriva}}$). Količina emisija ispušnih plinova s RO-RO brodova u Sredozemnom moru između luka Španjolske, Italije i Francuske izračunata je u radu [16], dok autor Denier van der Gon u radu [17] predstavlja nacionalni inventar emisija za obalu Nizozemske. Nepouzdanost i ovisnost o pretpostavkama pri procjeni emisija sa spomenutom metodom potvrđuje Tzannatos E. pri izračunu emisija za putničku luku Piraeus [18]. Autor Moreno – Gutierrez pokušava smanjiti broj nepoznanica komparativnom analizom postojećih metoda [19] i pojednostavniti jednadžbe izračuna emisija u radu [20] gdje dolazi do zaključka da emisijski faktori $[\text{g}/\text{kWh}]$ ne smiju biti konstantne vrijednosti iz razloga jer zavise o specifičnoj potrošnji goriva koja nema konstantnu vrijednost, te o trenutnom opterećenju motora koje ovisi o režimu plovidbe. Isti autor u procjeni emisija pomorskog prometa kroz Gibraltarska vrata [21] objašnjava sve nepoznanice pri korištenju emisijskih faktora iz statističkih baza podataka. Naglašava da najveće devijacije emisijskih faktora se pojavljuju kod NO_x i CO plinovima jer ovise o tehničkom stanju motora. Nepravilno izgaranje goriva u cilindrima ili neadekvatno održavanje stanja motora može dovesti do odstupanja emisija i do 20 posto. Štetni utjecaj emisija ispušnih plinova na kvalitetu zraka istražuje Toscano D. za luku Napulj [22], dok autor Tang L. procjenjuje utjecaj emisija na ljudsko zdravlje u području luke Gothenburg [23]. Opsežni pregledni rad [24] opisuje korelaciju između infrastrukture luka i emisija ispušnih plinova, te su predložene moguće mjere za smanjenje i kontrolu istih. Inventar emisija i procjenu ekonomskog troška luke Bandirma istražen je u radu [25].

Emisije pomorskog promet na hrvatskom dijelu Jadrana procijenjene su za sve značajnije putničke i teretne luke Republike Hrvatske u sljedećim znanstvenim radovima: za pomorski promet putničke luke Zadar 2018. godine [26], za putničku luku Šibenik [27], za ukupni promet teretne luke Zadar [28], za luku Rijeka [29], za teretni i putnički promet luke Split [30] i za putničke luke Dubrovnik i Kotor u radu [31]. Svi navedeni istraživački radovi koriste „bottom-up“ pristup pri procjeni emisija, te u ovisnosti o vrsti broda, pogonskog motora i korištenog brodskog goriva, primjenjuju definirane emisijske faktore. Budući da je riječ o visoko frekventnim lukama, brodovi koji uplovljavaju se razlikuju u instaliranim snagama i vrsti glavnih i pomoćnih motora, s toga odabir prosječnog emisijskog faktora dovodi do dodatnih nepouzdatih izračuna ukupne količine emisija.

1.4.2. Mjerenja emisija s brodskih postrojenja

Druga skupina znanstveno-istraživačkih radova odnosi se na prikupljene podatke emisija ispušnih plinova u realnim uvjetima rada brodskog postrojenja odnosno za vrijeme eksploatacije broda. Prikupljanje podataka podrazumijeva korištenje mjernih uređaja i instrumenata za mjerenje sastava ispušnih plinova. Znanstvenih radova ove skupine je znatno manje nego prethodne zbog ekonomskih i logističkih problema koji se nameću, poput cijene i nabavke mjerne opreme do mogućnosti mjerenja i problema prethodne suglasnosti brodarka.

Najobuhvatnija studija vezana za mjerenje emisija uz pomoć mjernih instrumenata je provedena od strane AMC (engl. 'Australian Maritime College') u sklopu projekta IAMU 2015 Research Project [32]. Mjerenja su provedena na dva teretna broda pogonjena teškim brodskim gorivom (engl. 'Heavy Fuel Oil' – HFO) za vrijeme plovidbe broda, faze manevriranja i boravka broda u luci. Provedena mjerenja sastava ispušnih plinova (CO, CO₂, NO_x, O₂, PM_{2.5}, PM₁₀, HC) obavljena su pomoću mjernih uređaja Testo350XL, Sable CA-10, Horiba MEXA 548L i Dusk Trak. Ovo istraživanje rezultiralo je objavom nekoliko znanstvenih radova koji su najznačajniji od autora Chu-Van, T. [33], gdje koristi izmjerene podatke za usporedbu s postojećim studijama vezanim za mjerenja emisija u eksploataciji broda te rad [34] u kojem uspoređuje emisije za vrijeme manevriranja broda s naglaskom na distribuciju finih čestica PM (engl. 'Particulate Matter' – PM). Autor u zaključku naglašava potrebu za izradom baze podataka iz eksperimentalnih mjerenja emisija na različitim tipovima brodova kako bi se smanjile nepoznanice pri kvantifikaciji emisijskih faktora. Mjerenje sastava ispušnih plinova na kontejnerskom brodu [35] i na tankeru za prijevoz sirove nafte [36] predstavlja Agrawal H., te rezultate mjerenja koristi za usporedbu emisijskih faktora (NO_x, PM, SO₂, CO₂) teškog brodskog goriva. Khan Yusuf, M. i dr. [37] analiziraju razlike izmjerenih emisija između IMO metode tzv. „Simplified Measurement Method“ i PEMS (engl. 'Portable Emission Measurement System') metode od strane US EPA. Mjerenje je također izvršeno na sporookretnim dvotaktnim motorima kontejnerskih brodova pogonjenim na teško brodsko gorivo.

Haug C. i dr. [38] prikazali su utjecaj promjene opterećenja motora na postotak onečišćujućih tvari. Istraživanje je provedeno na jednom glavnom i jednom pomoćnom motoru broda za rasuti teret u svim režimima plovidbe (boravak u luci, manevriranje, plovidba na otvorenom moru). U svrhu izrade nacionalnog inventara emisija Kine, provedeno je mjerenje ispušnih plinova na tri različita istraživačka broda [39]. Rezultati su ukazali na razliku koncentracije onečišćujućih

tvary u ovisnosti o trenutnoj snazi porivnog motora. Iznese su i usporedbe između emisijskih faktora s obzirom na vrstu korištenog goriva, gdje je zaključeno da razlike ponajviše ovise o količini sumpora u gorivu. Fu M. i dr. u svom radu [40] predstavili su izmjerene emisije CO, HC, NOx plinova za vrijeme plovidbe sedam teretnih brodova u području Velikog kanala u Kini. Usporedbom izmjerenih koncentracija tvari, rezultiralo je zaključkom da se koncentracija tvari (g/h^{-1}) proporcionalno povećava s porastom opterećenja motora. Utjecaj „hladnog starta“ motora na stvaranje CO, NOx i fine čestice PM, istražili su Chu Van T. i dr. [41], gdje se pokazao znatni porast emisija zbog neadekvatne radne temperature rashladnog sredstva i ulja za podmazivanje.

Validaciju emisijskih faktora finih čestica istražio je Winnes H. u radu [42], gdje mjeri sadržaj čestica koristeći brodsko dizel gorivo i teško brodsko gorivo. Rezultati su pokazali da emisijski faktori (g/kWh) za fine čestice ne odstupaju od postojećih, te ovise o viskoznosti korištenog goriva. Mjerenje emisijskih tvari za brodsko gorivo s vrlo niskim udjelom sumpora odrađeno je na putničkom brodu s srednjeokretnim četverotaktnim motorom [43] za vrijeme plovidbe u Mramornom moru. Udio SOx tvari se očekivano pokazao niskim, dok izmjerene vrijednosti NOx plinova zadovoljavaju IMO ograničenja sadržaja NOx-a u ispušnim plinovima motora. Mjerenje emisija za vrijeme boravka broda u luci, odnosno pri radu pomoćnih motora (dizel generatora) istraženo je u radu [44] na šest brodova u rasponu snaga motora od 720 kW do 2675 kW. Razlike u emisijama ispušnih plinova prilikom zamjene pogonskog goriva (s teškog na lako dizel gorivo) prikazane su u radu [45], te rezultati potvrđuju smanjenje koncentracije emisija pri upotrebi lakog dizel goriva zbog smanjenog udjela sumpora. Izmjerene vrijednosti emisija na četverotaktnim Caterpillar motorima [46] uspoređene su s predloženim emisijskim faktorima od strane EU EPA s ciljem pronalaska odstupanja vrijednosti. Autori ističu potrebu za dodatnim mjerenjima jer rezultati s jednog putovanja ne mogu predstavljati pouzdane vrijednosti i zaključke. Bai C. [47] mjeri sastav emisija u različitim režimima plovidbe istraživačkog broda, te su prikazani rezultati promjena emisijskih faktora prilikom promjene goriva. Usporedbu emisijskih faktora izmjerenih na komercijalnim brodovima u Meksičkom zaljevu predstavlja E.J. Williams [48] i dolazi do zaključka da prosječne vrijednosti emisijskih faktora mogu povećati nepouzdanost procjena ukupne količine emisija. Kemijski i fizički sastav emisija finih čestica mjeri J. Moldanova [49] na dva različita RO-RO broda. Autori H. Jiang i dr. [50] uspoređuju izmjerene emisije s devet teretnih brodova na području rijeke Jangce s metodom procjena emisija uz pomoć AIS-a. Rezultati usporedbe pokazali su da vrijednosti emisija CO₂ plina su veće prilikom testnog mjerenja nego pri korištenju modela procjene.

Nove metode mjerenja emisija ispušnih plinova predstavljane su u radu [51] i [52] gdje se mjerenja provode zračnim putem tzv. „sniffer“ metoda, kod koje se koriste dronovi ili posebno namjenske letjelice s ugrađenim mjernim sensorima. Rezultati su pokazali odstupanja od 20% za SO_x čestice i 24% za NO_x tvari od ostalih studija mjerenja emisija u stvarnim uvjetima plovidbe. Utjecaj vjetra predstavlja problem pri upotrebi ove metode jer utječe na disperziju čestica što može rezultirati neadekvatnim mjerenjima. Metoda mjerenja emisija s posebno namjenskim vozilom predstavljena je u radu [53]. Ova metoda mjerenja relevantnija je za cestovni ili željeznički transport u luci jer ovisi o vremenskim uvjetima, položaju vozila naspram dimnog stoga i ograničenom radijusu mjernih senzora.

Upotrebu satelita s ciljem lociranja širenja emisija dušikovog dioksida koristi J. Ding [54]. Glavna mana ove metode je nedostatak kontrole distribucije svih onečišćujućih tvari ispušnih plinova (nadzor isključivo emisija dušikovih oksida i finih čestica). Mjerenje emisija sumporovih oksida s ultraljubičastom kamerom predstavlja A.J. Prata [55]. Problemi koji mogu utjecati na točnost ove metode su brzina vjetra, položaj postavljene kamere, fiksna radijusa snimanja dimnog stoga, pravilna kalibracija uređaja i trenutna brzina broda. F. Zhou u radu [56] predlaže holistički pristup mjerenju emisija s brodova korištenjem svih prethodno spomenutih platformi. Ideja ovog pristupa je mjerenje brodskih emisija zračnim, pomorskim i kopnenim putem, na način da se instalira određena mjerena oprema na definiranim lokacijama luke. Dobiveni podaci bi se kasnije pohranili u zajednički program na daljnju analizu i obradu. Ovakav pristup u praksi predstavlja financijskih i infrastrukturno zahtijevan projekt za luku, ali pruža mogućnosti kontrole emisija u stvarnom vremenu, što može poslužiti za kontrolu emisija brodova koji uplovljavaju u luku, naročito u posebno zaštićenim područjima plovidbe.

Sva spomenuta dosadašnja istraživanja u kojima se mjere emisije ispušnih plinova za vrijeme eksploatacije broda, prvenstveno koriste rezultate mjerenja u svrhu validacije s postojećim bazama podataka. Nadalje, većina istraživanja je odrađena pri korištenju teškog brodskog goriva čija je upotreba dozvoljena u slučaju ako se koriste pročišćivači ispušnih plinova. Autori u svojim zaključcima ističu potrebu za mjerenjem emisijskih faktora s različitih brodskih energetske postrojenja i izradu modela za unaprjeđenje nacionalnih i globalnih inventara emisija. Istaknuta potreba za modelom procjene emisijskih faktora na temelju podataka u stvarnim uvjetima rada brodskih energetske postrojenja, potvrđuje prethodno definiran problem znanstvenog istraživanja.

1.4.3. Strojno učenje i modeliranje procjena emisija

U ovu skupinu znanstvenih radova spadaju članci i studije u kojima se za procjenu emisija koriste metode strojnog učenja i modeliranja. Jahangiri S. [57] predstavlja model procjene emisija na temelju izmjerenih podataka s dva sporookretna dvotaktna motora pogonjena na teško brodsko gorivo. U modelu je korištena regresijska analiza s dvije nezavisne varijable, od kojih je jedna najveća snaga u kontinuiranom pogonu (engl. 'Maximum Continuous Rating' – MCR, %), a druga brzina okretaja osovine. Autor koristi sličnu metodologiju za procjenu emisija za vrijeme boravka broda u luci [58], gdje koristi izmjerene podatke s dva pomoćna motora. U zaključku ističe potrebu za modeliranjem procjena emisija i navodi nedostatke postojećih studija inventara. Isti autor u radu [59] numeričkom metodom uspoređuje postojeće inventara emisija sa stvarnim izmjerenim podacima. Pod istim istraživanjem objavljen je rad [60] u kojem se uspoređuju tehnike modeliranja procjena emisija uz pomoć strojnog učenja. U sva četiri spomenuta slučaja korišteno je teško brodsko gorivo, čiji je sadržaj sumpora nedozvoljen za današnje propise, ako se ne koriste pročišćivači ispušnih plinova.

Procjenu CO₂ emisija na području Kine istražuje Ning M. [61], te koristi Gaussov proces regresije. Istraživanje nije vezano za pomorski promet nego za potrošnju energenata iz svakodnevne upotrebe (grijanje, dobivanje električne energije, transport). Pri izboru najpovoljnije Gaussove regresije uspoređeni su koeficijenti determinacije, te je zaključeno da Gaussove metode mogu kvalitetno procijeniti emisije ugljikova dioksida. Korištenje Gaussove regresije za dobivanje pouzdane procjene potvrđuje Chuanbo Shen [62].

Nekolicina autora koristi metodu procjena emisija s umjetnim neuronskim mrežama. Modeli s neuronskim mrežama su uglavnom vezani za procjenu izlaznih parametara iz motora kao što su trenutna snaga motora, specifična potrošnja goriva i temperatura ispušnih plinova, koji ovise o zadanim (izmjerenim) ulaznim varijablama. Yakup Sekmen [63] koristi neuronske mreže radi procjene okretnog momenta motora i postotka smoga iz ispuha. Istraživanje je obavljeno na testnom četverotaktnom motoru s probnog stola koji nije mjerodavan za brodska postrojenja. Primjenu neuronskih mreža na brodski generator snage 200kW istraženo je u radu [64], gdje se procjenjuju izlazne temperature ispušnih plinova, moment i snaga. Isti autor provodi slično istraživanje [65] uz razliku da ovaj put koristi alternativno gorivo, odnosno biodizel od palminog ulja. Upotrebu bioetanola kao pogonskog goriva i rezultate ispušnih emisija uz pomoć neuronskih mreža istražuje P. Shanmugam [66]. Procjenu količine ukupnih emisija u dinamičnim uvjetima plovidbe uz pomoć neuronskih mreža obrađeno je u radu [67].

Problem kod metode neuronskih mreža je što iziskuju velike količine ulaznih podataka kako bi izlazni rezultati bili što vjerodostojniji.

Svi navedeni radovi ne koriste neuronske mreže u svrhu procjene emisijskih faktora, nego zbog modeliranja izlaznih varijabli motora koje su usko vezane za izgaranje te njih povezuju s trenutnim ispušnim emisijama. Po autorovom saznanju, trenutno ne postoji znanstveno istraživanje koje uzima u obzir izmjerene podatke emisija ispušnih plinova za vrijeme eksploatacije broda s ciljem modeliranja i unaprjeđenja procjene emisijskih faktora. Nadalje, ovaj nedostatak se posebice ističe kod upotrebe brodskih goriva s ograničenim udjelom sumpora što je potvrđeno opsežnim pregledom literature.

1.5. Znanstvene metode

U procesu izrade doktorskog rada i konceptualizaciji glavnih komponenti ovog istraživanja, korištene su sljedeće znanstvene metode. Induktivna i deduktivna metoda je upotrjebljena pri opažanju i donošenju zaključaka o problematici procjena emisija ispušnih plinova i izrade inventara. Metoda kompilacije je korištena radi obuhvatnog pregleda dosadašnjih znanstvenih radova i istraživanja na temu procjene i mjerenja emisija s brodskih postrojenja. Metoda analize i sinteze služila je za definiranje polazišne točke ovog istraživanja te povezivanja elemenata u jednu cjelinu.

Empirijska metoda primijenjena je za formuliranje hipoteza rada koje se mogu dokazivati eksperimentalnom metodom, koja je u ovom istraživanju upotrjebljena pri mjerenjima sastava ispušnih plinova za vrijeme plovidbe broda. Mjerenja su provedena s mjernim uređajem Testo 350 Maritime v2 na različitim Ro-Pax brodovima i na taj način izrađena je baza podataka. Metoda generalizacije korištena je pri obradi dobivenih podataka s ciljem stvaranja općih zaključaka o unaprjeđenju procjene emisijskih faktora. Statistička metoda poslužila je za analizu izmjerenih podataka, odnosno uspoređivanje srednjih vrijednosti i odstupanja između provedenih mjerenja pri različitim režimima plovidbe. Numerička i matematička metoda nužna je bila pri izradi numeričkog modela zasnovanog na Gaussovoj višestrukoj nelinearnoj regresiji i pri pretvorbi mjernih jedinica emisijskih faktora uz pomoć stehiometrijskih jednadžbi izgaranja. Prilikom izrade modela u softverskom programu MATLAB korištena je metoda modeliranja. Komparativna metoda korištena je za usporedbu dobivenih rezultata emisijskih faktora s postojećim relevantnim bazama podataka. Metoda dokazivanja poslužila je pri donošenju istinitosti postavljenje temeljne hipoteze i pomoćnih hipoteza.

1.6. Struktura rada

Struktura doktorskog rada podijeljena je u šest cjelina i dva privitka koja su vezana za proces ovog istraživanja.

U uvodnom poglavlju definirani su glavni problemi vezani za procjenu emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja, koji su poslužili kao inspiracija za provođenje ovog znanstvenog istraživanja. Na temelju problema istraživanja postavljeni su i objašnjeni cilj i svrha istraživanja, te uzimajući u obzir problem, cilj i svrhu, postavljena je temeljna i tri pomoćne hipoteze doktorskog rada. Pregledom opsežne literature vezane za ovo područje istraživanja predstavljen je uvid u dosadašnja istraživanja, gdje je literatura podijeljena u tri podcjeline: literatura procjene emisija ispušnih plinova, literatura mjerenja emisija s brodskih postrojenja i literatura strojnog učenja i modeliranja procjena emisija. Na kraju poglavlja navedene su korištene znanstvene metode pri izradi doktorskog rada.

Pravne regulative i štetni utjecaj ispušnih plinova s brodskih postrojenja objašnjeni su u drugom poglavlju. Opisane su strategije dekarbonizacije pomorskog prometa od strane IMO organizacije na globalnoj razini, te pravne regulative od strane Europske Unije. Argumentiran je uvid i kritički osvrt na najnovije tehnološke propise i norme vezane za smanjenje i kontrolu emisija iz pomorskog prometa. Nadalje, prikazana je problematika i štetni utjecaj ispušnih plinova na morski okoliš iz brodskih postrojenja poput ugljikovog dioksida, dušikovih oksida, sumporovih oksida, krutih čestica i lako hlapljivih organskih spojeva.

Treće poglavlje opisuje metodologiju procjene emisija, koja je podijeljena na 'top-down' (odozgo-prema dolje) metodu, te 'bottom-up' (odozdo-prema gore) metodu. Obje metode su objašnjene s navedenim varijablama koje se koriste prilikom izračuna ukupnih emisija. Također su obuhvaćene i najrelevantnije studije procjene inventara emisija i emisijskih faktora, gdje je naglašena nepouzdanost procijenjenih emisijskih faktora u određenim studijama.

U četvrtom poglavlju prikazana je mjerna oprema koja je korištena prilikom eksperimentalnih mjerenja za vrijeme eksploatacije broda. Naziv mjernog uređaja je Testo 350 Maritime v2 koji je namijenjen za mjerenje koncentracije ispušnih plinova iz brodskih postrojenja, te je navedena specifikacija uređaja i njegovi sastavni dijelovi. Prikupljanje mjernih podataka izvršeno je na tri Ro-Pax broda, čija su postrojenja i rute plovidbe detaljno opisane. Na kraju poglavlja prikazani su rezultati mjerenja za sva tri broda u fazama plovidbe i manevriranja.

Nakon prikupljenih izmjerenih podataka slijedi faza modeliranja koja je opisana u petom poglavlju. Modeliranje je izvršeno sa višestrukom Gaussovom nelinearnom regresijom, uz pomoć postavljenih zavisnih (y) i nezavisnih varijabli (x). Nakon obrade podataka dobiveni su modeli koji procjenjuju koncentracije CO₂ i NO_x vrijednosti u fazama plovidbe i manevriranja pri različitim opterećenjima rada motora. Za svaki model prikazana su i rezidualna odstupanja od stvarnih (izmjerenih) podataka kako bi se utvrdila reprezentativnost modela.

U šestom poglavlju uspoređeni su dobiveni procijenjeni emisijski faktori s emisijskim faktorima iz postojećih studija inventara brodskih emisija. Emisijski faktori su pretvoreni u g/kWh s pripadajućim jednadžbama i primjerima izračuna. Objasnjene su prednosti procijenjenih emisijskih faktora i mogućnosti upotrebe, te nedostaci pojedinih relevantnih studija procjena emisija. S primjerima rezultata dokazana je temeljena hipoteza rada te tri pomoćne hipoteze. Predložene su preporuke za unaprjeđenje metodologije procjene emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja, te preporuke za daljnja istraživanja vezana za ovu temu.

2. PRAVNA REGULATIVA I UTJECAJ ISPUŠNIH PLINOVA S BRODSKIH POSTROJENJA

Pomorstvo predstavlja jednu od najvažnijih međunarodnih gospodarskih grana te se procjenjuje da obuhvaća 80 % transporta dobara na globalnoj razini, dok u Europi više od polovice transporta (55 %) se odvija pomorskim putem [68]. Današnja rastuća globalizacija ima značajan utjecaj na pomorstvo, što rezultira povećanjem svjetske flote brodova, otvaranjem novih pomorskih ruta, proizvodnjom energetski zahtjevnijih brodskih postrojenja i tehnološkom transformacijom pomorskih luka. Sve navedeno doprinosi povećanju antropogenog utjecaja na morski okoliš u obliku onečišćenja i degradacije ekosustava.

Pretpostavlja se da je pomorstvo kao transportna grana, odgovorno za otprilike 3 % od ukupne globalne emisije stakleničkih plinova. Ovu pretpostavku potvrđuju rezultati istraživanja iz zadnjeg (četvrtog) izdanja IMO studije o emisijama stakleničkih plinova [2]. Najvažniji rezultate ove studije ukazuju na povećanje stakleničkih plinova (ponajviše CO₂) s 977 milijuna tona za 2012. godinu, na 1076 milijuna tona za 2018. godinu, što predstavlja povećanje od 9,6 %. Na globalnoj razini ukupnih emisija od 2012. do 2018. godine, emisije od pomorstva povećale su se s 2,76 na 2,9 %. Zbog pandemije COVID-19 emisije iz transportnog sektora su očekivano niže za 2020. i 2021. godinu. Ako promatramo udio CO₂ emisija po vrsti broda, najveći onečišćivači su brodovi za prijevoz rasutog tereta (440 milijuna tona), zatim tankeri (210 milijuna tona), kontejnerski brodovi (140 milijuna tona), brodovi za generalni teret (40 milijuna tona), dok putnički brodovi imaju najmanji utjecaj (20 milijuna tona) [69]. Velika zastupljenost brodova za rasuti teret, njihova starost i manjak novih tehnoloških rješenja za smanjenje emisija, jedni su od glavnih razloga spomenute statistike.

2.1. Pravne regulative i međunarodne organizacije

Istaknuti štetni utjecaj pomorstva na morski okoliš, rezultirao je uvođenjem novih pravnih regulativa s ciljem dekarbonizacije i kontrole količine emisija iz brodskih postrojenja. Novi propisi i ekološke norme zadnjih godina su znatno rigorozniji i zahtjevniji za postizanje, s toga brodovlasnici se susreću s izazovima udovoljavanja ekološkim propisima, a da pri tome uspiju zadržati ekonomsku dobit i održivo poslovanje. Nove regulative su uglavnom zasnovane na novim tehnološkim rješenjima (unaprjeđenje energetske učinkovitosti s modifikacijom postrojenja) i zakonskim propisima ograničenja emisija (npr. definirani maksimalni sadržaj sumporovih ili dušikovih oksida u ispušnim plinovima).

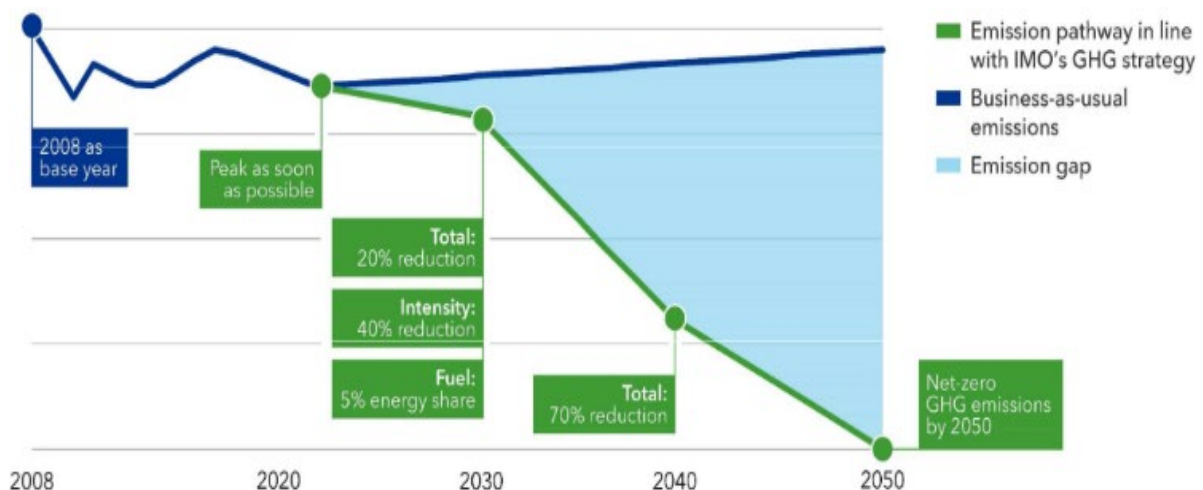
2.1.1. IMO regulative i strategije smanjenja emisija s brodova

Najvažnije zakonske propise i norme na globalnoj razini za sprječavanje onečišćenja morskog okoliša donosi Međunarodna pomorska organizacija (engl. 'IMO - International Maritime Organization') kao posebna agencija Ujedinjenih naroda. Međunarodni propisi se donose preko 'Odbora za zaštitu morskog okoliša' (engl. 'MEPC - Marine Environment Protection Committee') koji je u sklopu MARPOL konvencije za sprječavanje onečišćenja okoliša. Glavna misija i slogan IMO-a je „promovirati sigurno, efikasno, ekološki prihvatljivo i održivo pomorstvo kroz suradnju“ [70]. U travnju 2018. godine, IMO je definirao Inicijalni plan s ciljem smanjenja stakleničkih plinova iz pomorskog prometa, koji je u srpnju 2023. godine ažuriran.

Ključni ciljevi Inicijalnog plana:

- smanjiti udio ugljika u međunarodnoj plovidbi usporedno s 2008. godinom, za 20% do 2030. godine
- povećati spomenuto smanjenje za 70% do 2040. godine
- postići klimatsku neutralnost emisija, odnosno do 2050. godine.

Na slici 1 prikazana je strategija smanjenja emisija stakleničkih plinova ako se prati novi Inicijalni plan od strane IMO-a, te predviđeni porast emisija ako se zadrži trenutni trend pomorskog transporta.



Slika 1. Procjene emisija stakleničkih plinova između dva različita scenarija [71]

Nužne mjere za postizanje ovih ključnih ciljeva, IMO je predstavio u MEPC Rezoluciji (72) [72], koje su ažurirane u Rezoluciji (80). Mjere smanjenja emisija su podijeljene na tri razine: kratkoročne, srednjoročne i dugoročne. Za kratkoročne mjere predviđeni period realizacije i odobrenja od MEPC-a je između 2018. i 2023. godine, dok za srednjoročni plan je između 2023. i 2030. godine. Zamišljene mjere dugoročnog plana stupile bi na snagu nakon 2030. godine.

Kratkoročne mjere mogu se kategorizirati kao mjere koje direktno smanjuju ili podržavaju akcije smanjenja emisija ispušnih plinova s brodova. Sve sljedeće mjere predstavljaju moguća kratkoročna rješenja za smanjenje emisija:

- unaprjeđenje strukture energetske učinkovitosti za nove brodove s fokusom na Projektni indeks energetske učinkovitosti (engl. EEDI – 'Energy Efficiency Design Indeks') i Brodski plan upravljanja energetske učinkovitosti (engl. SEEMP – 'Ship Energy Efficiency Management Plan')
- osnivanje Programa unaprjeđenja postojećih flota brodova
- razmotriti i analizirati optimizaciju i smanjenje brzine plovidbe kao potencijalnu metodu, a da se pri tome uzme u obzir sigurnost, udaljenost i područje plovidbe
- izrada tehničkih i operativnih mjera energetske učinkovitosti za nove i postojeće brodove. Mjera uključuje strategiju smanjenja potrošnje goriva, godišnji omjer učinkovitosti broda i energetske učinkovitost po radnom satu
- analizirati mjere za obradu emisija metana i hlapljivih organskih spojeva (engl. 'VOC – Volatile Organic Compounds')
- potaknuti izradu i ažuriranje nacionalnih planova za izradu strategija koje uključuju obradu emisija stakleničkih plinova iz međunarodnog pomorskog prometa
- razmotriti i analizirati mjere za poticanje izrade lučkih infrastruktura s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova, s naglaskom na korištenje visokonaponskih lučkih priključaka koji su snabdijevani preko obnovljivih izvora. Lučka infrastruktura trebala bi podržavati upotrebu alternativnih goriva, tj. emisijski neutralna goriva
- izrada smjernica za intenzitet ugljika u svim vrstama goriva s ciljem pripreme programa implementacije alternativnih goriva
- inicijativa i podržavanje uvođenja novih tehnoloških rješenja.

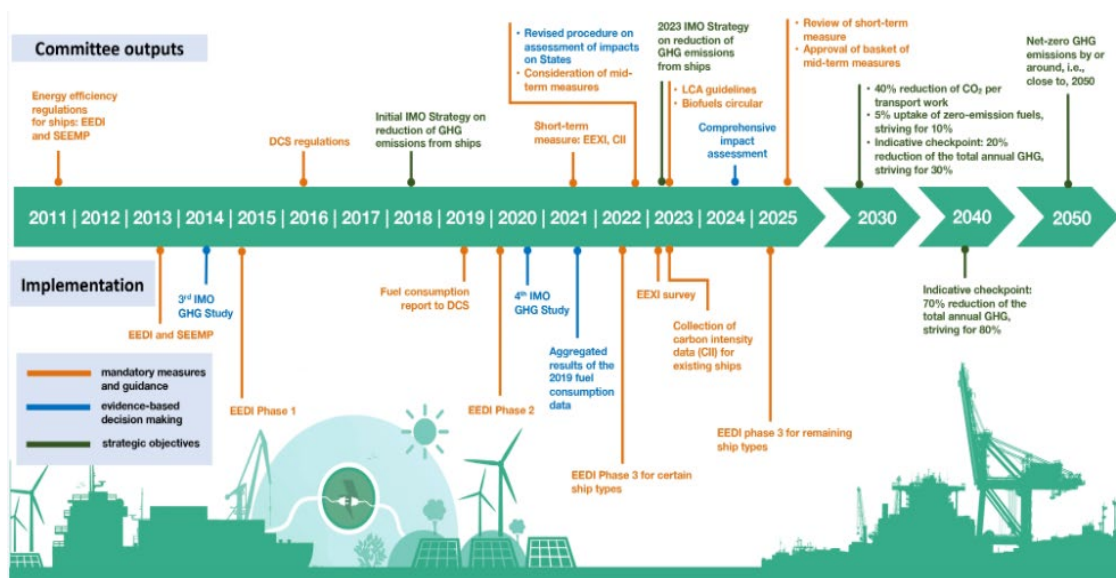
Srednjoročne mjere se također kategoriziraju kao mjere s direktnim utjecajem na smanjenje emisija stakleničkih plinova s brodova do 2030. godine. U srednjoročne mjere spadaju:

- implementacija programa za djelotvorno uvođenje alternativnih nisko-ugljičnih goriva ili ugljično neutralnih goriva, uključujući ažuriranje nacionalnih planova radi razmatranja upotrebe navedenih vrsta goriva
- mjere operativne energetske učinkovitosti za nove i postojeće brodove, s ciljem unaprjeđenja postignuća energetske učinkovitosti brodova
- nove inovativne mjere smanjenja emisija koje uključuju tržišno zasnovane metode (engl. MBM – 'Market based Measures')
- razviti mehanizam povratnih informacija, kako bi se omogućilo prikupljanje i dijeljenje naučenih i najbolje primjenjivih metoda i saznanja.

Pod dugoročnim mjerama smatraju se sve potencijalne mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova s brodova nakon 2030. godine. U dugoročnom planu spadaju sljedeće mjere:

- nastaviti razvijati i podržavati korištenje alternativnih nisko-ugljičnih goriva i ugljično neutralnih goriva, kako bi se omogućila dekarbonizacija pomorskog sektora u drugoj polovici stoljeća
- podržavati i olakšati razvoj novih inovacija za smanjenje emisija.

Na slici 2 prikazan je IMO plan usvojen 2023. godine za unaprjeđenje učinkovitosti broda s konačnim ciljem smanjenja emisija CO₂.



Slika 2. IMO plan za unaprjeđenje učinkovitosti broda od 2011. do 2050. godine [73]

Smanjenje emisija i unaprjeđenje učinkovitosti moguća su kroz energetska – tehnološka rješenja poput optimizacije postrojenja i snage motora, izrade energetski prihvatljivog trupa broda, efikasnog planiranja rute plovidbe, optimizacije brzine broda i upotrebom alternativnih brodskih goriva.

Spomenuta rješenja smatraju se nedovoljnim za postizanje ambicioznih ciljeva smanjenja emisija, s toga se u zadnje vrijeme razmatra mogućnost uvođenja tržišno zasnovanih metoda (MBM) koje su uključene u srednjoročni IMO plan. MBM mjere su zasnovane na ekonomskoj varijabli, odnosno porezu na emisije koji bi brodovlasnici morali platiti s obzirom na godišnju količinu ispuštenih emisija. Cilj ove metode gdje 'onečišćivač' plaća novčanu taksu je potaknuti smanjenje utrošenog goriva, odnosno cijene svojih emisija [74]. Ova metoda se još uvijek razmatra pošto sve članice IMO-a nisu bile suglasne zbog dosta uočenih nejasnoća i mogućih problema. Glavne nejasnoće koje bi se trebale definirati su: koji sve brodovi podliježu plaćanju poreza, je li porez zavisao o vrsti goriva, vrijeme stupanja na snagu, tko će i na koji način sakupljati novac od poreza i za koje svrhe će biti namijenjen? Cijena poreza trebala bi ovisiti o vrsti goriva, odnosno koeficijentu ugljika u gorivu. Univerzalna valuta bila bi izražena kao USD (američki dolar)/po toni CO₂. Ako bi porez bio 10 USD po toni HFO, onda bi porez na emisije iznosio 3,21 USD/tCO₂ jer je koeficijent ugljika za HFO 3,11 (3,21=10/3,11).

Razine poreza na emisije trebale bi se razmotriti i definirati s ciljem pronalaska idealnog kratkoročnog ili srednjoročnog rješenja za smanjenja emisija. Psaraftis, H. u svom radu [75] analizira MBM mjere i procjenjuje raspon cijena poreza s obzirom na razine poreza (tablica 1). Niska razina predstavljala bi neznatno smanjenje emisija kod koje bi jedino profitirala IMO služba za razvoj i istraživanje od prikupljenog novca. Kod srednje razine postiglo bi se umjereno smanjenje emisija, pretpostavljajući kroz metodu smanjenja brzine broda i uštede goriva. Zadnja razina predstavlja najveći porez na emisije kod koje bi brodske kompanije bile primorane prijeći na upotrebu alternativnih nisko-ugljičnih goriva.

Tablica 1. Procjena odnosa razine poreza i cijene poreza na emisije [75]

| Razina poreza | Raspon cijene USD/tCO ₂ | Očekivano smanjenje emisija |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Nisko | 0,5 - 5 | nimalo ili zanemarivo |
| Srednje | 5 - 75 | umjereno |
| Visoko | >75 | značajno |

2.1.2. Novi energetska-tehnološki propisi i norme

U lipnju 2021. godine IMO je usvojio izmjene i dopune MARPOL Priloga VI kroz Rezoluciju MEPC.334 (76) [76]. Usvojena su dva nova pokazatelja energetske učinkovitosti:

- postignuti indeks energetske učinkovitosti postojećeg broda (EEXI – engl. 'Efficiency existing ship index')
- indikator intenziteta ugljika (CII – engl. 'Carbon Intensity Indicator').

Oba pokazatelja su usvojena kao nadopuna kratkoročnim mjerama s ciljem poticaja smanjenja emisija ispušnih plinova kroz tehnološka i operativna rješenja, te stupaju na snagu od 1. siječnja 2023. godine i obvezni su za sve brodove od 400 bruto tona i veće. Postignuti EEXI je nadogradnja na projektni EEDI i odnosi se na brodove izgrađene prije 1. siječnja 2023., te nakon proračuna mora biti manji od zahtijevanog EEXI kako bi brod udovoljio minimalnim energetske standardima. Njegov izračun predstavlja količinu CO₂ emisija u gramima po jedinici tone tereta i nautičke milje. Drugim riječima EEXI ograničava CO₂ emisije po jedinici transporta. Prema smjernicama u Rezoluciji MEPC.351 (78), postignuti EEXI se može izračunati na sljedeći način [77] :

$$EEXI = \frac{(P_{ME} + C_{FME} + SFC_{ME}) + (P_{AE} + C_{FAE} + SFC_{AE})}{DWT \cdot V_{ref} \cdot f_c}, \quad (1)$$

gdje su P_{ME} i P_{AE} snage glavnih i pomoćnih motora (kW), C_{FME} i C_{FAE} faktor konverzije između potrošnje goriva i CO₂ emisija, SFC_{ME} specifična potrošnja glavnog motora i SFC_{AE} specifična potrošnja pomoćnog motora (g/kWh), DWT nosivost broda, V_{ref} brzina broda i f_c faktor korekcije za putničke i RO-RO brodove

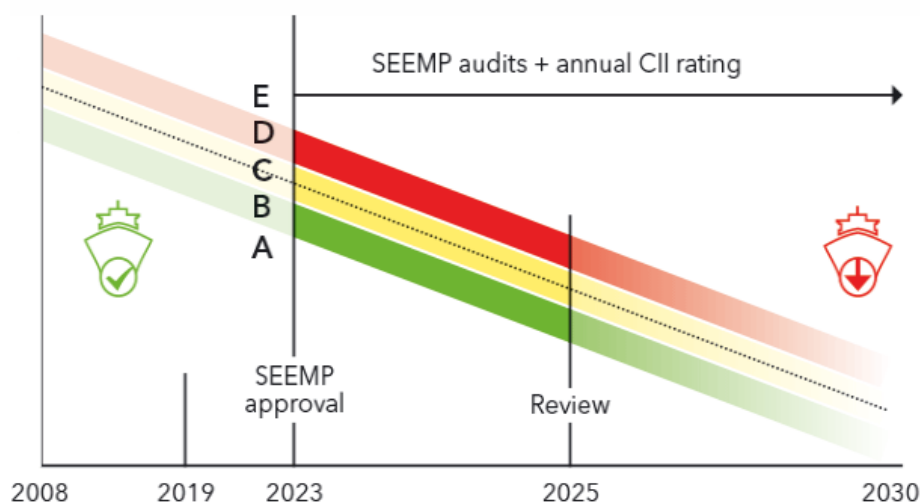
Nadalje, postignuti EEXI spada u projektni indeks, a ne u operativni indeks, te se izračun mora verificirati s popraćenom dokumentacijom (EEXI Tehnički zapisnik) od strane Uprave ili priznate pomorske organizacije. Na koji način će brodari postići zadovoljavajući EEXI nije jasno definirano te u kojoj mjeri je moguće konačno smanjenje emisija ostaje nepoznanica. U istraživanju potencijalnog smanjenja CO₂ emisija D.Rutheford, X.Mao i B.Comer [78] dolaze do zaključka da bi EEXI mjera neznatno doprinijela smanjenju emisija (0,7-1,3%), odnosno ostvarenju IMO ambicioznih ciljeva.

Jedna od glavnih metoda za postići zahtijevani EEXI je ograničenje snage motora što rezultira i smanjenjem brzine broda. Prilikom izračuna EEXI kod snage motora uvrštava se 75% od maksimalne trajne snage ili 83% ako je korišteno ograničenje snage (MCR_{lim}). Kako bi se zadovoljila EEXI norma stariji brodovi morat će koristiti ograničenje MCR-a, dok noviji brodovi po izgradnji već udovoljavaju projektnom EEDI, a s tim automatski zadovoljavaju i EEXI uvjet. Pošto, EEXI mjera spada samo u tehničku odnosno projektnu mjeru i uzima u obzir jedino projektirano brodsko postrojenje, ne smatra se mjerodavnim pokazateljem stvarnih emisija.

Nova operativna kratkoročna mjera koja je također stupila na snagu 01. siječnja 2023. je CII Indikator intenziteta ugljika koji predstavlja operativnu učinkovitost koja mjeri intenzitet ugljika izražen u gramima CO_2 po jedinici kapaciteta i prijeđenim nautičkim miljama. Svaki brod od 5000 bruto tonaže ili više je obavezan izračunati CII za period od 12 mjeseci u skladu s smjericama IMO Rezolucije MEPC.352 (78) [79]. Izračun se može prikazati na sljedeći način:

$$CII = \frac{\text{godišnja potrošnja goriva} \cdot CO_2 \text{ faktor}}{\text{godišnja udaljenost plovidbe} \cdot \text{nosivost}(DWT)} \quad (2)$$

Postignuti godišnji CII mora biti verificiran u odnosu na zahtijevani CII radi određivanja oznake ugljikovog intenziteta (slika 3). Kategorije oznake su od A do E, gdje A oznaka predstavlja vrlo visoku, a E oznaka vrlo nisku razinu izvedbe. Srednja razina C predstavlja zahtijevani godišnji CII koji brodovi moraju zadovoljiti.



Slika 3. Zahtijevani CII i razine ugljikovog intenziteta [80]

U slučaju da brod postigne razinu D tri godine zaredom ili razinu E u jednoj godini, dužan je priložiti plan korektivnih radnji u sklopu SEEMP-a, gdje će prikazati način kako će postići veću C razinu. IMO zahtijeva da se CII smanjuje svaku godinu za minimalno 2%, što znači da brod s oznakom D ako nije primijenio nikakve mjere poboljšanja energetske razine, iduću će godinu s istim CII imati oznaku E. U radu [81] Psaraftis N. ističe da IMO nije definirao posljedice ako brod ne udovoljava zahtijevanom CII osim navedenih, te također nisu navedeni nikakvi poticaji za dostizanje A ili B razine.

Glavne varijable koje utječu na CII broda su ukupna godišnja potrošnja goriva, odgovarajući emisijski faktor za ugljik, te ukupna godišnja udaljenost plovidbe i određena nosivost broda (DWT) ili bruto tonaža (GT) ovisno o vrsti broda. Može se primijetiti prema jednadžbi (2) da se zadovoljavajući CII može postići ako smanjimo vrijednosti u brojniku, ili ih povećamo u nazivniku. Smanjenje brojnika, odnosno smanjenje postignutog CII-a može se postići na sljedeće načine:

- smanjenjem brzine plovidbe što će rezultirati i smanjenjem potrošnje goriva
- smanjenjem potrošnje goriva korištenjem energetske učinkovite tehnologije na brodu tj. optimizacijom rada motora i propelera, smanjenjem trenja propulzije, ugradnjom alternativnih izvora energije
- upotrebom goriva s niskim emisijskim faktorom.

U pogledu povećanja varijabli nazivnika, nosivost broda je konstantna vrijednost dok udaljenost plovidbe se može povećati kako bi se postigao željeni CII. Povećanje udaljenosti plovidbe odnosno prijeđenih nautičkih milja može dovesti do kontraproduktivnog efekta, odnosno povećanja CO₂ emisija. Stariji brodovi koji nisu ekološki optimizirani da bi postigli zahtijevani CII morat će ploviti dužim rutama, dok noviji brodovi mogu postići zadovoljavajuću CII razinu i na kraćim rutama zbog svoje učinkovite potrošnje goriva. Na taj način stariji brodovi bi postigli zahtijevani CII, ali ukupna količina CO₂ emisija od svih brodova na dužim rutama bi u konačnici porasla, što je suprotno od IMO kratkoročnog cilja. Mnogi nepredviđeni faktori mogu utjecati na konačnu razinu CII-a poput dužeg stajanja u luci, neplaniranih kvarova te pogoršanja vremenskih uvjeta plovidbe. Duže zadržavanje broda u lukama značit će i lošiji CII, što će zahtijevati dodatno logističko planiranje i optimizaciju pomorski ruta. Zbog svih navedenih problema koji bi se mogli stvoriti pri udovoljavanju CII propisa, IMO će zasigurno kroz nove MEPC Rezolucije ažurirati propise kako bi bili pristupačniji i jasniji za sve vrste brodova.

2.1.3. Pravne regulative Europske Unije

Pošto se IMO regulative donose na globalnoj razini, mnoge država sa svojim vlastima donose pravne propise na nacionalnoj razini kako bi ubrzali proces dekarbonizacije. Najbolji primjer je Europska Unija koja je odlučila smanjiti emisije stakleničkih plinova za 80% do 2025. god. i 55% do 2030. god. usporedno s 1990. god. te postići klimatsku neutralnost do 2050. god. [82].

Europska Unija donijela je Uredbu (EU) 2015/757 [83] Europskog parlamenta i Vijeća o praćenju emisija ugljikovog dioksida, izvješćivanju o njima i njihovoj verifikaciji (engl. MRV – 'Monitoring, Reporting and Verification') u travnju 2015. god. dok je prvo razdoblje izvješćivanja započelo od 2018. god. Odnosi si se na sve brodove iznad 5000 BT koji pristaju u lukama EU ili isplovljavaju iz njih, neovisno pod kojom zastavom plove. Ovakav sustav za praćenje emisija CO₂ temelji se na potrošnji goriva i odgovarajućem emisijskom faktoru za brodsko gorivo. Podaci o godišnjim CO₂ emisijama imaju javni otvoreni pristup te se smatra da s tim pristupom uklanjaju nepouzdana informacije o potrošnji goriva, omogućuju relevantne informacije o učinkovitosti broda i razvoj daljnjih smjernica za smanjenje emisija.

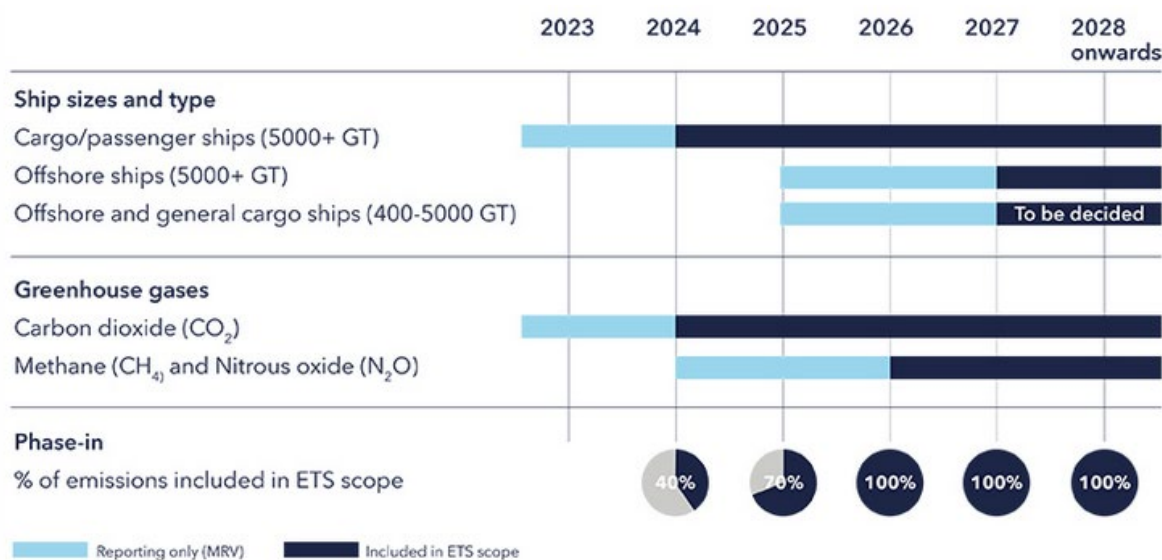
Europska agencija za pomorsku sigurnost (engl. EMSA - 'European Maritime Safety Agency') izradila je digitalnu web platformu THETIS-MRV [84] na kojoj su dostupni svi relevantni podaci propisani ovom Uredbom poput:

- identitet broda (ime, IMO identifikacijski broj, luka upisa)
- tehničku učinkovitost broda
- prosječnu potrošnju goriva i emisije CO₂ u tonama
- ukupne emisije CO₂ po prijeđenoj udaljenosti na putovanjima kgCO₂/nm
- ukupno godišnje vrijeme provedeno u plovidbi
- primijenjenu metodu praćenja
- identitet verifikatora koji je ocijenio izvješće.

Poj pojmom verifikator smatraju se pravni subjekti koji su akreditirani od strane Komisije, a to su najčešće postojeća klasifikacijska društva (DNV GL, ABS, Lloyd's Register Class NK itd.). Zadatak verifikatora je da kontrolira planove praćenja i izvješća o emisijama kako bi bili u skladu s MRV zahtjevima. Ako je verifikator pozitivno ocijenio vjerodostojnost i točnost informacija praćenja i izvješćivanja emisija za pojedini brod, onda izdaje dokument o usklađenosti s kojim se potvrđuje da brod udovoljava MRV zahtjevima za određeno razdoblje.

Ako se u procesu verifikacije zaključi da izvješće o emisijama sadrži netočnosti i nepravilnosti onda verifikator mora obavijestiti Komisiju kako bi se revidiralo izvješće, ispravile netočnosti i omogućilo dovršenje postupka verifikacije na vrijeme.

Dodatno rješenje problema emisija ispušnih plinova u EU pokušava se postići kroz Sustav trgovine emisijskim dozvolama Europske unije (EU ETS – engl. 'European Union Emission Trading System'). Ovaj sustav uspostavljen je Direktivom 2003/87/EZ Europskog parlamenta i Vijeća [85] i započeo je s primjenom 2005. god. u kojem su sudjelovale državne članice Europske unije (tada njih 15). U početnim fazama EU ETS-a sektori koji su bili obuhvaćeni su elektrane, rafinerije i slična stacionarna postrojenja, dok je zrakoplovstvo uključeno 2012. god. Zadnjom revizijom EU ETS-a donesena je odluka s kojom se i pomorski promet uključuje u sustav od 2024. god., a odnosit će se na sve putničke ili teretne brodove iznad 5000 BT (slika 4). Osim CO₂ emisija koje su uključene u sustav, od 2026. god. proširenje sustava će obuhvatit i emisije metana (CH₄) i dušikovih oksida (N₂O).



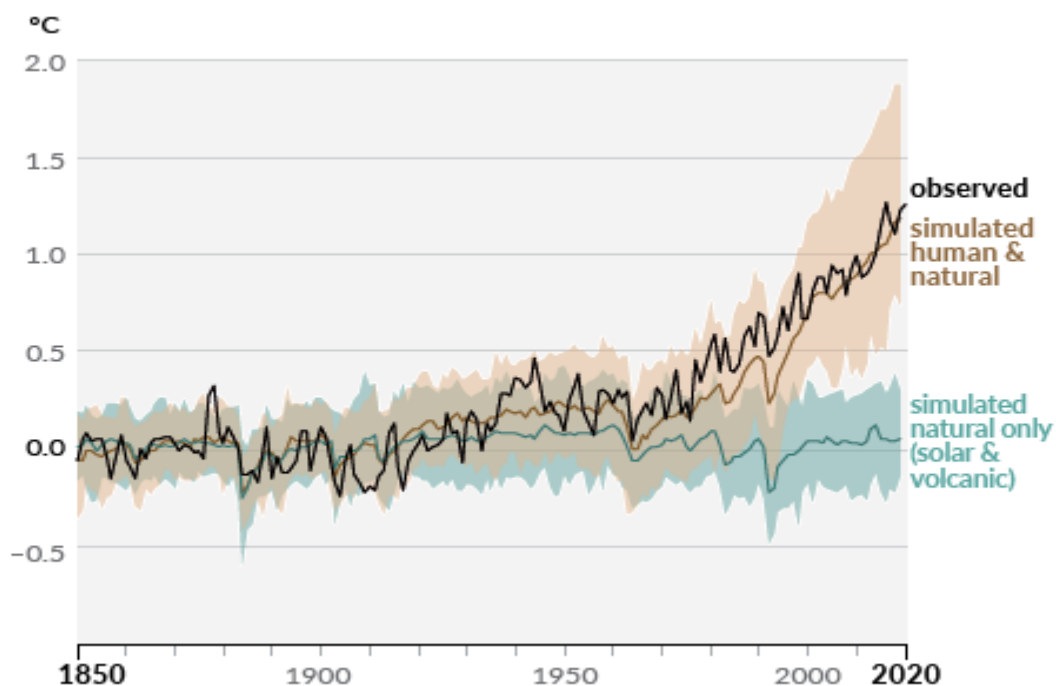
Slika 4. Razvoji plan EU ETS Sustava [86]

Sustav EU-ETS je zasnovan na tržišnim mjerama (engl. 'cap and trade') kod kojih pravna tijela i Vijeće EU-a postavlja ograničenje za dozvoljenu količinu ispuštenih emisija koje su regulirane sustavom trgovine emisija. Svake iduće godine ograničenje tj. dopuštena granica emisija se smanjuje kako bi se postigao cilj smanjenja emisija od 55% do 2030. god. Svi brodovi u plovidbi ili pri pristajanju u luke EU uključeni su u EU ETS sustav, te im se izdaju dozvole za emitiranje (engl. 'allowance') koje predstavljaju dozvolu za emitiranje 1 tone CO₂.

Izvještaj i verifikaciju ispuštene količine emisija provodit će se preko uspostavljenog MRV-a sustava. Ako se dogodi da brod nije udovoljio zahtjevima EU ETS-a tj. nije dostavio dozvole za emitiranje, onda je dužan platiti novčanu kaznu od 100 EUR/toni CO₂. Ostale sankcije nisu još definirane, ali postoji mogućnost zabrane ulaska u luke EU-a svim brodovima koji nisu udovoljili propisima sustava dvije uzastopne godine. Prihod od trgovanja emisijskim jedinicama trebao bi se ulagati u razvoj nisko-ugljičnih energetskeg postrojenja te u obnovljive izvore energije. Cijena jedne emisijske jedinice još nije određena, ali se procjenjuje da će svake iduće godine rasti kako bi se potaknulo brodske kompanije u procesu smanjenja emisija. Nadalje, besplatne emisijske jedinice dodjeljivat će se postrojenju s najvećim rizikom od preseljenja svoje proizvodnje izvan EU-a, dok u pogledu transportnog sektora to pravilo je neizvedivo. Europski sustav trgovanja emisijskim dozvolama je odgovor na IMO-ov spori proces realizacije ovih mjera na globalnoj razini. Uspješan pokazatelj EU ETS-a sustava je smanjenje emisija u 2016. god. za 22% usporedno s 1990. god., što ukupno iznosi 1279 milijuna tona CO₂ [87]. U sklopu paketa „Spremni za 55%“ čiji je cilj smanjenje neto emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% do 2030. godine, usvojena je i Fuel EU regulativa s inicijativom povećanja udjela nisko-ugljičnih goriva u međunarodnom pomorskom prometu u EU. Regulativa također zahtijeva da se putnički i kontejnerski brodovi od 2030. priključe na kopnene izvore električne energije u glavnim lukama EU-a, kada su na vezu dulje od dva sata.

2.2. Štetni utjecaj emisija ispušnih plinova

Utjecaj ispušnih plinova na atmosferu i stvaranje efekta globalnog zagrijavanja započelo se spominjati sredinom 20. stoljeća, dok je popularizacija i prvo znanstveno dokazivanje uslijedilo 90-tih godina. Zbog boljeg razumijevanja klimatskih promjena, istraživanja mogućih posljedica i ublažavanja nastalih klimatskih problema osnovano je Međuvladino tijelo za klimatske promjene (IPCC engl. - 'Intergovernmental Panel on Climate Change'). Opsežno izvješće IPCC-a iz 2007. god. [88] potvrđuje (vjerojatnost 90-95%) da je globalno zatopljenje od sredine 20. stoljeća uzrokovano antropogenim povećanjem koncentracije stakleničkih plinova. Shodno prepoznatom klimatskom problemu potpisan je Pariški sporazum o klimatskim promjenama 2015. god. na konferenciji UNFCCC (engl. 'United Nations Framework Convention on Climate Changes') s ciljem smanjenja prosječne globalne temperature ispod 2°C, te ograničenja porasta temperature na 1,5°C [89].

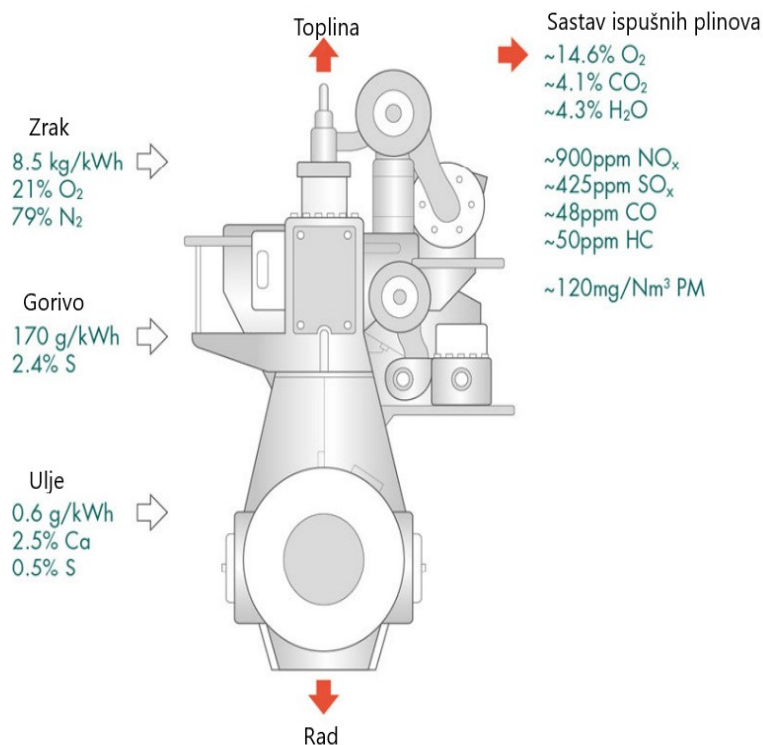


Slika 5. Promjene srednje globalne temperature od 1850. do 2020. godine [90]

U posljednjoj opsežnoj IPCC studiji [90] procjenjuje se da je porast globalne temperature u prva dva desetljeća 21. stoljeća bio od 0,84 do 1,10°C veći nego u razdoblju od 1850-1900 god. Srednja globalna temperatura je u posljednjih 100 godina porasla za 0,3 do 0,6°C s izraženijim zatopljenjem nad kopnom nego nad oceanima. Na slici 5 prikazana je usporedba povećanja srednje globalne temperature kao rezultat antropogenog utjecaja i utjecaja isključivo prirodnih promjena. Zadnja mjerenja [91] pokazuju da trenutna prosječna koncentracija CO₂ iznosi 421 ppm (engl. 'parts per million', dijelova na milijun) što je 50% iznad preindustrijskog razdoblja. Zanimljiva usporedba s današnjom situacijom je razdoblje Zemlje prije 3-5 milijuna godina kad je temperatura bila 2-3°C viša, a razina mora za 10 metara iznad današnje, međutim tada nije postojao čovjekov utjecaj na prirodu. U izvješću Programa UN-a za okoliš [92], istaknuta je potreba za ubrzanim procesom smanjenja emisija, ako se želi postići cilj Pariškog sporazuma. Da bi se postiglo željeno ograničenje zatopljenja od 1,5°C, trebalo bi smanjiti emisije stakleničkih plinova za 45% do 2030. god., odnosno za 30% kako bi se izbjeglo zagrijavanje od 2°C. S trenutnim trendom prilagodbe strategiji smanjenja emisija, vjerojatnost za postizanje spomenutog cilja do 2030. godine je vrlo mala. Strategija smanjenja zahtijeva transformaciju globalno-ekonomske strukture s naglaskom na industrijske sektore, prehrambeni sektor, sektor opskrbe električne energije i transportni sektor.

2.2.1. Emisije iz brodskih energetskeg postrojenja

Pod pojmom 'emisije ispušnih plinova' smatraju su sve onečišćujuće tvari ispuštene u atmosferu nastale u procesu izgaranja u brodskim motorima s unutarnjim izgaranjem i generatorima pare. Produkti izgaranja izlaze u atmosferu u struji dimnih plinova te svojim kemijskim sastavom štetno utječu na morski granični sloj atmosfere (troposfera). Utjecaj dimnih plinova na atmosferu prvenstveno ovisi o njegovom sastavu odnosno koncentraciji štetnih plinova te temperaturi ispušnih plinova i meteorološkim uvjetima (jačina vjetra, naoblaka itd.). Uslijed miješanja ispušnih plinova i okolnog zraka dolazi do kemijskih reakcija kod kojih se stvaraju sekundarni spojevi. Manshausen P. u istraživanju [93] dolazi do zaključka da dimni ispušni trag može imati dugoročne posljedice na albedo (omjer reflektirane svjetlosti s nekog tijela) oblaka zbog povećane koncentracije aerosola. Primarni izvori ispušnih plinova u brodskim postrojenjima su glavni porivni motori i pomoćni (generatori električne energije) motori, dok se ostali izvori poput generatora pare najčešće zanemaruju zbog znatno manjih emisija. U kontekstu ovog rada, istraživanje obuhvaća isključivo konvencionalno brodsko postrojenje s dizelskim motorom i njegovim produktima izgaranja (slika 6).



Slika 6. Pregled sastava ispušnih emisija kod dvotaktnog dizel motora [94]

Produkti izgaranja prvenstveno ovise o kemijskom sastavu goriva i kvaliteti procesa izgaranja. Tekuća brodska dizelska goriva su smjesa ugljikovodika koja sadrže prosječno 84-86 % ugljika, vodika 10-13%, sumpora 0,1- 4% i tragova metala poput vanadija, nikla, i dr. s udjelima od 0,02-0,04 %.

Ispušni plinovi nastaju kao produkti izgaranja goriva u cilindru uz prisustvo potrebnog zraka za izgaranje, te njihov sastav koji se smatra štetnim, a ispušta se u atmosferu sačinjavaju:

- ugljikov dioksid (CO_2)
- ugljikov monoksid (CO)
- dušikovi oksidi (NO_x)
- sumporovi oksidi (SO_x)
- hlapljivi organski spojevi (VOC)
- krute čestice (PM)
- neizgoreni ugljikovodici (HC).

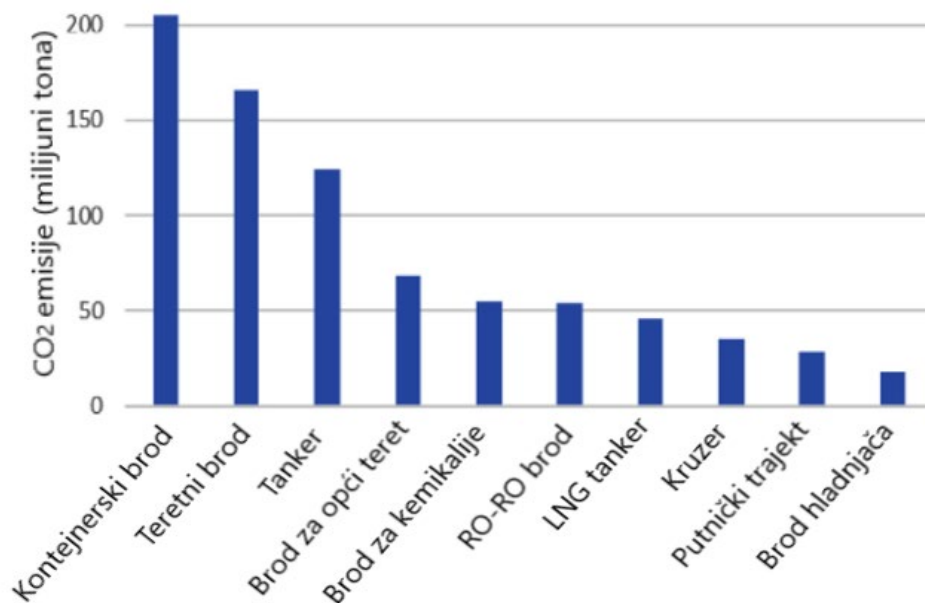
2.2.2. Emisije ugljikovog dioksida

Ugljikov dioksid je kemijski spoj koji je sastavni dio atmosfere i ima važnu ulogu u procesu fotosinteze kod biljaka i algi zbog stvaranja ugljikohidrata, dok je u ljudskoj fiziologiji neizostavni produkt ciklusa disanja. Njemu se pripisuje terminološki naziv „staklenički plin“ jer u povećanoj koncentraciji uzrokuje zagrijavanje Zemljine atmosfere odnosno efekt staklenika. Najzastupljeniji staklenički plin u atmosferi je vodena para nastala prirodnim procesom isparavanja hidrosfere, dok povišene koncentracije metana (CH_4) i klorofluorouglijika (freon) su uzrokovani ljudskom djelatnošću. Utjecaj stakleničkog plina na globalno zagrijavanje prvenstveno ovisi o njegovom prisustvu u atmosferi. S gledišta doprinosa globalnom zatopljenju, CO_2 ima veći doprinos nego CH_4 , zbog znatno većeg udjela u atmosferi iako je CH_4 oko 80 puta snažniji staklenički plin nego CO_2 . Današnja akumulirana količina CO_2 u atmosferi premašuje 400 ppm, što je ponajviše rezultat izgaranja fosilnih goriva i procesa deforestacije. Prirodni ciklus apsorpiranja CO_2 iz atmosfere odvija se uz pomoć oceana i tla s vegetacijom, ali s današnjom povećanom koncentracijom taj sustav je neuravnotežen i ne može dovoljne količine apsorpirati (topivost CO_2 se smanjuje povećanjem temperature oceana). U istraživanju [95] koje procjenjuje ukupne godišnje apsorpirane emisije ugljika, rezultati procjene ukazuju na neuravnoteženost prirodnog sustava od 3% (-1.0 Gt CO_2 /god.).

U pogledu pomorskog prometa, CO₂ emisije iz brodskih postrojenja su najzastupljenije zbog dugotrajne i prevladavajuće upotrebe konvencionalnih brodskih dizelskih goriva koja sadrže visok postotak ugljika. Prilikom izgaranja goriva u cilindrima brodskih motora dolazi do potpune oksidacije ugljika u gorivu uz preduvjet optimalnog omjera goriva i zraka (pretičak zraka);



Teorijski gledano, najučinkovitiji proces izgaranja je ako dovedemo optimalnu količinu zraka u cilindar (teorijska količina) za izgaranje, gdje će sav kisik reagirati s ugljikom i neće se nalaziti u ispušnim plinovima. U ovom slučaju postotak CO₂ emisija bi bio maksimalan, ali u stvarnosti nikad se ne dovodi teorijska količina zraka iz praktičnih razloga (nepotpuno izgaranje). Kad govorimo o izgaranju goriva u dizelskim motorima uvijek dovodimo više zraka od teorijski potrebne količine, s toga u ispušnim plinovima moramo imati i određeni postotak kisika.



Slika 7. Prosječne CO₂ emisije pomorskog prometa po vrsti broda [96]

Na slici 7 prikazane su godišnje prosječne količine CO₂ emisija u ovisnosti o vrsti broda. Statistički podaci od IMO-a (zadnja procjena za 2019. god.) ukazuju da su kontejnerski brodovi, brodovi za rasuti teret i tankeri najveći izvori CO₂ emisija. Procjenjuje se da na godišnjoj razini u međunarodnom prometu ispuste 614 milijuna tona CO₂. Prikupljeni podaci u sklopu EU MRV za 2019. god. procijenili su ukupne godišnje CO₂ emisije na 145 milijuna tona, od kojih 30%

se odnosi na kontejnerske brodove zbog visoko frekventnih pomorskih ruta. Za razliku od međunarodnog prometa, u EU pomorskom prometu veliki udio imaju i putnički brodovi. Od ukupnih emisija Ro-Pax brodovi imaju udio od 10%, putnički brodovi 4,8% i RO-RO brodovi 4,25% [97]. Pošto CO₂ emisije prvenstveno ovise o vrsti goriva odnosno o postotku ugljika u gorivu, smanjenje emisija postiže se kroz optimizaciju učinkovitosti postrojenja (potrošnja goriva) ili upotrebom alternativnih izvora.

Mogućnosti smanjenja CO₂ emisija iz brodskih postrojenja:

- unaprjeđenjem energetske učinkovitosti kroz operativne mjere (smanjenje brzine, optimizacijom pomorske rute i vremena čekanja u lukama)
- upotrebom alternativnih goriva bez udjela ugljika ili nisko-ugljičnih goriva
- korištenjem obnovljivih izvora energije (propulzija uz snagu vjetra, solarni paneli itd.)
- tehnologije smanjenja emisija instalirane na brodu (ispiranje ispušnih plinova, tehnologija hvatanja i skladištenja emisija).

Emisije ugljikovog monoksida (CO) nastaju u procesu nepotpunog izgaranja (nedovoljna količina zraka za izgaranje, neadekvatno miješanje goriva i zraka itd.) što je prikazano sljedećom jednačinom:

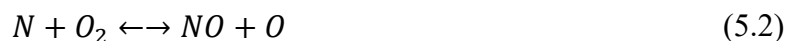


Koncentracija CO u ispušnim plinovima je veća ako je udio kisika manji (nedovoljan), što može biti slučaj prilikom upućivanja motora ili pri niskom opterećenju rada motora. Zbog dovođenja viška zraka u cilindar CO udio naglo pada jer se dodatni atomi kisika povezuju i tvore CO₂. Kod dizelskih motora zbog visokog pretička zraka i načina rada, udio CO u ispušnim plinovima je zanemariv, dok kod benzinskih motora je češća pojava zbog manjka kisika. CO je izrazito otrovan za ljudsko zdravlje jer se puno bolje veže na hemoglobin u crvenim krvnim zrnima nego kisik, te je u koncentracijama većim od 1% smrtonosan. U industriji služi za kao reaktant za dobivanje određenim metala (npr. željeza u visokoj peći) ili kao sirovina za razne proizvode. Zbog vrlo niskih i zanemarivih emisija CO-a kod dizelskih motora (posebice u brodskom postrojenju) u sklopu ovog istraživanja CO izmjereni podaci se neće uzimati u obzir prilikom modeliranja, tj. unaprjeđenja procjene emisijskih faktora.

2.2.3. Emisije dušikovih oksida

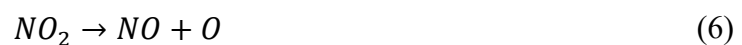
Izraz dušikovi oksidi (NO_x) odnosi se na nastale plinove prilikom oksidacije atmosferskog dušika u procesu izgaranja. Nastali kemijski spojevi su dušikov (II) oksid (NO – dušikov monoksid) koji u sastavu ispušnih plinova dodatno oksidira u dušikov dioksid (NO₂), te prilikom ispuha u atmosferu formiraju se i dušikov (I) oksid (N₂O). Na stvaranje NO_x-a prilikom izgaranja u cilindru motora utječu i razni preduvjeti poput maksimalnog tlaka izgaranja, temperature izgaranja i omjera dovedenog zraka i goriva. Kod izgaranja goriva u dizelskim motorima pri visokim temperaturama pretežno se stvara dušikov monoksid tzv. termički NO. On nastaje pri visokim temperaturama ($T > 1300^{\circ}\text{C}$) izgaranja i sačinjava 90% volumnog udjela od ukupno stvorenog NO-a. Promptni NO proizlazi iz molekularnog dušika u zraku koji reagira s radikalima ugljikovodika i pretežno nastaje pri niskim temperaturama što nisu karakteristični uvjeti u dizelskim motorima, pa ne sudjeluje u značajnom udjelu (5%) od ukupnih NO-a.

Nastajanje termičkog NO_x može se opisati s tri kemijske reakcije u kojima sudjeluju slobodni radikali (N, O, OH, H) i koje se temelje na Zeldovičevom mehanizmu [98]:



Prve dvije reakcije predstavljaju stvaranje NO-a pri siromašnoj smjesi, dok zadnja reakcija opisuje stvaranje NO-a pri bogatoj smjesi. U lokalnim uvjetima izgaranja kod dizelskog motora prva reakcija predstavlja brzinu reakcije jer je potreba jako visoka temperatura za aktivaciju trostruke veze u molekuli dušika. Iz tog razloga uslijedio je i naziv 'termički dušikov monoksid'. Glavni uvjeti tvorbe termičkog NO-a za vrijeme izgaranja su: lokalne temperature u prostoru izgaranja, lokalni pretičak zraka, tlak izgaranja i vrijeme zadržavanja djelića mase [99].

Dušikovi oksidi također mogu i uzrokovati stvaranje ozona (O₃), na način da se nestabilni NO pretvori u NO₂ koji se zatim fotokemijski (uz prisustvo sunčeve svjetlosti) razdvaja u NO i radikal kisika (O).



Molekula kisika se spaja s radikalom kisika te tvori ozon (O_3), dok je M inertna molekula i može biti bilo koja.



Izražene emisije NOx-a mogu predstavljati izvor onečišćenja zraka posebice u područjima gdje je prisutna velika koncentracija ispušnih plinova poput razvijenih pomorskih luka s prometnom infrastrukturom. Štetni utjecaj na okoliš imaju zbog mogućnosti stvaranja kiselih kiša, acidifikacije mora, negativnog djelovanja na vegetaciju te zbog stvaranja prizemnog ozona uz prisustvo sunčeve svjetlosti. U pogledu ljudskog zdravlja NOx emisije štetne su jer mogu prouzrokovati razne kardiovaskularne bolesti, pogoršanje kroničnih respiratornih bolesti i štetno djelovati na funkcije pluća.

S ciljem ograničenja i smanjenja NOx emisija iz brodskih postrojenja IMO je u sklopu MARPOL konvencije Priloga VI u Rezoluciji MEPC.177(58) [100] 2008. god. izradio Tehnički kodeks za nadzor ispuštanja NOx emisija iz brodskih dizelskih motora. Ograničenja su prikazana u tablici 2, a određena su u ovisnosti o maksimalnoj operativnoj brzini motora (n =broj okretaja u minuti). Kategorizirana su Razredima (engl.'Tier') od I do III, gdje prva dva Razreda predstavljaju ograničenje na globalnoj razini dok se Razred III odnosi samo za posebna područja plovidbe u kojima je ograničen udio NOx-a u ispušnim plinovima. U slučaju motora koji su ugrađeni prije 2000. god. primjenjuju se ograničenja iz Razreda I, ali isključivo za motore ugrađene između 1. siječnja 1990. i 31. prosinca 1990. god. s izlaznom snagom ≥ 5000 kW te volumenu po cilindru ≥ 90 l [101].

Tablica 2. MARPOL Prilog VI - Ograničenje NOx sadržaja u ispušnim plinovima [101]

| Razred | Godina | NOx ograničenja, g/kWh | | |
|------------|--------|------------------------|----------------------|---------------|
| | | $n < 130$ | $130 \leq n < 2000$ | $n \geq 2000$ |
| Razred I | 2000 | 17,0 | $45 \cdot n^{-0.2}$ | 9,8 |
| Razred II | 2011 | 14,4 | $44 \cdot n^{-0.23}$ | 7,7 |
| Razred III | 2016 | 3,4 | $9 \cdot n^{-0.2}$ | 2,0 |

Razred III predstavlja NOx ograničenja za brodske dizelske motore, ugrađene na brodove 1. siječnja 2016. god. ili kasnije, koji plove u posebno zaštićenim područjima ECA (engl.'Emission Control Area').

Brodovi (godina izgradnje) koji moraju udovoljavati ograničenju Razreda III:

- 1.siječnja 2016. god. i kasnije koji plove u sjevernoameričkom području ili u području američkih Kariba
- 1.siječnja 2021.god. i kasnije koji plove u području Baltičkog ili Sjevernog mora.

Brodski motori koji podliježu NO_x Tehničkom kodeksu moraju posjedovati i EIAPP 'Međunarodnu svjedodžbu za motor o sprječavanju onečišćenja zraka' (engl.' Engine International Air Pollution Prevention Certificate – EIAPP Certificate'). Kako bi se zadovoljili propisi NO_x Razreda postoje razne metode za smanjenje sadržaja NO_x-a u ispušnim plinovima. U preglednom radu [102] Deng J. i dr. analiziraju metode za smanjenje NO_x-a za pojedine Razrede. Metode se mogu podijeliti u tri aspekta kao što su optimizacija sastava goriva, optimizacija sustava izgaranja i metode obrade ispušnih plinova. U prvu skupinu spadaju metode poput emulzifikacije goriva i dodavanja raznih aditiva gorivu kako bi se smanjila temperatura izgaranja u cilindru, a s tim ujedno i NO_x emisije. Ove metode ne mogu značajno smanjiti NO_x emisije te nisu preporučljive za dugoročnu upotrebu. Od preostale dvije skupine najznačajnije metode mogu zadovoljiti standarde II i III NO_x Razreda:

- optimizacija rada motora: direktno ubrizgavanje vode u komoru izgaranja, upotreba dvostupanjskog turbo-puhala, Millerov ciklus (podešavanje otvaranja/zatvaranja usisnog ventila)
- recirkulacija ispušnih plinova (EGR – engl.'Exhaust Gas Recirculation'): ova metoda koristi tehniku tretmana ispušnih plinova tako da se određen postotak ispušnih plinova pomiješa sa svježim zrakom i na taj način se smanji koncentracija reaktanata (kisika) pri tvorbi NO_x. Pozitivan efekt EGR metoda ima i na povećanje specifičnog toplinskog kapaciteta te smanjenje potrošnje ulja za podmazivanje. Ispušni plinovi se dodatno ohlađuju te snižavaju maksimalne temperature u cilindru što posljedično uzrokuje i smanjenje NO_x emisija. S ovom metodom može se smanjiti i do 40% NO_x emisija, ali također uzrokuje i povećanje specifične potrošnje goriva te negativno utječe na stvaranje čađe zbog smanjena procesa oksidacije
- selektivna katalitička redukcija (SCR – engl. 'Selectiv Catalytic Reduction'): smatra se da je najučinkovitija metoda za smanjenje NO_x emisija i postizanje Razreda III. Emisije NO_x-a se smanjuju jer se selektivno dodaje amonijak (NH₃) i onemogućavaju reakciju tvorbe NO-a. Zbog učinkovitog smanjenja NO_x emisija, SCR metoda je priznata od

strane IMO-a te je u sklopu Rezolucije MEPC.198(62) [103] izdan vodič i propisani zahtjevi pri upotrebi SCR sustava.

Glavni nedostaci SCR-a koji se pojavljuju su financijski trošak ugradnje sustava i nemogućnost učinkovite redukcije NOx emisija pri niskim opterećenjima motora jer se ne ostvaruju potrebne visoke temperature ispušnih plinova.

2.2.4. Emisije sumporovih oksida

Emisije sumporovih oksida (SOx) prvenstveno ovise o udjelu sumpora u gorivu. Prilikom izgaranja goriva s određenim udjelom sumpora nastaju SOx emisije koje sačinjavaju spojevi poput sumporovog dioksida (SO₂), sumporovog monoksida (SO) i sumporovog trioksida (SO₃). U brodskim motorima pri izgaranju bogate smjese goriva i zraka dolazi do stvaranja SO₂ jer radikal SO pri visokim temperaturama reagira s kisikom i prelazi u SO₂ (jednadžba 8). Smatra se da SO₂ ima značajan doprinos u stvaranju kiselih kiša te u aspektu ljudskog zdravlja pri udisanju uzrokuju mnoge respiratorne poteškoće:



Kod izgaranja goriva s visokim udjelom sumpora može doći do stvaranje sumporne kiseline (H₂SO₄) koja stvara koroziju na svim dijelovima stapnog mehanizma te ostalim dijelovima koji su izloženi produktima izgaranja:

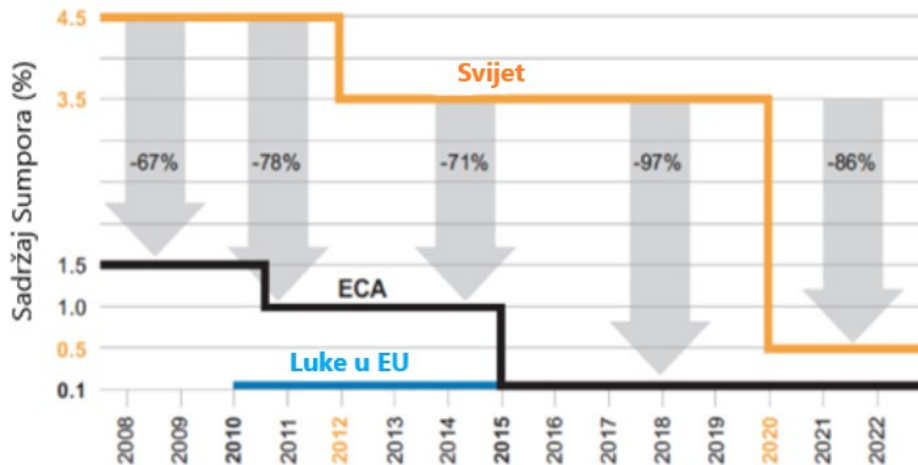


Prepoznati problemi SOx emisija doveli su do razvoja strategija (tehnoloških i zakonskih) za smanjenje istih, koje se prvobitno baziraju na smanjenju udjela sumpora u gorivu. Smanjenje SOx emisija postiže se na sljedeće načine:

- zakonskim ograničenjem udjela sumpora u gorivu
- pročišćavanjem ispušnih plinova (engl.'scrubbing')
- upotrebom nisko sumporovih goriva ili alternativnih goriva (LNG, metanol).

Na slici 8 prikazano je kronološko uvođenje zakonskih propisa o maksimalnom dopuštenom sadržaju sumpora u gorivu. Prvo smanjenje ograničenja sumpora u gorivu na globalnoj razini stupilo je na snagu 01. siječnja 2012. god. i iznosilo je 3,5%. Sljedeće globalno ograničenje sumpora (trenutno na snazi) iznosi 0,5% i primjenjuje se od 01. siječnja 2020. godine.

Ograničenje sumpora primijenjeno je i na ECA područja plovidbe tzv. SECA zone (engl. 'Sulphur Emission Control Area') i 2010. god. iznosilo je 1%, dok od 2015.godine do danas iznosi 0.1%. Alternativne metode poput pročišćavanja ispušnih plinova također se i dalje mogu koristiti ako ne prelaze ispuštanje SOx emisija od 6 g/kWh.



Slika 8. IMO kronološko uvođenje propisa za sadržaj sumpora u gorivu [104]

Osim SECA-a područja plovidbe, ograničenje sumpora u gorivu propisano je raznim regulativnima i odredbama na regionalnoj razini za određena teritorijalna mora i luke. S novim propisima o dopuštenom sadržaju sumpora u gorivu, brodari i posada broda moraju biti upoznati pri ulasku u određeno područje ili luku jer u protivnom Državne članice određuju sankcije za kršenje nacionalnih odredbi i propisa. Direktiva EU 2016/802 [105] Europskog parlamenta stupila je na snagu 11. svibnja 2016. god. te propisuje ograničenje sumpora u brodskom gorivu na maksimalno 0,1% mase za sve brodove na vezu u lukama Europske Unije. Ovaj stavak se ne primjenjuje jedino u slučaju kad brod ostaje u luci manje od dva sata i ako za vrijeme boravka u luci koristi električnu energiju s kopna. Također je propisano da pri plovidbi u teritorijalnim morima, isključivim gospodarskim pojasevima i zonama kontrole onečišćenja država Unije, sadržaj sumpora u brodskom gorivu ne prelazi 0,5% mase. Cilj ove Direktive je ograničiti udio sumpora u brodskim gorivima i na taj način spriječiti onečišćenje atmosfere sumporovim dioksidom posebice na osjetljive ekosustave i priobalna područja uz pomorske luke. Inicijativom EU članica, IMO je proglasio Mediteransko more SECA zonom, te je određeno stupanje na snagu od 01. siječnja 2025. godine [106].

Turska nije članica Europske Unije ali je donijela svoju zakonsku regulativu (01. siječnja 2012.) u kojoj ograničava sadržaj sumpora na 0,1% mase za sve brodove koji uplovljavaju u teritorijalne vode i koji se nalaze na vezu u lukama države [107]. Regulativa se jedino ne odnosi na brodove u tranzitu u tjesnacima Bospor i Dardaneli u Mramornom moru, osim ako se ne zadržavaju na vezu dulje od dva sata.

Sličan primjer je primijenila i Kina 2015. godine, gdje su propisali posebnu zaštićenu zonu s kontrolom udjela sumpora u gorivu na maksimalno 0,50% mase u svojim teritorijalnim vodama, dok brodovi koje plove rijekama Jangce i Xi Jiang (Zapadna rijeka), ne smiju imati više od 0.1% sumpora u gorivu. Južna Koreja također donosi propise za kontrolu emisija SO_x-a (max. 0.1% sumpora) od 01.09.2020. god. za svoje najveće pomorske luke te od 01. siječnja 2022. god. je primjenjivo za sve brodove koji plove u zoni kontrole sumpora u gorivo [108].

Ograničenje udjela sumpora u gorivu na maksimalno 0,1% mase primijenjeno je i za luku Sydney (White Bay terminal za putničke brodove) od strane pomorske uprave AMSA (engl. 'Australian Maritime Safety Authority'). Obala Kalifornije već spada u Područje kontrole emisije sumpora propisano od strane IMO-a, ali lokalne vlasti idu i korak dalje te ne dopuštaju korištenje pročišćava ispušnih plinova kako bi se zadovoljila propisana količina SO_x emisija [109].

2.2.5. Emisije krutih čestica

Krute čestice nazivaju se i lebdećim partikularnim česticama jer su vrlo sitne i oku nevidljive koje nastaju procesom izgaranja, a sačinjavaju ih neizgoreni organski i anorganski spojevi. Najčešće u svome sastavu sadrže nitrata, sulfata, amonijak, metalne okside i vodu, a mogu biti u raznim oblicima od čađe, dima, pepela ili prašine. Kategoriziraju se po veličine čestice odnosno njihovom promjeru izraženom u mikrometrima (μm):

- PM 1,0 – najfinije čestice od 0,1 do 0,3 μm
- PM 2,5 – fine čestice od 2,5 μm
- PM 10 – grube čestice od 2,5 do 10 μm .

Vremenski period zadržavanja u zraku također ovisi o veličini čestica. Fine čestice mogu se zadržati duže vrijeme u zraku i prijeći veću udaljenost, što znači da se s povećanjem promjera čestice smanjuje vrijeme zadržavanja.

Smatra se da PM emisije iz brodskih postrojenja nemaju velik udio (~1%) od ukupne globalne emisije, ali je prepoznata opasnost na lokalnoj razini posebice u području razvijenih luka zbog štetnog utjecaja na ljudsko zdravlje. Udisanje finih čestica može uzrokovati kroničnu upalu pluća, pogoršanje postojećih kroničnih bolesti (astma, bronhitis), izazvati srčane i kardiovaskularne probleme, dok dugotrajnim izlaganjem povećavaju šanse od prerane smrti. Štetne posljedice uzrokuju jer sadržavaju kancerogene policikličke aromatske ugljikovodike (PAH – engl.'Polycyclic Aromatic Hydrocarbons').

Mjerenja PM emisija iz brodskih postrojenja uglavnom se provode za vrijeme boravka broda u luci kako bi se procijenila emitirana koncentracija i smjer raspršivanja. Udio PM čestica u ispušnim plinovima ovisi ponajviše o kvaliteti goriva, s toga strategije za smanjenje PM emisija uključuju [110]:

- smanjenje potrošnje goriva
- optimizaciju rada motora kako bi se izbjeglo stvaranje čađe
- korištenje 'čišćih' goriva.

Za mjerenje koncentracija PM čestica potrebna je posebna mjerna oprema poput uređaja 'Dust Trak II Aerosol Monitor' ili DMS 500 MKII, uz pomoć kojih se mjere čestice različitih promjera. U ovome istraživanju neće se mjeriti PM emisije zbog različitog mjernog uređaja i sva mjerenja su provedena isključivo za vrijeme eksploatacije broda.

2.2.6. Emisije hlapljivih organskih spojeva

Emisije VOC-a ovisno o izvoru dospijevanja u atmosferu dijele se na biogene (živi organizmi, drveća) i antropogene (industrijska proizvodnja, izgaranje goriva). Definiraju se kao organski spojevi čija je temperatura vrelišta niža ili jednaka 250 °C, uz standardni tlak od 101,3 kPa [111]. Sastoje se od mješavine ugljikovodika (metan, propan) i drugih plinova koji nastaju izgaranjem ili isparavanjem naftnih derivata. Mogu se podijeliti ovisno i o procesu hlapljenja odnosno temperaturi vrelišta, na vrlo hlapljive i slabo hlapljive organske spojeve. Ispuštanje VOC emisija štetno djeluje na atmosferu jer utječe na stvaranje troposfernog ozona, koji ima utjecaj na nastajanje fotokemijskog smoga koji negativno utječe na vegetaciju i ljudsko zdravlje.

Osim u ispušnim plinovima VOC spojevi mogu dospjeti u atmosferu za vrijeme ukrcaja/iskrcaja tereta na tankerima za sirovu naftu, te se mogu nalaziti u mješavini s inertnim plinom kojeg se ispušta u atmosferu nakon procesa inertiranja tankova. U članku [112] analizirano je emitiranje VOC spojeva za vrijeme remonta dok je brod na suhom vezu, prilikom akcija struganja i bojanja oplata broda.

Zbog prevencije i regulacije VOC emisija s brodova, IMO je izdao Vodič za izradu plana upravljanja VOC emisijama u sklopu MEPC.185(59) Rezolucije [113]. Svrha plana upravljanja je da se minimaliziraju VOC emisije kroz optimizaciju operativnih procedura (prijevoz i ukrcaj/iskrcaj tereta koji ispuštaju VOC spojeve) i upotrebom opreme za smanjenje istih emisija.

Mjere smanjenja VOC emisija:

- apsorpcija – ispiranje plinova koji sadrže koncentracije VOC-a, a zasniva se na korištenju otapala uz pomoć kojeg hlapljivi spojevi koji su topljivi u vodi prelaze u tekuće stanje
- toplinska oksidacija – proces oksidacije hlapljivih plinova postiže se podizanjem temperature iznad točke samozapaljenja uz prisustvo kisika (temperatura oksidacije VOC spojeva između 705°C i 980°C)
- katalitička oksidacija – sličan princip kao i toplinska oksidacija, kod kojeg je uključen i katalizator kroz koji struje plinovi s čime se postiže oksidacija VOC spojeva pri nižim temperaturama
- kontrola tlaka u cjevovodima – kontroliranje i smanjenje porasta tlaka u cjevovodima prilikom transfera tereta (sirova nafta), kako bi se izbjeglo stvaranje VOC spojeva.

3. METODE PROCJENE EMISIJA ISPUŠNIH PLINOVA S BRODSKIH POSTROJENJA

Izrada inventara emisija za određeno područje plovidbe i kvantifikacija emisija iz brodskog energetskog postrojenja prvenstveno ovisi o metodi izračuna, odnosno pristupu procjene ukupne količine emisija. Zbog raznovrsnosti brodskih postrojenja i ruta plovidbe, procjene emisija s različitim metodama mogu dovesti od odstupanja u konačnim rezultatima. Čimbenici koji utječu na pouzdanost rezultata su: vrsta korištenog goriva (emisijski faktori zavise o vrsti goriva), karakteristike pogonskih i pomoćnih motora (snaga i tip motora, trenutno opterećenje motora, godina proizvodnje, tehničko stanje motora), vrijeme i duljina plovidbe, te uvjeti plovidbe (vjetar, valovi, itd.). Izbor metode procjene najčešće ovisi o dostupnim podacima koji se mogu prikupiti iz prethodno utvrđenih statističkih baza podataka ili provedenim istraživanjem koje uključuje prikupljanje stvarnih podataka za vrijeme plovidbe broda. Raspoloživost i pouzdanost podataka posebice je važno pri izradi inventara emisija za referentno područje.

Dvije prethodno spomenute metode procjene emisija ('top-down' i 'bottom-up') analizirat će se u ovome poglavlju s naglaskom na procijenjene emisijske faktore pojedinih onečišćujućih plinova. U daljnjem tekstu rada često se spominje pojam 'emisijski faktor' koji predstavlja koeficijent koji opisuje stopu kojom određena aktivnost ispušta štetne tvari u atmosferu.

U Uredbi 2015/757 Europskog parlamenta i Vijeća [83], emisijski faktor je definiran kao:

„prosječni stupanj emisije stakleničkog plina u odnosu na podatke o djelatnosti toka izvora, pod pretpostavkom potpune oksidacije pri izgaranju i potpune konverzije pri svim ostalim kemijskim reakcijama“

Vlada RH u Uredbi o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih postrojenja [114], definira emisijski faktor:

„broj koji označava masu emitirane onečišćujuće tvari po jedinici djelatnosti (iskazane količinom proizvoda, količinom potrošenog energenta ili sirovine, ili veličinom obavljenog posla)“

Validni i reprezentativni emisijski faktori su ključni element pri izradi inventara emisija. U ovisnosti o korištenoj metodi procjene emisija, emisijski faktori se prikazuju na dva načina:

- zasnovan o utrošku goriva – prikazuje se kao omjer mase (t) nastalih štetnih plinova i količine utrošenog goriva ($t_{\text{plina}}/t_{\text{goriva}}$)
- energetski zasnovan – prikazuje se kao omjer mase (g) nastalih štetnih plinova po jedinici snage instalirane snage motora (g/kWh).

3.1. 'Top-down' metoda procjene emisija

Metoda odozgo-prema dolje tzv. 'top-down' metoda, zasnovana je na podacima o količini utrošenog goriva i odgovarajućeg emisijskog faktora za korišteno gorivo. Procjena ove metode prvenstveno ovisi o statističkim podacima o prodanom gorivu koji često imaju upitnu pouzdanost. Ovaj problem posebice dolazi do izražaja prilikom procjene emisija na globalnoj razini ili kod područja s visokom frekvencijom pomorskog prometa. Nepouzdanost podataka se očituje u vrijednostima prodanog ('bunker') goriva na međunarodnoj razini gdje ukupna prodana količina goriva odstupa od stvarno utrošene. Nadalje, ova metoda ne uzima u obzir aktivnosti broda, s toga procjenu emisija za određeno područje plovidbe je vrlo teško prikazati jer kretanje brodova nije vidljivo. Još jedan nedostatak 'top-down' metode je nemogućnost definiranja izvora emisija (glavni motori, pomoćni motori, generatori pare), budući da se računaju samo ukupne emisije na temelju potrošnje.

U slučaju kad su dostupni podaci o potrošnji goriva, ukupne emisije ispušnih plinova računaju se kao [115] :

$$E_{i,j,m} = FC_{j,m} \cdot EF_{i,j,m} \quad (10)$$

gdje je:

E = ukupne emisije (tone)

FC = potrošnja goriva (tone/h)

EF = emisijski faktor (tona onečišćivača/toni goriva)

i = onečišćivač

j = tip motora (sporookretni, srednjeokretni, brzookretni)

m = vrsta goriva.

U tablici 3 prikazani su emisijski faktori (EF) za CO₂ po jednoj toni goriva, koji su propisani IMO Rezolucijom MEPC.245(66) [116]. Vidljivo je da emisijski faktori zavise o udjelu ugljika u gorivu, a propisani su u skladu ISO 8217 specifikacijama za brodska goriva.

Tablica 3. Emisijski faktori u ovisnosti o vrsti goriva

| Vrsta goriva* | Udio ugljika | EF (tCO ₂ /t) |
|----------------------------|--------------|--------------------------|
| HFO (u skladu s: ISO 8217) | 0,8493 | 3,114 |
| MDO (u skladu s: ISO 8217) | 0,8744 | 3,206 |
| MGO (u skladu s: ISO 8217) | 0,8594 | 3,151 |
| LNG | 0,7500 | 2,750 |
| LPG | Propan | 0,8182 |
| | Butan | 0,8264 |
| Metanol | 0,3750 | 1,375 |
| Etanol | 0,5217 | 1,913 |

* HFO – brodsko teško (ostatno) gorivo, MDO – brodsko dizelsko (destilirano) gorivo, MGO – brodsko plinsko gorivo, LNG – ukapljeni prirodni plin, LPG – ukapljeni naftni plin

Potrošnja goriva predstavlja važnu varijablu u jednadžbi izračuna ukupnih emisija te u slučaju nedostupnih podataka može se izračunati približna vrijednost. Jednadžba izračuna potrošnje goriva po satu [2]:

$$FC_i = SFC_i \cdot W_i \quad (11)$$

gdje je:

SFC_i = specifična potrošnja goriva [g/kWh]

W_i = trenutna snaga motora u ovisnosti o opterećenju rada [kW].

Kako bi se izračunala potrošnja goriva potrebno je odrediti i specifičnu potrošnju goriva (SFC) koja zavisi o trenutnom opterećenju motora. SFC ima paraboličnu interpolaciju u funkciji opterećenja motora jer pri niskim opterećenjima ima najveću vrijednost, dok optimalnu (minimalnu) vrijednost ima pri 75-80% MCR te nakon toga se ponovno povećava.

Jednadžba SFC [g/kWh] za glavni motor [2]:

$$SFC_{ME,i} = SFC_{base} \cdot (0,455 \cdot MCR_i^2 - 0,710 \cdot MCR_i + 1,280) \quad (12)$$

gdje je:

SFC_{base} [g/kWh] = minimalna SFC-a koja se uzima kao referenta vrijednost pri izračunu, a predstavlja najučinkovitiju točku potrošnje goriva. Ovisi o vrsti motora, godini proizvodnje i vrsti goriva

MCR_i = prosječno opterećenje glavnog motora (od 0 do 1). Dio jednadžbe u zagradama predstavlja korekcijski faktor za opterećenje motora.

Prilikom izračuna MCR-a uzimaju se procijenjena opterećenja od otprilike 80%, jer se smatra da je tada SFC-a optimalna. Ovaj pristup može dovesti do dodatnih odstupanja prilikom izračuna emisija jer opterećenje ovisi o režimu plovidbe, dok kod novih elektronski upravljanih motora optimalno opterećenje i potrošnja goriva mogu se podesiti u širem području rada motora.

Zbog svih navedenih nedostataka 'top-down' metoda se rijetko koristi prilikom izrade inventara emisija. Najznačajnija primjena ove metode je prethodno spomenuta MRV procedura o praćenju, izvješćivanju i verifikaciji CO₂ emisija na razini Europske Unije. U izračunu CO₂ emisija primjenjuje se standardna jednadžba gdje se ukupna potrošnja goriva pomnoži s zadanim emisijskim faktorom. Vrijednosti emisijskih faktora temelje se na podacima Međuvladina tijela za klimatske promjene (IPCC), koji se nalaze u Prilogu VI. Uredbe Komisije (EU) br. 601/2012 [117].

Stvarna potrošnja goriva može se odrediti koristeći jednu od sljedećih metoda [118]:

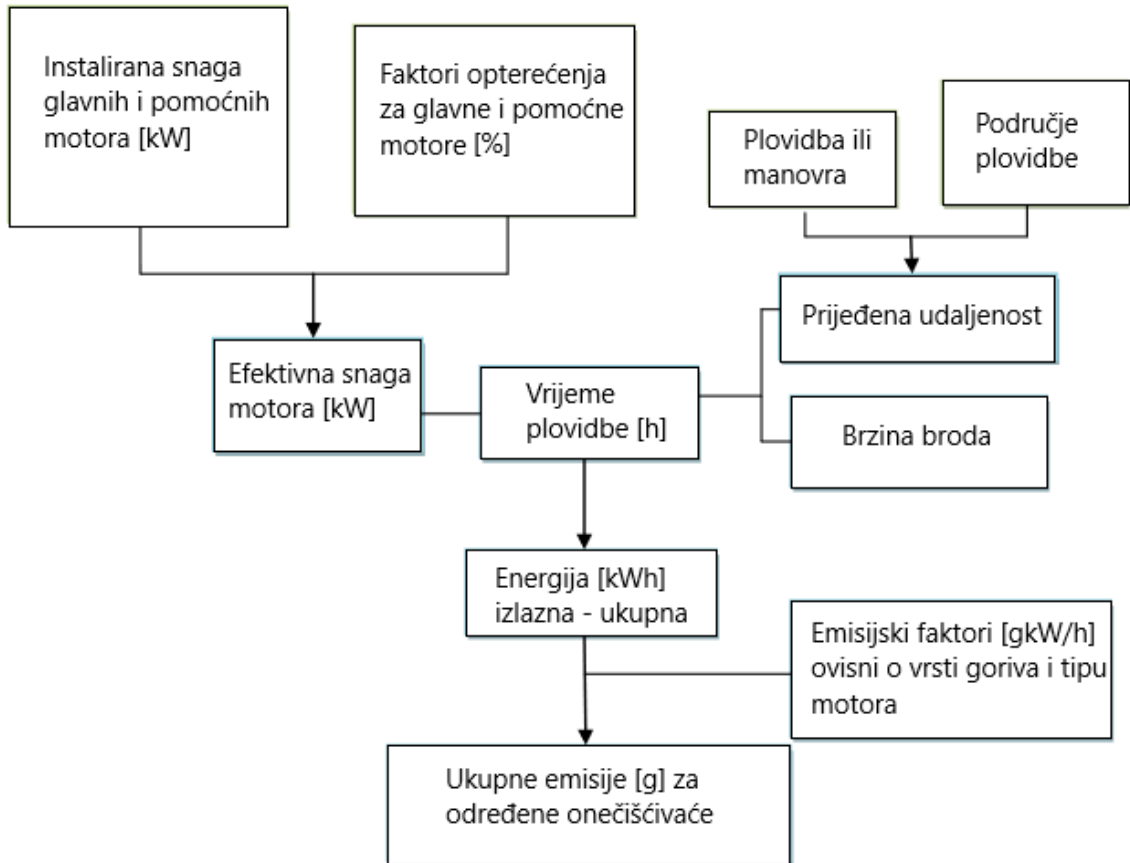
- uz pomoć otpremnice spremišta za gorivo (BDN- engl. 'Bunker Delivery Note'). Metoda se temelji na očitavanju spremnika goriva, gdje se mjeri količina goriva na početku putovanja (definirano u BDN-u) koja je umanjena za količinu na kraju putovanja
- praćenjem spremnika goriva na brodu – temelji se na očitavanju spremnika goriva dok je brod u plovidbi i svaki put kad se puni ili ispušta gorivo. Potrošnju goriva čini razlika razine goriva između dva očitavanja, koja se provode metodom sondiranja tanka ili preko automatskih sustava očitavanja razine

- mjerenjem protoka goriva za procese izgaranja – uzimaju se podaci iz svih mjerača protoka koji su spojeni na izvore CO₂ emisija, zatim se objedinjuju zbog utvrđivanja ukupne potrošnje goriva
- mjerenjem izravnih CO₂ emisija – potrošnja goriva se dobije uz izmjereni protok CO₂ emisija u ispušnom kolektoru i primjenom odgovarajućeg emisijskog faktora. Protok CO₂ emisija se izračuna množenjem koncentracije CO₂ s protokom ispušnih plinova.

Iz predloženih metoda očitavanja utroška goriva može se zaključiti da na pouzdanost 'top-down' metode utječe i točnost određivanja količine utrošenog goriva. Ako se koriste mjerači protoka ili izravno mjerenje protoka CO₂ emisija, može doći do odstupanja u mjerenjima ako senzori mjerača nisu kalibrirani u skladu s adekvatnim standardima. Nadalje, ako je izmjerena količina izražena u litrama potrebno je pretvoriti u masu, gdje se uzima u obzir stvarna gustoća goriva koja je upisana u BDN od opskrbljivača goriva prilikom punjenja goriva. U slučaju kad su podaci o gustoći nedostupni, upotrebljava se standardni faktor gustoće za pojedinu vrstu goriva što može rezultirati netočnom pretvorbom mjerne jedinice. Ukoliko se zanemare svi navedeni nedostaci 'top-down' metode, ukupne procjene emisija ovisit će o vrijednostima emisijskih faktora koji u ovom slučaju ne uzimaju u obzir trenutne aktivnosti broda (plovidba, manevriranje, boravak u luci).

3.2. 'Bottom-up' metoda procjene emisija

Zbog nepouzdanih procjena emisija i spomenutih nedostataka 'top-down' metode, počela se primjenjivati tzv. 'bottom-up' ('odozdo-prema gore') metoda. Ova metoda se često u engleskoj literaturi naziva 'activity-based method' jer se proračun emisija zasniva na aktivnostima broda. Pod pojmom aktivnosti broda smatra se svako kretanje broda na moru (plovidba ili manevriranje u luci) te boravak broda u luci. Pošto sve aktivnosti broda ulaze u izračun ukupnih emisija, ova metoda se uglavnom koristi pri izradi nacionalnih inventara (skladišta) emisija za određeno referentno područje plovidbe ili luku. Inicijalni pristup ove metodologije ovisi prvenstveno o informacijama (parametrima) prikupljenim za specifičan brod u određenom trenutku/poziciji. Pregled korištenih metoda procjena emisija za određenu luku ili regionalno područje, istraženo je u radu [119], gdje je ustanovljeno da od 32 pristupa procjena ukupnih emisija njih 30 je koristilo 'bottom-up' metodu.



Slika 9. Metodologija 'bottom-up' procjene emisija

Na slici 9 prikazana je metodologija 'bottom-up' pristupa, koja ovisi o više međusobno zavisnih faktora koji u konačnici utječu na ukupnu procjenu emisija. Parametre potrebne za izračun emisija se može podijeliti na varijabilne, koji ovise o režimu plovidbe, te statičke koji su nezavisni. U statičke parametre spadaju tehnički podaci postrojenja poput instalirane snage glavnih i pomoćnih motora, tip motora i vrsta korištenog goriva. Varijabilni parametri nisu konstantne vrijednosti već zavise o nekoliko međusobno povezanih faktora. Glavni faktori koji utječu na sve varijabilne parametre su vrsta aktivnosti i vrijeme provedeno u određenoj aktivnosti broda (plovidba, manevriranje ili boravak u luci). Na vrijeme plovidbe utjecat će ukupna prijeđena udaljenost te brzina broda. Faktori opterećenja glavnih i pomoćnih motora su varijabilni parametri koji ovise o režimu plovidbe i trenutnoj brzini broda, s pretpostavkom da su poznate tehničke specifikacije motora. Emisijski faktori predstavljaju najsloženiju varijablu za procjenu jer ovise o statičkim i varijabilnim parametrima. Na procjenu vrijednosti emisijskih faktora utjecat će vrsta goriva (različita goriva imaju različite kemijske sastave), vrsta pogona (dizelski motori, plinska turbina, parna turbina), tip motora (dvotaktni ili četverotaktni), kategorija motora (pomoćni ili glavni) i trenutna aktivnost broda (plovidba, manevriranje, boravak u luci).

Primjenjujući 'bottom-up' pristup u svrhu izrade inventara emisija, potrebno je izračunati ukupne emisije koje se dobiju kao zbroj svih aktivnosti broda na jednom putovanju (jednadžba 13):

$$E_{ukupno} = E_{plovdba} + E_{manovra} + E_{u luci} \quad (13)$$

Izračun emisija za pojedinu aktivnost broda, uz uvjet da su poznati tehnički podaci o postrojenju broda, mogu se prikazati preko sljedeće jednadžbe:

$$E_{i,j,m} = \sum_p \left[\sum_e (P_e \cdot LF_e \cdot EF_{e,i,j,m,p}) \right] \quad (14)$$

gdje je:

E = količina emisija [g]

P = snaga motora [kW]

LF = trenutno opterećenje motora [%]

EF = emisijski faktor [g/kWh]

i = onečišćivač

e = kategorija motora (glavni ili pomoćni)

p = aktivnost broda (plovdba, manevriranje, boravak u luci)

j = tip motora (sporookretni, srednjeokretni, brzookretni dizelski motor, parna ili plinska turbina)

m = vrsta korištenog goriva.

Ako se u prethodnu jednadžbu uvrsti pojedinačan izračun emisija za glavne i pomoćne motore te vrijeme provedeno u pojedinačnoj aktivnosti broda, dobije se izračun ukupnih emisija za jedno putovanje:

$$E = T \cdot (P_{ME} \cdot LF_{ME} \cdot EF_{ME} + P_{AE} \cdot LF_{AE} \cdot EF_{AE}) [g] \quad (15)$$

U jednadžbi 15, T predstavlja vrijeme broda provedeno u plovidbi, manevriranju ili prilikom boravka u luci. Ukoliko su podaci o vremenu plovidbe nepoznati, prosječno vrijeme se može izračunati prema jednadžbi 16 :

$$T(\text{sati}) = \frac{\text{Prijeđena udaljenost (km)}}{\text{Prosječna brzina broda } \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)} \quad (16)$$

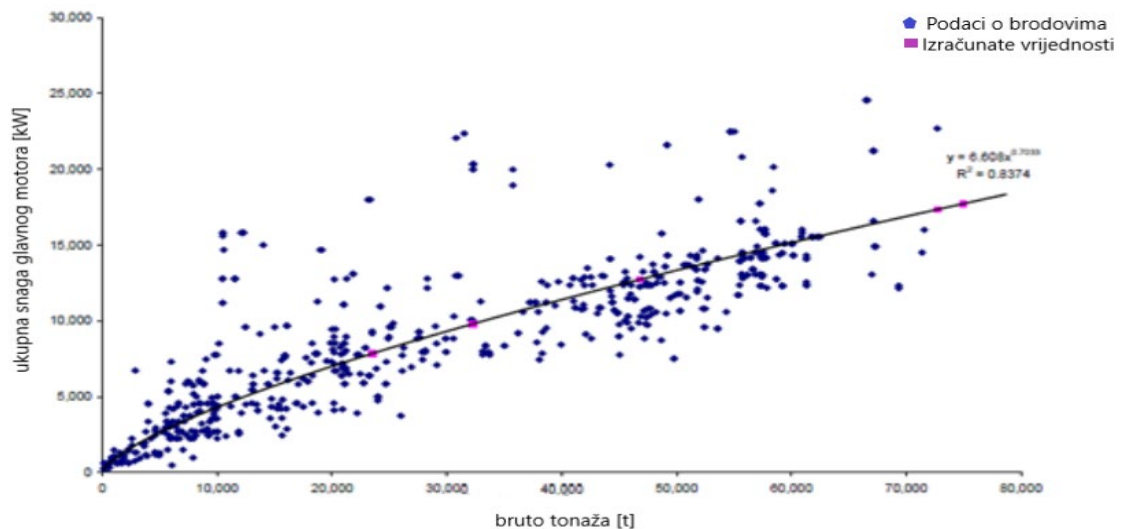
Neovisno o korištenoj metodi procjene ispušnih emisija, za pouzdane rezultate izračuna potrebno je uzimati mjerodavne i vjerodostojne ulazne varijable. Procjena emisijskih faktora kao ulazne varijable, ovisit će o dosta operativnih parametara što u konačnici može dovesti do nepouzdanih procjena. U sljedećim potpoglavljima prikazani su procijenjeni emisijski faktori iz najrelevantnijih studija emisija ispušnih plinova s brodova.

3.3. Entec studija procjene emisijskih faktora

Prva Entec studija u sklopu projekta Europske Komisije objavljena je 2002. godine, dok je 2007. godine na zahtjev Europskog udruženja naftnih kompanija za zaštitu okoliša – CONCAWE (engl. 'Conservation of Clean Air and Water in Europe') objavljena druga studija skladišta emisija za Mediteransko more. Zadnje izvješće Entec studije [1] iz 2010. godine obuhvaća kvantifikaciju emisija ispušnih plinova s brodova za područje Velike Britanije koje uključuje 200 Nm od obale, Engleski kanal, Sjeverno more, Irsko more i dio sjeverno-istočnog Atlantika. Studija je izrađena u svrhu izrade inventara emisija za spomenuto područje, gdje su rezultati poslužili kao osnova za donošenje odluka vezanih za smanjenje emisija iz pomorskog prometa. Glavni izvori o kretanju brodova su iz Lloyd's Registra (ogranak 'Lloyd's List Intelligence') koji obuhvaća sve trgovačke brodove iznad 500GT u zadanome području plovidbe. Brodovi ispod 100GT poput jahti, ribarskih brodova, ratne mornarice i sl. nisu uzeti u obzir jer se smatra da imaju zanemarivi udio ispušnih emisija (1%) i vrlo promjenjive rute plovidbe. Kretanje brodova podijeljeno je u tri faze: plovidba (svako kretanje broda u području istraživanja bez pristajanja u luku), manevriranje i boravak broda u luci (vrijeme od dolaska broda do odlaska iz luke).

Za izračun emisija primijenjen je 'bottom-up' pristup koristeći jednadžbe 13 i 15, u koji su uključene emisije za SO₂, NO_x, CO₂, VOC i PM. Pri izradi inventara emisija uzima se u obzir ukupni godišnji pomorski promet koji uključuje opsežan broj brodova u tranzitu, stoga je nužno uzimati prosječne vrijednosti za određene varijable. Procijenjene varijable koje utječu na

određivanje emisijskih faktora su vrsta goriva, trenutno opterećenje glavnih i pomoćnih motora, tip i kategorija motora. Ova studija koristi baze podataka od Lloyd's Registra u kojima se procjenjuje zastupljenost dizelskih motora kao glavnih pogonski strojeva od 99%, od kojih su 58% četverotaktni i 41% dvotaktni. U slučaju kad podaci o instaliranoj snazi glavnih ili pomoćnih motora nisu dostupni, uzimaju se prosječne vrijednosti instaliranih snaga u ovisnosti o bruto tonaži za pojedinu kategoriju broda (slika 10). Za procjenu se najčešće koristi linearna regresija uz pomoć koje se računa zavisnost između dvije ili više varijabli.



Slika 10. Odnos instalirane snage glavnih motora (ME) i bruto tonaže (GT) u slučaju RO-RO brodova [1]

Opterećenje glavnih i pomoćnih motora ovisi o trenutnoj aktivnosti broda, te je u tablici 4 prikazana aproksimacija opterećenja za sve aktivnosti. Emisijski faktori zavise o trenutnom opterećenju motora jer s njegovim povećanjem dolazi i do eksponencijalnog porasta masenog protoka ispušnih plinova što će u konačnici utjecati i na koncentraciju pojedinih onečišćivača. Zbog ovog razloga bitno je istražiti sastav ispušnih plinova na različitim opterećenjima motora, posebice za opterećenja izvan optimalnih granica motora.

Tablica 4. Procijenjeno opterećenje (postotak maksimalne trajne snage MCR) za glavne i pomoćne motore u različitim aktivnostima [1]

| Aktivnost | % MCR-a za glavni motor | % vremena kad su glavni motori u pogonu | % MCR-a za pomoćne motore |
|-----------------|-------------------------|---|---------------------------|
| Plovidba | 80 | 100 | 30 |
| Manevriranje | 20 | 100 | 50 |
| Boravak u luci* | 20 | 0 | 40 |

* pretpostavka je da tankeri rade s 20% MCR-a za vrijeme boravka u luci zbog ukrcaja/iskrcaja tereta. U današnje vrijeme ova pretpostavka je upitna (posebice za brodove bez dizel-električne propulzije) jer su dovoljni pomoćni motori ili lučki priključci za snabdijevanje električne energije.

U sljedećim tablicama prikazani su emisijski faktori za glavne i pomoćne motore u ovisnosti o tipu motora, vrsti goriva te aktivnosti (plovidba, manevriranje, u luci) broda. Vrijednosti emisijskih faktora Entec studije su ažurirani zadnji put 2007. godine, te isti podaci su objavljeni i u zadnjoj verziji iz 2010. godine (tablica 5,6, i 7).

Tablica 5. Emisijski faktori (g/kWh) za glavni motor u plovidbi [1]

| Motor / gorivo* | NOx motori prije 2000. | NOx motori nakon 2000. | NOx prosječno za flotu | SO ₂ | CO ₂ | VOC | PM | Sfoc |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|------|
| SSD / MGO | 17,0 | 14,1 | 16,0 | 0,7 | 588 | 0,6 | 0,3 | 185 |
| SSD / MDO | 17,0 | 14,1 | 16,0 | 5,6 | 588 | 0,6 | 0,3 | 185 |
| SSD / RO | 18,1 | 15,0 | 17,0 | 10,5 | 620 | 0,6 | 1,7 | 195 |
| MSD / MGO | 13,2 | 11,0 | 12,4 | 0,8 | 645 | 0,5 | 0,3 | 203 |
| MSD / MDO | 13,2 | 11,0 | 12,4 | 6,2 | 645 | 0,5 | 0,4 | 203 |
| MSD / RO | 14,0 | 11,6 | 13,1 | 11,5 | 677 | 0,5 | 0,8 | 213 |
| HSD / MGO | 12,0 | 10,0 | 11,3 | 0,8 | 645 | 0,2 | 0,3 | 203 |
| HSD / MDO | 12,0 | 10,0 | 11,3 | 6,2 | 645 | 0,2 | 0,4 | 203 |
| HSD / RO | 12,7 | 10,5 | 11,9 | 11,5 | 677 | 0,2 | 0,8 | 213 |
| GT / MGO | 5,7 | 4,7 | 5,3 | 1,2 | 922 | 0,1 | 0,0 | 290 |
| GT / MDO | 5,7 | 4,7 | 5,3 | 8,7 | 922 | 0,1 | 0,0 | 290 |
| GT / RO | 6,1 | 5,1 | 5,7 | 16,5 | 970 | 0,1 | 0,1 | 305 |
| ST / MGO | 2,0 | 1,7 | 1,9 | 1,2 | 922 | 0,1 | 0,3 | 290 |
| ST / MDO | 2,0 | 1,7 | 1,9 | 8,7 | 922 | 0,1 | 0,4 | 290 |
| ST / RO | 2,1 | 1,7 | 2,0 | 16,5 | 970 | 0,1 | 0,8 | 305 |

*SSD – sporookretni dizelski motor; MSD – srednjeokretni dizelski motor; HSD – brzoekretni dizelski motor; GT – plinska turbina; ST – parna turbina; MGO – brodsko plinsko gorivo; MDO – brodsko dizelsko (destilirano) gorivo; RO – ostatno gorivo

Tablica 6. Emisijski faktori (g/kWh) za glavni motor u manevriranju i u luci [1]

| Motor / gorivo | NOx motori prije 2000. | NOx motori nakon 2000. | NOx prosječno za flotu | SO ₂ | CO ₂ | VOC | PM | Sfoc |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|------|
| SSD / MGO | 13,6 | 11,3 | 12,8 | 0,8 | 647 | 1,8 | 0,9 | 204 |
| SSD / MDO | 13,6 | 11,3 | 12,8 | 6,2 | 647 | 1,8 | 1,2 | 204 |
| SSD / RO | 14,5 | 12,0 | 13,6 | 11,6 | 682 | 1,8 | 2,4 | 215 |
| MSD / MGO | 10,6 | 8,8 | 9,9 | 0,9 | 710 | 1,5 | 0,9 | 223 |
| MSD / MDO | 10,6 | 8,8 | 9,9 | 6,8 | 710 | 1,5 | 1,2 | 223 |
| MSD / RO | 11,2 | 9,3 | 10,5 | 12,7 | 745 | 1,5 | 2,4 | 234 |
| HSD / MGO | 9,6 | 8,0 | 9,0 | 0,9 | 710 | 0,6 | 0,9 | 223 |
| HSD / MDO | 9,6 | 8,0 | 9,0 | 6,8 | 710 | 0,6 | 1,2 | 223 |
| HSD / RO | 10,2 | 8,5 | 9,6 | 12,7 | 745 | 0,6 | 2,4 | 234 |
| GT / MGO | 2,9 | 2,4 | 2,7 | 1,3 | 1014 | 0,5 | 0,5 | 319 |
| GT / MDO | 2,9 | 2,4 | 2,7 | 9,6 | 1014 | 0,5 | 0,7 | 319 |
| GT / RO | 3,1 | 2,6 | 2,9 | 18,1 | 1067 | 0,5 | 1,5 | 336 |
| ST / MGO | 1,6 | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 1014 | 0,3 | 0,9 | 319 |
| ST / MDO | 1,6 | 1,3 | 1,5 | 9,6 | 1014 | 0,3 | 1,2 | 319 |
| ST / RO | 1,7 | 1,4 | 1,6 | 18,1 | 1067 | 0,3 | 2,4 | 336 |

Tablica 7. Emisijski faktori (g/kWh) za pomoćne motor u plovidbi, manevriranju i u luci [1]

| Motor / gorivo | NOx motori prije 2000. | NOx motori nakon 2000. | NOx prosječno za flotu | SO ₂ | CO ₂ | VOC | PM | Sfoc |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|------|
| M/H SD / MGO | 13,9 | 11,5 | 13,0 | 0,9 | 690 | 0,4 | 0,3 | 217 |
| M/H SD / MDO | 13,9 | 11,5 | 13,0 | 6,5 | 690 | 0,4 | 0,4 | 217 |
| M/H SD / RO | 14,7 | 12,2 | 13,8 | 12,3 | 722 | 0,4 | 0,8 | 227 |

Procijenjeni emisijski faktori za NO_x, SO₂, CO₂, PM i VOC spojeve, u tablicama su podijeljeni u pet različitih kategorija motora, pri upotrebi tri vrste brodskih goriva. Dizelski motori s brojem okretaja koljenastog vratila između 60 i 300 o/min. klasificiraju se kao sporookretni, dok srednjeokretni imaju brzinu od 300 do 1000, a brzoekretni od 1000 do 3000 o/min. Za glavne motore smatra se da su pretežito sporookretni (SSD – engl.'slow speed diesel') ili srednjeokretni (MSD – engl.'medium speed diesel'), a za pomoćne motore da su brzoekretni (HSD – engl.'high speed diesel') ili srednjeokretni. Preostale dvije kategorije pogona su plinska (GT – engl.'gas turbine') i parna turbina (ST – engl.'steam turbine') koje nisu podijeljene po brzini okretaja. U zadnjoj Entec studiji ažurirani su emisijski faktori za NO_x spojeve u skladu s MARPOL Tehničkim kodeksom, gdje su vrijednosti emisijskih faktora podijeljeni za motore ugrađene na brodove prije i nakon 2000. godine te prosječne vrijednosti za cijelu flotu. Za motore ugrađene prije 2000. godine (~62%) pretpostavljeno je da su NO_x emisijski faktori ostali isti, dok za motore ugrađene nakon 2000. godine (~18%) vrijednosti emisijski faktora su umanjene za 17%. U slučaju preostalih 20 % brodova čija godina ugradnje motora nije bila poznata, određena je prosječna vrijednost emisijski faktora od ukupne flote brodova čiji su podaci o godini ugradnje bili poznati. Korištena baza podataka brodova za ovu studiju ne navodi tip motora za pomoćne motore, s toga je pretpostavljeno da su srednjeokretni ili brzoekretni motori, te su ujedno i emisijski faktori za sve tri aktivnosti jednako podijeljeni (tablica 7).

U zadnjem stupcu tablica emisijskih faktora prikazana je specifična potrošnja goriva (sfoc) koja predstavlja količinu (grami) potrošnje goriva po proizvedenoj jedinici snage u vremenu (kWh). Pošto su emisijski faktori izraženi u g/kWh, vrijednosti specifične potrošnje goriva koriste se radi pretvorbe g/kWh u kilogram onečišćivača po toni goriva (jednadžba 17).

$$kg/t_{goriva} = \frac{g/kWh}{sfoc \cdot 0,001} \quad (17)$$

Specifična potrošnja procijenjena je kao konstantna vrijednost, najčešće za optimalna opterećenja, dok pri ostalim opterećenjima (niža radna opterećenja) odstupa i do 10% od zadane vrijednosti. Također ovisi i o vrsti motora te ogrjevnoj vrijednosti korištenog goriva (RO – 40,96 MJ/kg, MDO – 42,19 MJ/kg, MGO – 42.65 MJ/kg), zbog čega je za RO goriva uvećana za 5%. U studiji je prihvaćena pretpostavka da je SFC jednaka za postojeće motore i novo ugrađene motore što može dovesti do odstupanja u vrijednostima, posebice kod novijih motora koji su dizajnirani za rad s većom energetsom učinkovitošću.

3.3.1. Nepouzdanost emisijskih faktora

Zbog raznih faktora koji utječu na emisijske faktore moguća su odstupanja i pogreške prilikom procjene i odabira prosječnih vrijednosti. Potrebno je razlikovati varijabilnost i nepouzdanost prikupljenih podataka. Varijabilnost se odnosi na tvrdnju da različiti izvori emisija imaju i različite koncentracije emisija ili da emisije iz istog izvora s vremenom variraju, dok nepouzdanost predstavlja skup nejasnoća i manjak točnih informacija koje u određenoj mjeri odstupaju od stvarnih vrijednosti. Najčešći razlozi koji dovode do nepouzdanosti su greške prilikom mjerenja (neadekvatna mjerna oprema, irelevantna mjerenja, nedovoljno prosječno vrijeme mjerenja), nereprezentativnost (nedovoljan broj mjerenja tj. prikupljenih podataka), statistička pogreška (nasumice analizirani podaci) i razne pretpostavke (manjak dostupnih podataka).

Tri glavna faktora koja utječu na nepouzdanost emisijski faktora Entec studije:

- nedovoljan broj reprezentativnih mjerenja usporedno s ukupnim brojem analiziranih brodskih motora
- nepouzdanost prilikom mjerenja i definiranja emisijskih faktora
- emisijski faktori za sve navedene aktivnosti broda ovise o dosta nepouzdanih pretpostavki.

Autori Entec studije navode moguća odstupanja u procjenama emisijskih faktora, posebice zbog nedovoljnog broja mjerenja pri različitim režimima plovidbe, te zbog različitih metoda mjerenja koje su korištene pri prikupljanju podataka. U tablici 8 prikazana su procijenjena odstupanja emisijskih faktora za sve tri aktivnosti broda. Procijenjeno je da su najveća odstupanja moguća za vrijeme faze manevriranja zbog perioda 'hladnog' rada motora, kod kojeg dolazi do nepredvidivih promjena u opterećenju motora što rezultira s oscilacijama u ispušnim emisijama. Prilikom hladnog startanja motora i rada s niskim opterećenjem dolazi do povećanja emisija posebice pri upotrebi goriva s povećanom viskoznošću i visokim postotkom sumpora.

Tablica 8. Procijenjeni intervali odstupanja emisijskih faktora [1]

| | U plovidbi | U manevriranju | U luci |
|-----------------|------------|----------------|--------|
| NO _x | ±20% | ±40% | ±30% |
| SO ₂ | ±10% | ±30% | ±20% |
| CO ₂ | ±10% | ±30% | ±20% |
| VOC | ±25% | ±50% | ±40% |
| PM | ±25% | ±50% | ±40% |
| sfoc | ±10% | ±30% | ±20% |

Emisije NO_x-a ovise o procesu izgaranja goriva u cilindru te tipu motora. Koncentracije NO_x-a ovise temperaturi izgaranja, što kod sporookretnih motora zbog dužeg rada pri visokim temperaturama rezultira povećanom efikasnošću izgaranja, ali i većim emisijama NO_x-a. Omjer između NO i NO₂ varira između 0,10 i 0,05 (NO₂ iznosi 5-10% od ukupnih NO_x-a), te procijenjena koncentracija NO₂ u studiji iznosi 8% od ukupnih emisija NO_x-a. Nadalje, emisijski faktori NO_x-a razlikovat će se i zbog vrste korištenog goriva, stoga je procijenjeno da MDO i MGO goriva imaju 6% smanjene NO_x emisije usporedno s RO gorivom (RO ima nižu ogrjevnju vrijednost). NO_x emisijski faktori podijeljene su u studiji prema godini ugradnje motora sukladno NO_x Tehničkom kodeksu, što može dovesti do dodatnog odstupanja u vrijednostima zbog novog NO_x Razreda III koji uključuje brodove s motorima ugrađenim nakon 01. siječnja 2016. godine, dok je zadnje ažuriranje studije obavljeno 2010. godine.

Kod procjene CO₂ emisijskih faktora pretpostavljeno da za vrijeme procesa izgaranja dolazi do potpunog izgaranja ugljika, odnosno tvorbe CO₂. Također se može primijetiti da u tablicama 5, 6 i 7 nisu uzeti u obzir emisijski faktori za CO. Koncentracija CO₂ u ispušnim plinovima ovisit će ponajviše o postotku ugljika u gorivu. Prihvaćeni postotak ugljika u gorivu je 86,7% što odgovara CO₂ emisijama od 3,179 kg/tona goriva. U ovoj studiji uvažen je postotak od 86,5% prema Loyd's Registru (1995), odnosno emisijski faktor od 3,170 kg/tona goriva ili 660 g/kWh. Ovaj podatak može odstupati prilikom upotrebe različitih brodskih goriva (raspon postotka ugljika 85 – 87,5%), kod kojih lakša i destilirana goriva imaju veći sadržaj ugljika [120]. Pri eksploatacijskim uvjetima rada, koncentracija CO₂ će se mijenjati ovisno o opterećenju motora i dovedenoj količini zraka (pretičku zraka λ). Kod povećanja opterećenja motora raste i temperatura ispušnih plinova (do određene granice opterećenja kod koje turbo-puhalo postiže veću učinkovitost), što posljedično dovodi i do porasta CO₂ koncentracije.

Količina SO₂ emisija ovisit će primarno o postotku sumpora u gorivu, te ako je ugrađena tehnologija za pročišćavanje ispušnih plinova s kojom se postiže smanjenje SO_x-a u ispušnim plinovima. Procijenjeni postotak sumpora u gorivu za inventar Entec studije iznosi 2,7% za RO,

1,5% za MDO i 0,1% za MGO gorivo. Emisije PM čestica također ovise o kvaliteti izgaranja, s toga je procijenjeno smanjenje PM emisija proporcionalno i smanjenju sumpora u gorivu jer je riječ o čistim i kvalitetnijim gorivima. Emisijski faktori PM čestica su zasnovani na mjerenjima s uređajima koji očitavaju koncentraciju čestica u ohlađenim i razrijeđenim ispušnim plinovima. U slučaju VOC emisija procijenjeno je da se 99 % odnosi na NMVOC plinove (engl.'Non-Methane Volatile Organic Compounds) dok samo 1% sačinjava CH₄. Odstupanje emisijskih faktora VOC-a za vrijeme manevriranja i u luci procijenjeno je i do 50% zbog toga što u slučaju iskrcaja/ukrcaja tereta kod tankera dolazi do povećane količine ispuštanja VOC spojeva.

3.4. EMEP/EEA metodologija procjene inventara emisija i emisijskih faktora

Europska agencija za okoliš EMEP/EEA (engl.' European Monitoring and Evaluation Programme/ European Environment Agency) izradila je Tehnički vodič za izradu nacionalnih inventara emisija čije je zadnja revidirana verzija [3] objavljena 2021. godine. Prva verzija objavljena je 1998. godine od autora C. Trozzi u sklopu projekta MEET (engl. 'Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport'). Cilj projekta je bio izraditi metodologiju procjene nacionalnih inventara emisija ovisno o dostupnim podacima, te predložiti nove emisijske faktore pregledom tada dostupnih baza podataka. U Tehničkom vodiču predložene su metode procjene emisija i emisijski faktori za gospodarske sektore poljoprivrede, stacionarnih energetske postrojenja, cestovnog, zračnog, željezničkog prometa te pomorskog prometa.

Metode su podijeljene po razinama 1, 2 i 3, gdje 1 predstavlja najjednostavniju metodu, a 3 najkompleksniju. Razine metoda ovise o složenosti pomorskog prometa i dostupnosti prikupljenih podataka. Metode procjene emisija su:

- razina 1: koriste se unaprijed zadani emisijski faktori i podaci o potrošnji goriva
- razina 2: emisijski faktori su dodatno podijeljeni po vrsti motora
- razina 3: zasniva se na aktivnostima broda i tehničkim karakteristikama postrojenja.

3.4.1 Metoda razine 1

Ova metoda predstavlja najjednostavniji pristup procjeni i izradi inventara emisija gdje je dovoljno poznavati informaciju o ukupno prodanom gorivu, te pripadajući emisijski faktor za određenu vrstu goriva. Pouzdanost procjene je upitna jer se u proračun uvrštava podatak o količini prodanog goriva, a ne stvarno utrošenog. U tablici 9 prikazani su emisijski faktori za brodove koji koriste ostatno gorivo.

Tablica 9. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste RO gorivo [3]

| Onečišćivač | Vrijednost EF | Jedinica | Referenca |
|-----------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| NO _x | 69,1 | kg/tgoriva | Scipper (2021) ⁽¹⁾ |
| CO | 3,67 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| NM VOC | 1,67 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| SO ₂ | 19,2 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| PM ₁₀ | 5,2 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| BC ⁽²⁾ | 5,6 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| Pb | 0,18 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost ⁽³⁾ |
| Cd | 0,02 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Hg | 0,02 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| As | 0,68 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Cr | 0,72 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Cu | 1,25 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Ni | 32 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Se | 0,21 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Zn | 1,20 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| PCB ⁽⁴⁾ | 0,57 | TEQmg/tgoriva | Cooper (2005) |
| PCDD/F ⁽⁵⁾ | 0,47 | mg/tgoriva | Cooper (2005) |
| HCB ⁽⁶⁾ | 0,14 | mg/tgoriva | Cooper (2005) |

(1) – podaci preuzeti iz studije Scipper Europske komisije [121], emisijski faktori bazirani na opsežnom pregledu dosadašnjih literatura

(2) – emisijski faktor za crni ugljik BC (engl.'black carbon')

(3) – prosječne vrijednosti dobivene između podataka Lloyd's Registra (1995.) i Cooper (2004.)

(4) – poliklorirani bifenili (PCB)

(5) – pliklorirani dibenzo-p-dioksini i furani (PCDD/F)

(6) – heksaklorbenzeni (HCB)

U tablici su prikazani i procijenjeni emisijski faktori za teške metale (Pb, Cd, Hg, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn), te za mikroonečišćivače (PCB, PCDD/F, HCB). U zadnjoj verziji studije je uveden i emisijski faktor za crni ugljik (BC- engl.'black carbon') koji se nalazi u lebdećim česticama ispušnih plinova. Definiran je kao frakcija čestice ugljika koja se izravno emitira u atmosferu s visokim koeficijentom apsorpcije svjetlosti. Istraživanje [122] je utvrdilo da koncentracije BC ovisi o tipu motora (u slučaju sporookretnih dvotaktnih motora manja je koncentracija BC nego kod srednjeokretnih četverotaktnih), opterećenju motora (kod dvotaktnih motora povećanje

opterećenja smanjuje BC koncentraciju i obrnuto) te o kvaliteti goriva (brodska destilirana goriva imaju najniže emisije BC). Tablica 10 prikazuje emisijske faktore u slučaju ako se koriste brodska goriva MDO ili MGO.

Tablica 10. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste MDO/MGO gorivo [3]

| Onečišćivač | Vrijednost EF | Jedinica | Referenca |
|------------------|---------------|---------------|----------------------|
| NO _x | 72,2 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| CO | 3,84 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| NMVOOC | 1,75 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| SO ₂ | 1,82 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| PM ₁₀ | 1,07 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| BC | 0,0483 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| Pb | 0,13 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Cd | 0,01 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Hg | 0,03 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| As | 0,04 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Cr | 0,05 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Cu | 0,88 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Ni | 1 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Se | 0,1 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| Zn | 1,2 | g/tgoriva | Prosječna vrijednost |
| PCB | 0,038 | TEQmg/tgoriva | Cooper (2005) |
| PCDD/F | 0,13 | mg/tgoriva | Cooper (2005) |
| HCB | 0,08 | mg/tgoriva | Cooper (2005) |

Osim konvencionalnih brodskih goriva prikazani su i procijenjeni emisijski faktori za brodove koji koriste LNG kao pogonsko gorivo (tablica 11). Procjene se temelje na mjerenjima kod četverotaktnih motora na dvojna goriva koji koriste LNG kao primarno gorivo. Postotak sumpora u LNG gorivu je izrazito nizak, s toga je vrijednost emisijski faktor 0, dok je udio sumpora u pilot gorivu zanemaren.

Tablica 11. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste LNG gorivo [3]

| Onečišćivač | Vrijednost EF | Jedinica | Referenca |
|--------------------|----------------------|------------|----------------|
| NO _x | 4,92 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| CO | 13,8 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| NMVOOC | 2,00 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| SO ₂ | 0,00 | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| PM ₁₀ | $1,24 \cdot 10^{-3}$ | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| PM _{2,5} | $1,06 \cdot 10^{-3}$ | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| BC | $2,49 \cdot 10^{-3}$ | kg/tgoriva | Scipper (2021) |
| TSP ⁽¹⁾ | $1,24 \cdot 10^{-3}$ | kg/tgoriva | Scipper (2021) |

(1) - Total Suspended Particles (TSP), čestice promjera <10 μ m

3.4.2 Metoda razine 2

Pristup procjeni emisija metode razine 2 sličan je kao kod razine 1 jer se za izračun koriste podaci o utrošenom gorivu (međunarodna ili nacionalna plovidba), ali se dodatno zahtijevaju podaci o vrsti pogona. U tablici 12 su prikazani procijenjeni emisijski faktori za različite kombinacije pogonskih motora i korištenog goriva. U ovoj metodi nisu navedeni postoci sumpora i ugljika u gorivima, stoga nisu tablično prikazani emisijski faktori za CO₂ i SO_x spojeve.

Tablica 12. Razina 2. Emisijski faktori (kg/tgoriva) i specifična potrošnja goriva (g/kWh) za različite tipove pogona/goriva [3]

| Tip motora | Tip goriva | CO | NO _x | NMV OC | PM ₁₀ | PM _{2,5} | Sfoc |
|--------------------------|--------------------|------|-----------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------|
| Brzookretni dizelski | BFO ⁽¹⁾ | 4,15 | 37,9 | 2,52 | 5,01 | 4,26 | 234 |
| | MDO/MGO | 4,34 | 39,6 | 2,64 | 0,960 | 0,81 | 224 |
| | LNG | 12,0 | 4,27 | 1,93 | 1,08·10 ⁻³ | 1,08·10 ⁻³ | 195 |
| Srednjeokr. dizelski | BFO | 4,25 | 55,3 | 1,78 | 5,21 | 4,43 | 202 |
| | MDO/MGO | 4,45 | 57,9 | 1,86 | 1,07 | 0,91 | 193 |
| | LNG | 13,8 | 4,94 | 2,00 | 1,25·10 ⁻³ | 1,06·10 ⁻³ | 169 |
| Sporookretni dizelski | BFO | 3,10 | 90,2 | 1,56 | 5,20 | 4,42 | 204 |
| | MDO/MGO | 3,24 | 94,3 | 1,64 | 1,07 | 0,90 | 195 |
| | LNG | 13,7 | 4,90 | 1,99 | 1,24·10 ⁻³ | 1,05·10 ⁻³ | 170 |

(1) BFO – bunker fuel oil

U tablici 13 prikazani su različiti NO_x emisijski faktori za plinsku i parnu turbinu, ovisno o godini reference tj. studiji (Entec). Emisijski faktori za 2000. god. (Entec, 2002) su reprezentativni za brodove izgrađene prije IMO NO_x Tehničkog kodeksa, dok 2005. i 2010. NO_x vrijednosti (Entec 2007) odgovaraju smanjenju od 3,4% i 6,8% (od 2000. god.) za novije motore. Vidljivo je da je Entec studija poslužila kao glavna referenca pri određivanju NO_x emisijskih faktora i njihova procijenjena smanjenja NO_x emisija su i ovdje primijenjena. Nepouzdanost NO_x procjene se može dogoditi kod brodova s novo ugrađenim motorima koji moraju udovoljavati NO_x Razredu II (od 2011. god.) i NO_x Razredu III (od 2016 god.), te su iz tog razloga projektirani sa smanjenim NO_x emisijama.

Tablica 13. Razina 2. Emisijski faktori (kg/tona) za plinsku i parnu turbinu u ovisnosti o vrsti goriva [3]

| Tip pogona | Tip goriva | NO _x 2000. (kg/tona) | NO _x 2005 (kg/tona) | NO _x 2010 (kg tona) | TSP – PM ₁₀ | PM _{2,5} | Sfoc |
|--------------------|------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------|-------------------|------|
| Plinska turbina | BFO | 20,0 | 19,3 | 18,6 | 0,3 | 0,3 | 305 |
| | MDO/MGO | 19,7 | 19,0 | 18,3 | 0,0 | 0,0 | 290 |
| Parna turbina | BFO | 6,9 | 6,6 | 6,4 | 2,6 | 2,4 | 305 |
| | MDO/MGO | 6,9 | 6,6 | 6,4 | 1,0 | 0,9 | 290 |

Za NO_x emisijske faktore uvedeni su redukcijски faktori (tablica 14) koji se primjenjuju za motore ugrađene nakon 2000 godine. U tablici 14 NO_x emisijski faktori odnose se na NO_x Razred 0 (motori ugrađeni prije 2000. god.), koji se koriste za procjenu NO_x emisija ovisno o Razredu I, II ili III.

Tablica 14. NO_x redukcijски faktori (%) za NO_x Razred 0 [3]

| Tip motora | NO _x Razred I | NO _x Razred II | NO _x Razred III |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Brzookretni dizelski | 13,1 | 30,2 | 85,3 |
| Srednjeokretni dizelski | 2,36 | 23,2 | 90,6 |
| Sporookretni dizelski | 18,3 | 36,1 | 88,7 |

Kako bi se odredio emisijski faktor (odstupanje o nultog Razreda) za spomenute Razrede, potrebno je koristiti sljedeću jednadžbu :

$$EF_{NO_x \text{ Razred } x} = EF_{NO_x \text{ Razred } 0} (1 - R_f) \quad (18)$$

gdje je:

$EF_{NO_x \text{ Razred } x}$: emisijski faktor za NO_x Razred I, II ili III

$EF_{NO_x \text{ Razred } 0}$: emisijski faktor za NO_x Razred 0

R_f : Reducijски faktor ovisno o NO_x Razredu.

3.4.3 Metoda razine 3

Prethodne dvije metode za procjenu emisija su primarno koristile podatak o prodanom/utrošenom gorivu, dok se metoda razine 3 zasniva na podacima o kretanju broda, odnosno aktivnostima broda. Ova metoda koristi spomenuti 'bottom-up' pristup procjeni ukupnih emisija, kod kojeg su potrebni detaljni podaci o kretanju broda i tehničkim karakteristikama postrojenja. Emisijski faktori su dodatno podijeljeni po aktivnostima broda, što uključuje plovidbu broda, manevriranje i boravak u luci, te tipu motora, odnosno na glavne i pomoćne. Procijenjeni emisijskih faktora za dizelske motore u ovoj metodi određeni su statističkom analizom dostupnih literatura i studija (Entec, Scipper, Loyds's Registar), koja se temelji na procjeni odnosa opterećenja motora i emisijskog faktora. Emisijski faktori pod kategorijom 'plovidba' predstavljaju opterećenje glavnog motora od 80%, dok 20% opterećenja podrazumijeva kategoriju 'manevriranje' i 'boravak u luci'.

U slučaju pomoćnih motora, emisijski faktori za kategoriju 'plovidba' predstavljaju opterećenja motora od 30%, a 50% opterećenja pripada kategoriji 'manevriranje' i 'boravak u luci'. Određivanje emisijskih faktora isključivo preko metode analiziranja literature, može dovesti do nepouzdanih procjena posebice ako se uzimaju samo određena konstantna opterećenja motora, a ostala se zanemaruju. U tablici 15 prikazani su emisijski faktori i specifična potrošnja goriva, izraženi u g/kWh za razinu 3.

Tablica 15. Razina 3. Emisijski faktori (g/kWh) i specifična potrošnja goriva (g/kWh) za različite aktivnosti broda i tipove pogona/goriva [3]

| Motor | Faza | Tip motora | Tip goriva | CO (g/kWh) | NOx (g/kWh) | NMVOC (g/kWh) | TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5} (g/kWh) | Sfoc (g/kWh) |
|---------|-------------------------------|-----------------------|------------|------------|-------------|---------------|---|--------------|
| Glavni | Plovidba | Brzooketni dizelski | BFO | 0,693 | 8,53 | 0,440 | 1,13 | 214 |
| | | | MDO/MGO | 0,693 | 8,53 | 0,440 | 0,188 | 205 |
| | | | LNG | 1,44 | 0,732 | 0,127 | 1,08·10 ⁻⁴ | 178 |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 0,614 | 10,8 | 0,269 | 1,01 | 185 |
| | | | MDO/MGO | 0,614 | 10,8 | 0,269 | 0,180 | 177 |
| | | | LNG | 1,44 | 0,732 | 0,127 | 1,08·10 ⁻⁴ | 154 |
| | | Sporookretni dizelski | BFO | 0,451 | 17,7 | 0,238 | 1,02 | 187 |
| | | | MDO/MGO | 0,451 | 17,7 | 0,238 | 0,180 | 178 |
| | | | LNG | 1,44 | 0,732 | 0,127 | 1,08·10 ⁻⁴ | 156 |
| | Manevriranje i boravak u luci | Brzooketni dizelski | BFO | 2,70 | 11,7 | 1,233 | 1,34 | 318 |
| | | | MDO/MGO | 2,70 | 11,7 | 1,233 | 0,367 | 304 |
| | | | LNG | 6,15 | 1,25 | 1,242 | 5,41·10 ⁻⁴ | 265 |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 2,39 | 14,8 | 0,753 | 1,23 | 275 |
| | | | MDO/MGO | 2,39 | 14,8 | 0,753 | 0,361 | 263 |
| | | | LNG | 6,15 | 1,25 | 1,242 | 5,41·10 ⁻⁴ | 229 |
| | | Sporook. dizelski | BFO | 1,75 | 24,3 | 0,666 | 1,24 | 277 |
| | | | MDO/MGO | 1,75 | 24,3 | 0,666 | 0,361 | 265 |
| | | | LNG | 6,15 | 1,25 | 1,242 | 5,41·10 ⁻⁴ | 231 |
| Pomoćni | Plovidba | Brzooketni dizelski | BFO | 1,81 | 9,94 | 0,997 | 1,16 | 283 |
| | | | MDO/MGO | 1,81 | 9,94 | 0,997 | 0,290 | 271 |
| | | | LNG | 4,88 | 0,928 | 0,887 | 2,70·10 ⁻⁴ | 236 |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 1,61 | 12,6 | 0,609 | 1,06 | 245 |
| | | | MDO/MGO | 1,61 | 12,6 | 0,609 | 0,284 | 234 |
| | | | LNG | 4,88 | 0,928 | 0,887 | 2,70·10 ⁻⁴ | 204 |
| | Manevriranje i boravak u luci | Brzooketni dizelski | BFO | 1,10 | 8,53 | 0,649 | 1,03 | 235 |
| | | | MDO/MGO | 1,10 | 8,53 | 0,649 | 0,221 | 224 |
| | | | LNG | 2,92 | 0,556 | 0,380 | 1,80·10 ⁻⁴ | 196 |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 0,974 | 10,8 | 0,397 | 0,93 | 203 |
| | | | MDO/MGO | 0,974 | 10,8 | 0,397 | 0,215 | 194 |
| | | | LNG | 2,92 | 0,566 | 0,380 | 1,80·10 ⁻⁴ | 169 |

Ako se određuje procjena ukupnih emisija uz pomoć emisijskih faktora iz tablice 15, potrebno je prikupiti sljedeće informacije: podaci o kretanju broda (luka polazišta i odredišta, vrijeme dolaska i odlaska), podaci o rutama i udaljenosti između luka, podaci o karakteristikama broda (vrsta pogona, vrsta goriva, instalirana snaga glavnih i pomoćnih motora), podaci o ukupnom

vremenu provedenom u plovidbi te podaci o ukupnom vremenu provedenom za vrijeme manevriranja i boravka broda u luci. U slučaju nemogućnosti prikupljanja spomenutih podataka, u ovoj metodi su dodatno procijenjeni podaci poput instalirane snage glavnih motora u ovisnosti o bruto tonaži broda, instalirane prosječne snage glavnih motora po kategoriji broda, prosječni omjer instalirane snage pomoćnih i glavnih motora po kategoriji broda, prosječna brzina broda te prosječno vrijeme boravka u luci po kategoriji broda.

Tablica 8 prikazuje procijenjene emisijske faktore izražene u kilogramu onečišćivača po toni utrošenog goriva. Koristeći podatke iz tablice 16 mogu se izračunati ukupne emisije na godišnjoj razini ako se poznaju podaci o potrošnji goriva pojedinačno za svaki brod, a da se pri tome uzme u obzir vrsta pogona i goriva.

Tablica 16. Razina 3. Emisijski faktori (kg/tona) za različite aktivnosti broda i tipove pogona/goriva [3]

| Motor | Faza | Tip motora | Tip goriva | CO (kg/tona) | NOx (kg/tona) | NMVOC (kg/tona) | TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5} (kg/tona) | BC (kg/tona) |
|---------|-------------------------------------|------------------------------|------------|-----------------|------------------|--------------------|--|----------------------|
| Glavni | Plovidba | Brzooketn i dizelski | BFO | 3,23 | 39,8 | 2,05 | 5,29 | 0,0533 |
| | | | MDO/MGO | 3,38 | 41,6 | 2,15 | 0,916 | 0,0285 |
| | | | LNG | 8,07 | 4,10 | 0,17 | $1,01 \cdot 10^{-3}$ | $2,02 \cdot 10^{-5}$ |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 3,32 | 58,2 | 1,45 | 5,45 | 0,0616 |
| | | | MDO/MGO | 3,47 | 60,8 | 1,52 | 1,016 | 0,0329 |
| | | | LNG | 9,33 | 4,74 | 0,82 | $1,17 \cdot 10^{-3}$ | $2,33 \cdot 10^{-5}$ |
| | | Sporookr etni dizelski | BFO | 2,41 | 94,7 | 1,27 | 5,45 | 0,0612 |
| | | | MDO/MGO | 2,52 | 99,7 | 1,33 | 1,01 | 0,0327 |
| | | | LNG | 9,26 | 4,71 | 0,81 | $1,16 \cdot 10^{-3}$ | $2,32 \cdot 10^{-5}$ |
| | Manevriranje i boravak u luci | Brzooketn idizelski | BFO | 8,49 | 36,8 | 3,88 | 4,20 | 0,203 |
| | | | MDO/MGO | 8,88 | 38,5 | 4,06 | 1,21 | 0,109 |
| | | | LNG | 23,2 | 4,72 | 4,69 | $2,04 \cdot 10^{-3}$ | $4,09 \cdot 10^{-3}$ |
| | | Srednjeok .dizelski | BFO | 8,70 | 53,8 | 2,74 | 4,48 | 0,235 |
| | | | MDO/MGO | 9,10 | 56,3 | 2,86 | 1,37 | 0,126 |
| | | | LNG | 26,8 | 5,46 | 5,42 | $2,36 \cdot 10^{-3}$ | $4,09 \cdot 10^{-3}$ |
| | | Sporook. dizelski | BFO | 6,33 | 87,6 | 2,40 | 4,47 | 0,233 |
| | | | MDO/MGO | 6,62 | 91,7 | 2,52 | 1,36 | 0,125 |
| | | | LNG | 26,6 | 5,4 | 5,38 | 0,00235 | $4,69 \cdot 10^{-3}$ |
| Pomoćni | Plovidba | Brzooketn dizelski | BFO | 6,40 | 35,1 | 3,52 | 4,09 | 0,137 |
| | | | MDO/MGO | 6,70 | 36,7 | 3,68 | 1,07 | 0,073 |
| | | | LNG | 20,7 | 3,93 | 3,76 | 0,00 | $2,29 \cdot 10^{-5}$ |
| | | Srednjeok .dizelski | BFO | 6,56 | 51,3 | 2,49 | 4,34 | 0,159 |
| | | | MDO/MGO | 6,86 | 53,6 | 2,60 | 1,21 | 0,085 |
| | | | LNG | 23,9 | 4,55 | 4,35 | 0,00 | $2,65 \cdot 10^{-5}$ |
| | Manevriranje i boravak u luci | Brzooketn dizelski | BFO | 4,68 | 36,3 | 2,77 | 4,37 | 0,088 |
| | | | MDO/MGO | 4,90 | 38,0 | 2,89 | 0,98 | 0,047 |
| | | | LNG | 14,9 | 2,90 | 1,95 | 0,00 | $1,84 \cdot 10^{-5}$ |
| | | Srednjeok. dizelski | BFO | 4,80 | 53,1 | 1,95 | 4,58 | 0,101 |
| | | | MDO/MGO | 5,02 | 55,5 | 2,04 | 1,11 | 0,054 |
| | | | LNG | 17,3 | 3,35 | 2,25 | 0,00 | $2,13 \cdot 10^{-5}$ |

3.5. US EPA studija procjene emisijskih faktora

Američka agencija za zaštitu okoliša uz pomoć Starcrest Consulting Group izradila je studiju inventara emisija za zaljev San Pedro, odnosno dvije najprometnije luke Los Angeles i Long Beach. U studiji je analizirana i objašnjena metodologija izrade inventara emisija koja uključuje sve mobilne lučke izvore emisija u referentnom lučkom području. Zadnja ažurirana verzija studije [4] je iz 2021. godine, dok su detaljni izvori podataka i pristup izradi inventara izdani u Vodiču za izradu inventara emisija u lučkom području [123]. Inventar emisija za spomenute luke uključuje procjene emisija iz svih konvencionalnih brodova u međunarodnoj ili nacionalnoj plovidbi te iz svih rekreacijskih plovila (jahte, jedrilice). Dodatno su uključene i emisije iz lučkih mobilnih izvora poput lučkog željezničkog transporta, lučkih teretnih vozila i opreme za rukovanjem teretom. Za dodatne izvore emisija procijenjeni su i odgovarajući emisijski faktori koji neće biti prikazani u tablicama jer nisu relevantni za ovo istraživanje.

Metodologija izrade inventara uključuje procjene emisija iz glavnih i pomoćnih motora, te generatora pare. Izračun emisija je zasnovan na utrošku energije (kW) koji se pomnoži s odgovarajućim emisijskim faktorom (g/kWh) i korekcijskim faktorom ovisno o vrsti korištenog goriva ili za slučaj ako su primijenjene tehnologije za smanjenje emisija. Emisijski faktori za određene onečišćivače i stakleničke plinove dobiveni su preko sljedećih jednadžbi [123]:

$$EF_{SO_x} = S_{stv} \cdot sfoc \cdot 0,97753 \cdot M_s \text{ [g/kWh]} \quad (19)$$

gdje je: EF_{SO_x} = emisijski faktor za sumporove okside, S_{stv} = stvarni udio sumpora u gorivu; 0,001 za sve plovidbu u SECA zoni u 2015. godini i kasnije, 0,027 za sve plovidbe izvan SECA zone prije 2020. godine, 0,005 za sve plovidbe izvan SECA zone u 2020. godini i kasnije, $sfoc$ = specifična potrošnja goriva [g/kWh], 0,097753 = udio sumpora u gorivu izražen u SO_2 , M_s = molekularna masa $SO_2 = 64/32=2$

$$EF_{CO_2} = sfoc \cdot C_f \text{ [g/kWh]} \quad (20)$$

gdje je: EF_{CO_2} = emisijski faktor za ugljikov dioksid, $sfoc$ = specifična potrošnja goriva [g/kWh], C_f = udio ugljika u gorivu u ovisnosti o vrsti goriva (gCO_2/g goriva), 3,206 za MDO/MGO, 3,114 za HFO i 2,75 za LNG gorivo

$$EF_{PM_{10}} = PM_b + (S_{stv} \cdot sfoc \cdot M_{PM} \cdot 0,02247) \text{ [g/kWh]} \quad (21)$$

gdje je: $EF_{PM_{10}}$ = emisijski faktor za fine čestice PM_{10} , S_{stv} = stvarni udio sumpora u gorivu, $sfoc$ = specifična potrošnja goriva [g/kWh], M_{PM} = molekularna masa, (omjer mase sulfata finih čestica i sumpora $224/32 = 7$), $0,02247$ = udio sumpora u gorivu izražen u izravni sulfat

$$EF_{PM_{2,5}} = PM_{10} \cdot F_{PM} \text{ [g/kWh]} \quad (22)$$

gdje je: $EF_{PM_{2,5}}$ = emisijski faktor za fine čestice $PM_{2,5}$, F_{PM} = omjer između PM_{10} i $PM_{2,5}$ ovisno o vrsti goriva, 0,8 za HFO i 0,92 za MDO/MGO

U sljedećim tablicama (17,18,19 i 20) prikazani su emisijski faktori korišteni u US/EPA studiji za relevantna brodska postrojenja i goriva.

Tablica 17. Emisijski faktori (g/kWh) pri upotrebi HFO i MGO goriva za dizelske motore, parnu i plinsku propulziju [4]

| HFO gorivo (2,7%) | IMO Razred | Model, godina ugradnje | PM ₁₀ | PM _{2,5} | NOx | SOx | CO | HC |
|-------------------|------------|------------------------|------------------|-------------------|------|-------|-----|-----|
| SSD | 0 | 1999 i stariji | 1,40 | 1,12 | 18,1 | 10,3 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | I | 2000 do 2011 | 1,40 | 1,12 | 17,0 | 10,3 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | II | 2011 do 2016 | 1,40 | 1,12 | 15,3 | 10,3 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | III | 2016 i noviji | 1,40 | 1,12 | 3,6 | 10,3 | 1,4 | 0,6 |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 1,49 | 1,19 | 14,0 | 11,3 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 1,49 | 1,19 | 13,0 | 11,3 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 1,49 | 1,19 | 11,2 | 11,3 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 1,49 | 1,19 | 2,8 | 11,3 | 1,1 | 0,5 |
| GT | / | Svi | 0,06 | 0,05 | 6,1 | 16,1 | 0,2 | 0,1 |
| ST | / | Svi | 1,87 | 1,50 | 2,1 | 16,1 | 0,2 | 0,1 |
| MGO gorivo (0,1%) | | | | | | | | |
| SSD | 0 | 1999 i stariji | 0,184 | 0,169 | 17,0 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | I | 2000 do 2011 | 0,184 | 0,169 | 16,0 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | II | 2011 do 2016 | 0,184 | 0,169 | 14,4 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| SSD | III | 2016 i noviji | 0,184 | 0,169 | 3,4 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 0,187 | 0,172 | 13,2 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 0,187 | 0,172 | 13,2 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 0,187 | 0,172 | 10,5 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 0,187 | 0,172 | 2,6 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| GT | / | Svi | 0,010 | 0,009 | 5,7 | 0,587 | 0,2 | 0,1 |
| ST | / | Svi | 0,202 | 0,186 | 2,0 | 0,587 | 0,2 | 0,1 |

Tablica 17 prikazuje emisijske faktore (g/kWh) za PM, NO_x, SO_x, CO i HC onečišćivače za HFO gorivo s 2,7% udjela sumpora te za MGO s maksimalnih 0,1% udjela sumpora. U toj tablici su dizelska postrojenja raspoređena po IMO NO_x Razredima, što rezultira različitim emisijskim faktorima ovisno o godini ugradnje motora. Može se primijetiti da motori ugrađeni 2016. god. ili kasnije imaju znatno niže NO_x emisijske faktore jer moraju udovoljiti IMO Razredu III. Proizvođači motora sugeriraju da dizelski motori koji spadaju u kategoriju Razreda III, ne mogu zadovoljiti standard tog Razreda ako rade pri opterećenju ispod 25% jer ispušni plinovi ne postižu potrebne temperature za efikasan rad sustava za smanjenje NO_x emisija (selektivna katalitička redukcija). U tom slučaju mogu se koristiti emisijski faktori NO_x Razreda II.

U tablici 18 prikazani su emisijski faktori za stakleničke plinove CO₂, N₂O i CH₄, pri upotrebi HFO i MGO goriva. Osim za dizelska postrojenja prikazani su emisijski faktori za parnu (ST) i plinsku (GT) turbinu, kod kojih se zbog povećanje potrošnje goriva tj. neučinkovitog rada usporedno s dizelskim motorom procjenjuju veće vrijednosti emisijskih faktora, posebice za CO₂.

Tablica 18. Emisijski faktori (g/kWh) stakleničkih plinova pri upotrebi HFO i MGO goriva za dizelske motore, parnu i plinsku propulziju [4]

| HFO gorivo (2,7%) | IMO Razred | Model, godina ugradnje | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ |
|-------------------|------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| SSD | 0 | 1999 i stariji | 607 | 0,031 | 0,012 |
| SSD | I | 2000 do 2011 | 607 | 0,031 | 0,012 |
| SSD | II | 2011 do 2016 | 607 | 0,031 | 0,012 |
| SSD | III | 2016 i noviji | 607 | 0,031 | 0,012 |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 670 | 0,031 | 0,010 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 670 | 0,031 | 0,010 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 670 | 0,031 | 0,010 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 670 | 0,031 | 0,010 |
| GT | / | Svi | 950 | 0,08 | 0,002 |
| ST | / | Svi | 950 | 0,08 | 0,002 |
| MGO gorivo (0,1%) | | | | | |
| SSD | 0 | 1999 i stariji | 593 | 0,029 | 0,012 |
| SSD | I | 2000 do 2011 | 593 | 0,029 | 0,012 |
| SSD | II | 2011 do 2016 | 593 | 0,029 | 0,012 |
| SSD | III | 2016 i noviji | 593 | 0,029 | 0,012 |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 657 | 0,029 | 0,010 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 657 | 0,029 | 0,010 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 657 | 0,029 | 0,010 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 657 | 0,029 | 0,010 |
| GT | / | Svi | 962 | 0,075 | 0,002 |
| ST | / | Svi | 962 | 0,075 | 0,002 |

Tablice 19 i 20 prikazuju emisijske faktore za pomoćne dizelske motore koji su pretežito MSD ili HSD motori.

Tablica 19. Emisijski faktori za pomoćne dizelske motore pri upotrebi HFO i MGO goriva [4]

| HFO gorivo (2,7%) | IMO Razred | Model, godina ugradnje | PM ₁₀ | PM _{2,5} | NO _x | SO _x | CO | HC |
|-------------------|------------|------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 1,54 | 1,23 | 14,7 | 11,98 | 1,1 | 0,4 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 1,54 | 1,23 | 13,0 | 11,98 | 1,1 | 0,4 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 1,54 | 1,23 | 11,2 | 11,98 | 1,1 | 0,4 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 1,54 | 1,23 | 2,8 | 11,98 | 1,1 | 0,4 |
| HSD | 0 | 1999 i stariji | 1,54 | 1,23 | 11,6 | 11,98 | 0,9 | 0,4 |
| HSD | I | 2000 do 2011 | 1,54 | 1,23 | 10,4 | 11,98 | 0,9 | 0,4 |
| HSD | II | 2011 do 2016 | 1,54 | 1,23 | 8,2 | 11,98 | 0,9 | 0,4 |
| HSD | III | 2016 i noviji | 1,54 | 1,23 | 2,1 | 11,98 | 0,9 | 0,4 |
| MGO gorivo (0,1%) | | | | | | | | |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 0,184 | 0,169 | 13,8 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 0,184 | 0,169 | 12,2 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 0,184 | 0,169 | 10,5 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 0,184 | 0,169 | 2,6 | 0,362 | 1,4 | 0,6 |
| HSD | 0 | 1999 i stariji | 0,187 | 0,172 | 10,9 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| HSD | I | 2000 do 2011 | 0,187 | 0,172 | 9,8 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| HSD | II | 2011 do 2016 | 0,187 | 0,172 | 7,7 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |
| HSD | III | 2016 i noviji | 0,187 | 0,172 | 2,0 | 0,401 | 1,1 | 0,5 |

Tablica 20. Emisijski faktori stakleničkih plinova za pomoćne dizelske motore pri upotrebi HFO i MGO goriva [4]

| HFO gorivo (2,7%) | IMO Razred | Model, godina ugradnje | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ |
|-------------------|------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 707 | 0,031 | 0,008 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 707 | 0,031 | 0,008 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 707 | 0,031 | 0,008 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 707 | 0,031 | 0,008 |
| HSD | 0 | 1999 i stariji | 707 | 0,031 | 0,008 |
| HSD | I | 2000 do 2011 | 707 | 0,031 | 0,008 |
| HSD | II | 2011 do 2016 | 707 | 0,031 | 0,008 |
| HSD | III | 2016 i noviji | 707 | 0,031 | 0,008 |
| MGO gorivo (0,1%) | | | | | |
| MSD | 0 | 1999 i stariji | 696 | 0,029 | 0,008 |
| MSD | I | 2000 do 2011 | 696 | 0,029 | 0,008 |
| MSD | II | 2011 do 2016 | 696 | 0,029 | 0,008 |
| MSD | III | 2016 i noviji | 696 | 0,029 | 0,008 |
| HSD | 0 | 1999 i stariji | 696 | 0,029 | 0,008 |
| HSD | I | 2000 do 2011 | 696 | 0,029 | 0,008 |
| HSD | II | 2011 do 2016 | 696 | 0,029 | 0,008 |
| HSD | III | 2016 i noviji | 696 | 0,029 | 0,008 |

Osim za glavne i pomoćne motore procijenjeni su emisijski faktori za pomoćne generatore pare (tablica 21 i 22). Udio emisija iz pomoćnih generatora pare se najčešće zanemaruje jer je neusporedivo manji nego iz glavnih i pomoćnih motora.

Tablica 21. Emisijski faktori (g/kWh) za pomoćne generatore pare [4]

| Pomoćni uređaj | Gorivo | IMO Razred | Model, godina ugradnje | PM ₁₀ | PM _{2,5} | NO _x | SO _x | CO | HC |
|----------------|------------|------------|------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|
| Generator pare | HFO (2,7%) | / | Svi | 1,87 | 1,50 | 2,1 | 16,1 | 0,2 | 0,1 |
| Generator pare | MGO (0,1%) | / | Svi | 0,202 | 0,186 | 2,0 | 0,587 | 0,2 | 0,1 |

Tablica 22. Emisijski faktori (g/kWh) stakleničkih plinova za pomoćne brodske generatore pare [4]

| Pomoćni uređaj | Gorivo | IMO Razred | Model, godina ugradnje | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ |
|----------------|------------|------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Generator pare | HFO (2,7%) | / | Svi | 950 | 0,08 | 0,002 |
| Generator pare | MGO (0,1%) | / | Svi | 962 | 0,075 | 0,002 |

Svi tablično prikazani emisijski faktori (osim za generatore pare) su izvedeni s pretpostavkom da je opterećenje propulzije broda iznad 20% od MCR-a. Ispod ove granice smatra se da brodski pogon radi pri niskom opterećenju kod kojeg dolazi do povećanja koncentracije emisija po jedinici snage. Razlog povećanja emisija je zbog toga što dizelski motori pri niskim opterećenjima ne mogu postići efikasnost rada, a posljedično s time dolazi i do povećanja specifične potrošnje goriva. U tablici 23 prikazani su koeficijenti podešavanja emisijskih faktora, koji služe kako bi se izračunali konačni emisijski faktori za niska opterećenja uz pomoć jednadžbe (23).

$$EF = EF_{zadani} \cdot K_{no} \text{ [g/kWh]} \quad (23)$$

gdje je: EF = izračunati emisijski faktor pri niskom opterećenju, izražen u g/kWh, EF_{zadani} = definirani emisijski faktor, K_{no} = koeficijent niskog opterećenja

Koeficijenti niskih opterećenja izvedeni su za dvotaktne sporookretne MAN motore prilikom ispitivanja na probnom stolu. Dodatno su prikazani koeficijenti podešavanja pri niskim opterećenjima za MAN motore koji koriste klizni tip ubrizgača goriva (modeli motora izgrađeni od 2004 god. i kasnije) i s konvencionalnim tipom ubrizgača (modeli motora prije 2004. god.).

Tablica 23. Koeficijenti podešavanja emisijskih faktora za niska opterećenja rada dizelskih motora [4]

| Opterećenje | PM | NO _x | SO ₂ | CO | VOC | CO ₂ | N ₂ O | CH ₄ |
|-------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|------------------|-----------------|
| 2% | 7,29 | 4,63 | 3,30 | 9,68 | 21,18 | 3,28 | 4,63 | 21,18 |
| 3% | 4,33 | 2,92 | 2,45 | 6,46 | 11,68 | 2,44 | 2,92 | 11,68 |
| 4% | 3,09 | 2,21 | 2,02 | 4,84 | 7,71 | 2,01 | 2,21 | 7,71 |
| 5% | 2,44 | 1,83 | 1,77 | 3,89 | 5,61 | 1,76 | 1,83 | 5,61 |
| 6% | 2,04 | 1,60 | 1,60 | 3,25 | 4,35 | 1,59 | 1,60 | 4,35 |
| 7% | 1,79 | 1,45 | 1,47 | 2,79 | 3,52 | 1,47 | 1,45 | 3,52 |
| 8% | 1,61 | 1,35 | 1,38 | 2,45 | 2,95 | 1,38 | 1,35 | 2,95 |
| 9% | 1,48 | 1,27 | 1,31 | 2,18 | 2,52 | 1,31 | 1,27 | 2,52 |
| 10% | 1,38 | 1,22 | 1,26 | 1,96 | 2,18 | 1,25 | 1,22 | 2,18 |
| 11% | 1,30 | 1,17 | 1,21 | 1,79 | 1,96 | 1,21 | 1,17 | 1,96 |
| 12% | 1,24 | 1,14 | 1,17 | 1,64 | 1,76 | 1,17 | 1,14 | 1,76 |
| 13% | 1,19 | 1,11 | 1,14 | 1,52 | 1,60 | 1,14 | 1,11 | 1,60 |
| 14% | 1,15 | 1,08 | 1,11 | 1,41 | 1,47 | 1,11 | 1,08 | 1,47 |
| 15% | 1,11 | 1,06 | 1,09 | 1,32 | 1,36 | 1,08 | 1,06 | 1,36 |
| 16% | 1,08 | 1,05 | 1,06 | 1,24 | 1,26 | 1,06 | 1,05 | 1,26 |
| 17% | 1,06 | 1,03 | 1,05 | 1,17 | 1,18 | 1,04 | 1,03 | 1,18 |
| 18% | 1,04 | 1,02 | 1,03 | 1,11 | 1,11 | 1,03 | 1,02 | 1,11 |
| 19% | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 1,05 | 1,05 | 1,01 | 1,01 | 1,05 |
| 20% | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

U studiji se ne navode koeficijenti podešavanja emisijskih faktora za srednjeokretne i brzoekretne motore uz objašnjenje da se kod rada pomoćnih motora ili električne propulzije pri niskim opterećenjima uglavnom jedan motor isključuje kako bi preostali radili s povećanom učinkovitošću. Ovaj pristup rada se u praksi nastoji izbjegavati iz sigurnosnih razloga, kako bi se uz podjednaku raspodjelu opterećenja pomoćni motori mogli rasteretiti. Nadalje, koeficijenti podešavanja su procijenjeni za niska opterećenja do 20%, dok preostala niska opterećenja (do 50%) nisu analizirana.

3.6. IMO studija

U posljednjoj IMO studiji stakleničkih plinova (4. izdanje, 2020. god.) [2] izrađen je inventar brodskih ispušnih emisija za međunarodnu i nacionalnu plovidbu. Korištene su 'top-down' i 'bottom-up' metode, gdje su uspoređeni rezultati obiju metoda i prikazana je projekcija budućih emisija s obzirom na povećanje pomorskog prometa. U izračun su uključeni svi brodovi iznad 100BT i ispušni plinovi koji sadržavaju stakleničke plinove (CO₂, CH₄, N₂O i HFC – hidrofluorouglikovodici) te ostale onečišćivače (NO_x, SO_x, NMVOC, PM, CO). Inventar obuhvaća period od 2012. do 2018. godine, u kojem se iz dobivenih procjena emisija zaključuje porast stakleničkih plinova od 9,3% (962 milijuna tona CO₂ za 2012. god. i 1056 milijuna tona za 2018. god.). Obje metode u studiji koriste iste jednadžbe i metodologije procjene emisija

koje su objašnjene u prethodnim potpoglavljima, te su u sljedećim tablicama (24, 25, 26, 27, 28 i 29) prikazani korišteni emisijski faktori.

Emisijski faktori za CO₂ su prikazani isključivo za 'top-down' metodu, odnosno izraženi su u ovisnosti o utrošenom gorivu. Vrijednosti IMO studije za CO₂ najčešće se koriste u literaturama prilikom procjena količina CO₂ u odnosu na utrošeno gorivo. Emisijski faktori preuzeti su iz Vodiča za proračun Projektnog indeksa energetske učinkovitosti [116] (engl. 'Energy Efficiency Design Index') i prikazani su tablično (tablica 3) u prethodnom potpoglavlju (3.1). Emisijski faktori za sve stakleničke plinove i onečišćivače u slučaju procjena emisija na osnovi utroška goriva prikazani su u tablici 24. Za slučaje NO_x, SO_x, PM, NMVOC, izraženi emisijski faktori su u kg/toni goriva gdje su vrijednosti dobivene s jednadžbom (18) i uvrštavanjem odgovarajuće specifične potrošnje goriva.

Tablica 24. Emisijski faktori u ovisnosti o utrošku goriva [2]

| Onečišćivač | Vrsta goriva | IMO 4. Studija | | | | | | |
|-------------------|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| CO ₂ | HFO | 3,114 | 3,114 | 3,114 | 3,114 | 3,114 | 3,114 | 3,114 |
| | MDO | 3,206 | 3,206 | 3,206 | 3,206 | 3,206 | 3,206 | 3,206 |
| | LNG | 2,750 | 2,750 | 2,749 | 2,749 | 2,750 | 2,753 | 2,755 |
| CH ₄ | HFO | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | MDO | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | LNG | 5,31 | 6,00 | 7,35 | 8,48 | 10,20 | 11,22 | 11,96 |
| N ₂ O | HFO | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| | MDO | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| | LNG | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| NO _x | HFO | 78,61 | 77,18 | 76,19 | 76,98 | 76,71 | 76,67 | 75,90 |
| | MDO | 53,12 | 52,51 | 52,14 | 57,68 | 57,45 | 57,62 | 56,71 |
| | LNG | 5,60 | 5,90 | 5,82 | 5,99 | 7,46 | 10,95 | 13,44 |
| CO | HFO | 2,83 | 2,84 | 2,83 | 2,86 | 2,86 | 2,87 | 2,88 |
| | MDO | 2,48 | 2,47 | 2,47 | 2,58 | 2,58 | 2,60 | 2,59 |
| | LNG | 1,88 | 2,07 | 2,38 | 2,64 | 3,10 | 3,57 | 3,97 |
| NMVOC | HFO | 3,14 | 3,13 | 3,13 | 3,17 | 3,18 | 3,19 | 3,20 |
| | MDO | 2,16 | 2,15 | 2,15 | 2,39 | 2,39 | 2,42 | 2,40 |
| | LNG | 0,81 | 0,88 | 0,99 | 1,09 | 1,26 | 1,44 | 1,59 |
| SO _x | HFO | 46,63 | 44,80 | 45,31 | 47,90 | 50,44 | 50,83 | 50,83 |
| | MDO | 2,74 | 2,54 | 2,35 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,37 |
| | LNG | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| PM | HFO | 7,11 | 6,96 | 7,01 | 7,26 | 7,48 | 7,53 | 7,55 |
| | MDO | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,90 |
| | LNG | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| PM _{2,5} | HFO | 6,54 | 6,41 | 6,45 | 6,68 | 6,88 | 6,93 | 6,94 |
| | MDO | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,83 |
| | LNG | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| BC | HFO | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| | MDO | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,38 |
| | LNG | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |

U studiji su procijenjene i specifične potrošnje goriva (tablica 25) u ovisnosti o vrsti pogona i goriva, te godini ugradnje motora. Osim konvencionalnih postrojenja uvrštena je i specifična potrošnja goriva za motore na dvojna goriva kod kojih je procijenjena potrošnja LNG goriva 135 g/kWh s dodatnom potrošnjom pilot (MDO) goriva od 6 g/kWh. Proizvođači motora često prikazuju specifičnu potrošnju goriva manjom od stvarne vrijednosti u eksploatacijskim uvjetima i zbog toga često dolazi do odstupanja i u procjenama ispuštenih emisija.

Tablica 25. Specifične potrošnje goriva (g/kWh) za različite vrste pogona, goriva i godine ugradnje [2]

| Vrsta pogona | Vrsta goriva | prije 1983. | 1984-2000. | poslije 2000. |
|---------------------------------|--------------|-------------|------------|-------------------|
| SSD | HFO | 205 | 185 | 175 |
| | MDO | 190 | 175 | 165 |
| MSD | HFO | 215 | 195 | 185 |
| | MDO | 200 | 185 | 175 |
| HSD | HFO | 225 | 205 | 195 |
| | MDO | 210 | 190 | 185 |
| LNG-Diesel (dvojno gorivo) | LNG | / | / | 135 LNG + 6,0 MDO |
| Plinska turbina | HFO | 305 | 305 | 305 |
| | MDO | 300 | 300 | 300 |
| Parna turbina i generatori pare | HFO | 340 | 340 | 340 |
| | MDO | 320 | 320 | 320 |
| Pomoćni motori | HFO | 225 | 205 | 195 |
| | MDO | 210 | 190 | 185 |
| | LNG | / | 173 | 156 |

Emisijski faktori za SO_x (gSO_x/g goriva) prikazani su u tablici 26 za period od 2012. do 2018. godine s pretpostavkom da u tom periodu nisu korištene tehnologije za pročišćavanje dimnih plinova. Vrijednosti u tablici su dobivene s jednadžbom (19) gdje je također pretpostavljeno da se 97,753% sumpora prilikom izgaranja pretvara u SO_x spojeve. Kod HFO goriva emisijski faktori su do 2015. god. malo smanjeni jer se pretpostavlja da su brodovi prilikom ulaska u SECA područja plovidbe koristili nisko sumporno teško gorivo (LSHFO) s udjelom sumpora od 1%. U slučaju MDO goriva, zbog novih ograničenja postotka sumpora u gorivu srednje globalne vrijednosti udjela sumpora se smanjuju. Za alternativna goriva su također procijenjeni emisijski faktori, a u tu skupinu spadaju LNG ($3,17 \cdot 10^{-5}$ gSO_x/g goriva) i metanol ($2,64 \cdot 10^{-3}$ gSO_x/g goriva).

Tablica 26. SO_x emisijski faktori (g SO_x/g goriva) za goriva HFO i MDO

| Vrsta goriva | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| HFO | 0,0491 | 0,0480 | 0,0481 | 0,0479 | 0,0504 | 0,0508 | 0,0508 |
| MDO | 0,0027 | 0,0025 | 0,0023 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0014 |

Energetski zasnovani emisijski faktori (g/kWh) za NO_x spojeve (tablica 27) podijeljeni su po IMO definiranim Razredima za različite kategorije brodskih pogona. Ovisi o nominalnoj brzini motora, godini ugradnje motora koja određuje pripadajući Razred, te o uvjetu da li brod plovi u ECA zaštićenom području. Vrijednosti su određene uz pretpostavku da nijedan brod ne može imati veće emisijske faktore od granica koje su propisane IMO MARPOL Prilogom VI. Emisijski faktori Razreda III primjenjuju se samo u ECA područjima plovidbe, dok izvan područja odgovaraju ograničenja prema Razredu II.

Tablica 27. NO_x emisijski faktori (g/kWh) za različite kategorije goriva, motora i IMO Razreda

| Vrsta motora | HFO, LSHFO, MDO (g/kWh) | | | |
|--------------------------------|-------------------------|----------|-----------|------------|
| | Razred 0 | Razred I | Razred II | Razred III |
| SSD | 18,1 | 17,0 | 14,4 | 3,4 |
| MSD | 14,0 | 13,0 | 10,5 | 2,6 |
| HSD | 10,2 | 9,8 | 7,7 | 2,0 |
| Pomoćni motori | 11,2 | - | - | - |
| Generator pare i parna turbina | 2,1 | - | - | - |
| Plinska turbina | 6,1 | - | - | - |

Ostali relevantni emisijski faktori koji su primijenjeni u IMO studiji su za krute čestice PM₁₀ (tablica 28) i za NMVOC spojeve (tablica 29).

Tablica 28. PM₁₀ emisijski faktori (g/kWh) za različite kategorije pogona i goriva [2]

| Vrsta pogona | Vrsta goriva | EF PM ₁₀ (g/kWh) | | | | | | |
|----------------|--------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| SSD | HFO | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,39 | 1,40 | 1,40 |
| | MDO | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| MSD | HFO | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,39 | 1,40 | 1,40 |
| | MDO | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| HSD | HFO | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,41 | 1,42 | 1,42 |
| | MDO | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 |
| Turbine | HFO | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,41 | 1,42 | 1,42 |
| | MDO | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Pomoćni motori | HFO | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,39 | 1,40 | 1,40 |
| | MDO | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 |

Tablica 29. NMVOC emisijski faktori (g/kWh) za različite vrste pogona i goriva [2]

| Vrsta pogona | HFO, MDO, LSHFO (gNMVOC/kWh) |
|--------------------------------|------------------------------|
| SSD | 0,632 |
| MSD | 0,527 |
| HSD | 0,527 |
| Pomoćni motori | 0,421 |
| Generator pare i parna turbina | 0,105 |
| Plinska turbina | 0,105 |

4. MJERNA OPREMA I MJERENJE SASTAVA ISPUŠNIH PLINOVA

U ovom poglavlju detaljno je opisana korištena mjerna oprema za prikupljanje podataka i analizirana su brodska postrojenja na kojima su provedena eksperimentalna mjerenja s pripadajućim rezultatima. Brodska postrojenja za razliku od stacionarnih rade pri dinamičkom okruženju stoga je potrebno provesti istraživanja i mjerenja pri tim uvjetima. S ciljem prikupljanja relevantnih podataka odnosno izrade baze podataka ispušnih plinova, sva mjerenja ovog istraživanja provedena su za vrijeme eksploatacije broda.

4.1. Mjerni uređaj Testo 350 Maritime v2

Za određivanje sastava ispušnih plinova propisane su norme i standardi koje mjerni uređaji i mjerne metode moraju udovoljavati. Standardi vezani za mjerenja i analizu ispušnih plinova propisani su ISO 8178-2:2021 normom [124] koja se odnosi na mjerenja ispušnih emisija kod stapnih i klipnih motora s unutarnjim izgaranjem.

Za potrebe ovog istraživanja korišten je mjerni uređaj za analizu ispušnih plinova Testo 350 Maritime v2 (slika 11). Ovaj uređaj je kalibriran i optimiziran za korištenje u broskom postrojenju u skladu s MARPOL Prilogom VI i NOx Tehničkim kodeksom. Odobren je za upotrebu od DNV GL Klasifikacijskog društva s pripadajućom svjedodžbom (DNV GL no. TAA0001KO) i od NKClass Nippon Kaiji Kyokai Klasifikacijskog društva (no.14DD001B). Preslike svjedodžbi priložene su u Prilogu I.



Slika 11. Testo 350 Maritime V2 uređaj za analizu ispušnih plinova [125]

Testo mjerni uređaj je dizajniran za mjerenje koncentracije CO₂, CO, NO_x i SO_x-a u ispušnim plinovima i može se koristiti za sljedeće potrebe:

- za periodičan pregled i kontrolu sastava ispušnih plinova uz mogućnost izravnog mjerenja na brodskom motoru
- kao komponenta prilikom ispitivanja i testiranja brodskih uređaja
- za testiranje NO_x granica u ispušnim plinovima propisanim od strane MARPOL Priloga VI i za testiranje učinkovitosti tehnologija za smanjenje NO_x-a
- za određivanje udjela sumpora u ispušnim plinovima, tj. postotku sumpora u korištenom gorivu i provjere jesu li zadovoljene MARPOL specifikacije za ograničenje sumpora u posebnim područjima plovidbe.

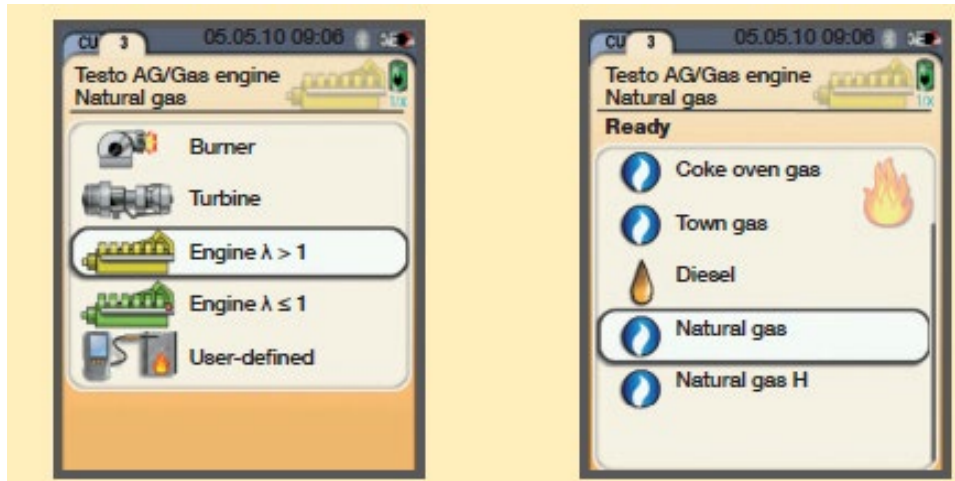
4.1.1. Specifikacije i sastavni dijelovi uređaja

Testo uređaj spada u prijenosne mjerne uređaje i sastoji se od kontrolne jedinice, jedinice za analizu i mjerenje te od mjerne sonde. Sonda je opremljena osjetnikom za mjerenje plinova CO₂ i O₂ u postocima, dok plinove NO_x (NO + NO₂), SO_x i CO mjeri u milijuntim dijelovima – ppm-ima (engl. 'parts per million'). U tablici 30 prikazane su specifikacije mjernog uređaja, odnosno raspon i preciznost mjerenja za sve spomenute plinove. Sonda uređaja je opremljena i osjetnikom za mjerenje temperature ispušnih plinova koji može očitavati temperature i do +1000°C. Odstupanja prilikom mjerenja u toleranciji su s MARPOL Prilog VI standardima, koja za CO₂ i O₂ iznose 0,2 % vol., dok za NO_x, SO_x i CO iznose ± 5 ppm.

Tablica 30. Raspon mjerenja i preciznost mjerenja za određene plinove [125]

| Mjerni parametar | Raspon mjerenja | Tolerancija/preciznost |
|---------------------|-----------------|--|
| °C, ispušni plin | -40 – 1000°C | max. ± 5K |
| O ₂ | 0 – 25% | ± 0,2 vol% |
| CO | 0 – 3000 ppm | Prema MARPOL Prilogu VI ili NO _x Tehničkom kodeksu 2008 |
| CO ₂ | 0 – 40% vol | |
| NO | 0 – 3000 ppm | |
| NO ₂ | 0 – 500 ppm | |
| SO ₂ | 100 – 3000 ppm | |
| Apsolutni tlak | 600 – 1150 hPa | ± 10 hPa pri -5 do -45°C |
| Diferencijalni tlak | -200 – 200 hPa | 0,1 hPa |

Testo 350 Maritime v2 uređaj je model koji je optimiziran za brodska postrojenja i s toga nudi mogućnost izbora vrste goriva i pogonskog stroja na kojem se mjerenje izvršava. Osim za mjerenja na motorima s unutarnjim izgaranjem, kompatibilan je i za mjerenja na brodskim generatorima pare i plinskim turbinama. Na slici 12 je prikazano sučelje kontrolne jedinice gdje se prvo odabire lokacija mjerenja (vrsta pogona), a zatim vrsta goriva koja je određena po udjelu sumpora. Nakon odabira dizelskog goriva, potrebno je izabrati podkategoriju goriva čiji postotak sumpora određuje kalibraciju osjetljivosti osjetnika.



Slika 12. Sučelje za odabir vrste pogona i korištenog goriva [125]

Tablica 31. Vrste goriva s pripadajućim specifikacijama [125]

| Gorivo | Oznaka | Udio sumpora % | Udio ugljika % | Udio vodika % |
|--------------------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| Destilirana goriva | DMX | 1,0 | 86,2 | 13,6 |
| | DMA | 1,5 | | |
| | DMB | 2 | | |
| | DMC | 2 | | |
| Ostatna goriva | RMA 30 | 3,5 | 86,1 | 10,9 |
| | RMB 30 | 3,5 | | |
| | RMD 80 | 4 | | |
| | RME 180 | 4,5 | | |
| | RMF 180 | 4,5 | | |
| | RMG 380 | 4,5 | | |
| | RMH 380 | 4,5 | | |
| | RMK 380 | 4,5 | | |
| RMH 700 | 4,5 | | | |
| Nisko sumporno dizelsko gorivo | MDO 0,1S | 0,1 | 86,2 | 13,6 |

U tablici 31 prikazane su sve vrste goriva koje je moguće odabrati prilikom izbora postavki mjerenja. Za potrebe ovog istraživanja izabrano je nisko sumporno dizelsko gorivo s 0,1 % sumpora, jer su brodovi prilikom plovidbe koristili isključivo tu vrstu goriva.



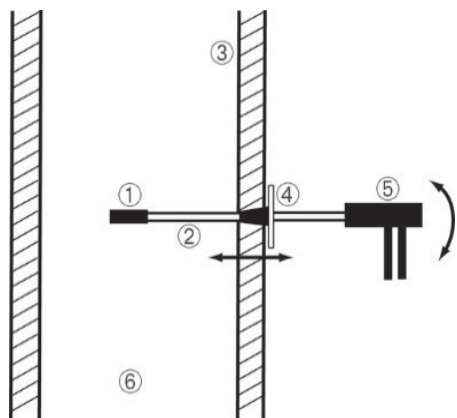
Slika 13. Kontrolna jedinica uređaja



Slika 14. Jedinica za analizu ispušnih plinova

Podešavanje svih postavki uređaja obavlja se preko kontrolne jedinice (slika 13), a ujedno se koristi i za nadziranje emisija prilikom procesa mjerenja. Na dnu se nalaze priključci za povezivanje s jedinicom za analizu (slika 14) i USB priključci za prijenos podataka. U jedinici za analizu nalaze se filteri svježeg zraka za ispiranje uređaja, filteri za ispušne plinove, sakupljač kondenzata, pumpa za uzorak plinova i šest osjetnika za sve spomenute plinove koji se mogu izmjeriti. Na bočnoj strani jedinice nalaze se otvori za ulaz svježeg zraka i izlaz ispušnih plinova, čime se postiže efikasna izolacija toplinskog opterećenja, odnosno zaštita elektronskih dijelova i osjetnika. Ovaj uređaj ne preporuča se za dugotrajna mjerenja bez prekida jer može doći do onečišćenja filtra i osjetnika, što u konačnici dovodi do netočnih rezultata mjerenja. Iz tog razloga postoji program ispiranja sonde uređaja sa svježim zrakom koji se automatski uključuje nakon prekida mjerenja, a moguće ga je podesiti na kontrolnoj jedinici. Program ispiranja postavlja se ovisno o koncentraciji plina (ppm), te je postavljen na preporučenih 5 minuta. Radi zaštite osjetnika od onečišćenja postoji dodatna mogućnost postavljanja programa za razrjeđivanje plinova koji se mjere.

Odabir mjerne sonde ovisi o temperaturi i tlaku ispušnih plinova, te duljini ispušnog voda u kojem mjerimo koncentraciju plinova. Mjerna sonda za brodske motore (slika 16) izrađena je od nehrđajućeg čelika i može biti izložena temperaturama i do 1000°C.



Slika 15. Instalacija sonde prilikom mjerenja [125]



Slika 16. Mjerna sonda uređaja Testo 350 Maritime [125]

Slika 15 prikazuje sastavne dijelove sonde i instalaciju tj. pravilno pozicioniranje sonde za vrijeme mjerenje. Preporuča se da vrh sonde bude u žarišnim točkama ispušnih plinova gdje su najveće temperature. Također, u uputstvima se ne preporučuje mjerenje blizu margina ispušnog voda jer može doći do oštećenja sonde prilikom velikih vibracija koje su uobičajene za brodsko postrojenje.

Sastavni dijelovi mjerne sonde (slika 15) :

1. filter na vrhu sonde
2. osovinu sonde
3. stjenka ispušnog kolektora
4. zaporni dio osovine
5. ručka s priključcima za prolazaka ispušnih plinova
6. ispušni kolektor.

Zaporni dio osovine je pomični dio s kojim se može podesiti dubina postavljanja sonde u ispušni kolektor. Sva mjerenja su odrađena na lokacijama neposredno iznad ispušnog dijela turbo-puhala gdje ispušni plinovi imaju kvalitetnu homogenu smjesu, te je sonda bila postavljena u centru ispušnog kolektora. Na ručki sonde nalaze se priključci za prijenos uzorka ispušnih plinova do jedinice za analizu i termometar za očitavanje temperature s konekcijom na osovinu.

Kako bi mjerenja bila u skladu s MEPC.103(49) -Vodičem za izravna mjerenja na brodu i NOx verifikaciju [126], potrebno je prije mjerenja izmjeriti vlagu i temperaturu okolnog zraka. Za tu potrebu korišten je Testo 610 uređaj (slika 17) s kojim se prije svakog mjerenja izmjeri vlaga (%) i temperatura zraka (°C), te se zatim izmjereni podaci unose uz pomoć kontrolne jedinice.



Slika 17. Testo 610 - uređaj za mjerenje vlage i temperature

Izmjereni podaci pohranjuju se u internu memoriju (kapacitet memorije 250000 podataka) Testo uređaja s mogućnošću bežičnog prebacivanja podataka („Bluetooth“) ili žičnog s povezivanjem prijenosnog uređaja i kontrolne jedinice (slika 18). Nakon prijena podataka na računalo, podaci se obrađuju s Testo 'easyEmission' programom i prebacuju se u Excel format. Uređaj ima i podršku za ispis podataka preko svog bežičnog printera.



Slika 18. Mogućnosti prijena izmjerenih podataka [125]

4.2. Eksperimentalna mjerenja i prikupljanje podataka

Sva prethodno opisana mjerna oprema korištena je prilikom mjerenja ispušnih emisija za vrijeme eksploatacije broda. Istraživanje je provedeno na tri različita Ro-Pax brodska postrojenja kompanije Jadrolinija u međunarodnim linijama između pomorskih luka Hrvatske, Italije i Crne Gore. Istraživanje je započelo 2019. godine u sklopu međunarodnog projekta GUTTA ('savinG fUel and emissions from mariTime Transport in the Adriatic region').

4.2.1. GUTTA projekt

U prevedenom značenju GUTTA projekt predstavlja uštedu i smanjenje goriva i emisija iz pomorskog prometa u Jadranskom moru. Projekt je trajao tri godine (2019. do 2022. god.) uz vodećeg partnera projekta CMCC (Euro-mediteranskog centra za klimatske promjene) i projektne partnere Mare Nostrum – Hrvatske udruge brodara, Sveučilišta u Zadru, Ministarstva mora, prometa i infrastrukture RH i Lučke uprave južnog Jadrana.

Glavni ciljevi projekta:

- dekarbonizacija postojećih prekograničnih pomorskih ruta između Italije i Hrvatske uz pomoć programskih alata za optimizaciju rute
- predlaganje novih nisko-ugljičnih pomorskih ruta
- podrška provedbe MRV Uredbe 2015/757 Europske unije o praćenju emisija ugljikova dioksida u pomorskom prometu
- određivanje utjecaja COVID-19 pandemije na trajektni promet u Europi.

Primarni ishod projekta je izrađeni operativni web program GUTTA-VISIR za izračunavanje i predlaganje eko trajektnih ruta u Jadranskom i Sjevernom Jonskom moru na temelju meteo-oceanografskih prognoza. Besplatan je i dostupan kao web aplikacija [127] uz pomoć kojeg se može odrediti ekološki optimalna ruta između dvije luke u odnosu na vremenske uvjete. Mannarini G., u članku [128] detaljno opisuje primjenu aplikacije i mogućnosti smanjenja CO₂ emisija pri odabiru najpovoljnije eko rute. Drugi odrađeni ishod projekta je procjena utjecaja COVID-19 [129] na trajektni promet analizom baze podataka THETIS EMSA-e.

4.2.2. Opis postrojenja Ro-Pax brodova

Uz pomoć opisanog projekta realizirana su mjerenja emisija za vrijeme eksploatacije Ro-Pax brodova, te su nakon završetka projekta nastavljena dodatna mjerenja 2023. godine radi prikupljanja obuhvatne baze podataka.

Provedena mjerenja odrađena su na sljedeća tri Ro-Pax broda:

- M/T Marko Polo
- M/T Zadar
- M/T Dubrovnik.



Slika 19. M/T Marko Polo [130]



Slika 20. M/T Zadar [131]



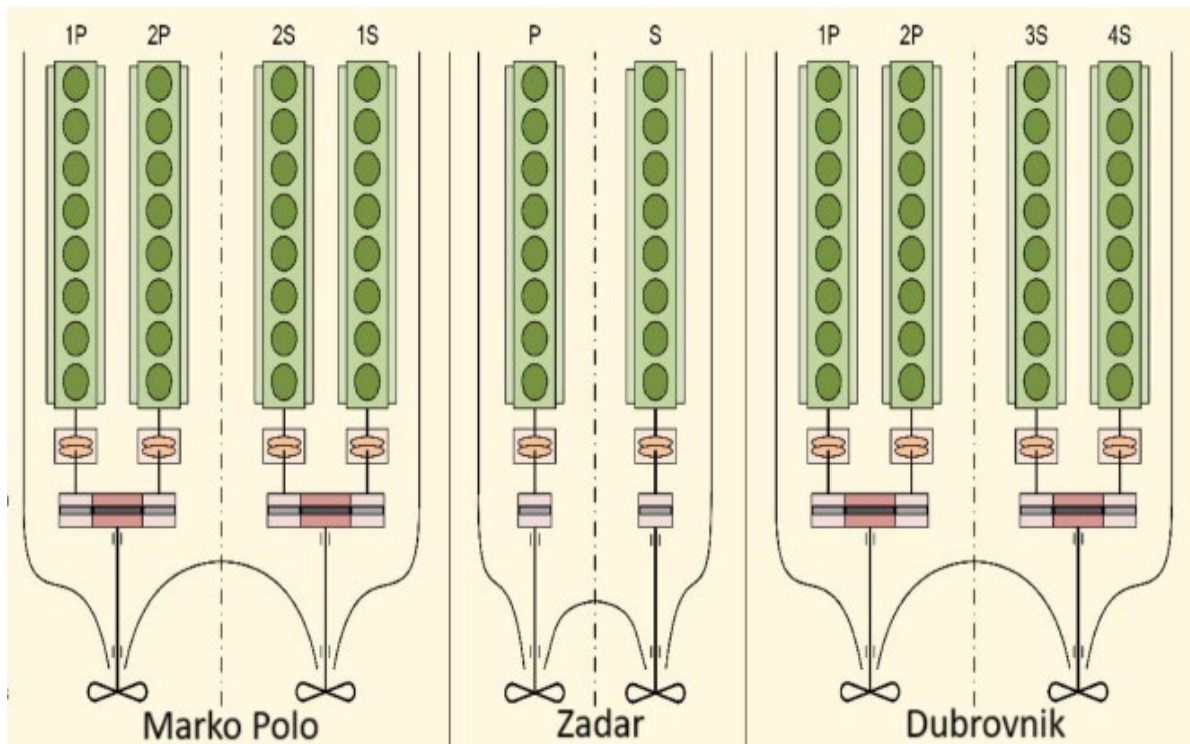
Slika 21. M/T Dubrovnik [132]

Putnički trajekt Marko Polo izgrađen je 1973. godine u Ateliers&Chantiers (Le Havre) brodogradilištu, te plovi pod hrvatskom zastavom s matičnom lukom upisa u Rijeci. Pogonjen je s četiri glavna pogonska motora marke 'Stork Werkspoor Diesel' i može postići maksimalnu brzinu od 19,5 čv. Ukupna instalirana porivna snaga iznosi 15000 kW, dok pojedinačna maksimalna snaga motora iznosi 3750 kW. Za proizvodnju električne energije od 380 i 220V koristi četiri dizelska generatora ('Nohab Polar SF16RS') snage 782 kW. Putnički trajekt Zadar izgrađen je 1993. godine u španjolskom brodogradilištu Astilleros Barreras s matičnom lukom upisa u Rijeci. Glavno pogonsko postrojenje sastoji se od dva četverotaktna dizelska motora 'Bazan MAN B&W' s maksimalnom pojedinačnom snagom od 3500kW. Maksimalnu brzinu od 17,5 čv. postiže s ukupnom instaliranom snagom od 7000kW. Putnički trajekt Dubrovnik izgrađen je 1976. godine u Irskoj - Verolme Cork Dockyards i od 1996. do 2023. godine plovi pod hrvatskom zastavom. Pogonjen je s četiri glavna pogonska motora 'MaK Diesel' s instaliranom pojedinačnom snagom od 3310 kW. Ukupna instalirana snaga mu je 13240 kW, dok za proizvodnju električne energije posjeduje četiri dizelska generatora snage 570 kW. Sve bitne specifikacije ova tri Ro-Pax broda predstavljanje su u tablici 32.

Tablica 32. Specifikacije Ro-Pax brodova: Marko Polo, Zadar, Dubrovnik

| Parametri | M/T Marko Polo | M/T Zadar | M/T Dubrovnik |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------|
| IMO broj | 7230599 | 9021485 | 7615048 |
| Pozivni znak | 9AED | 9A9766 | 3E2367 |
| Godina izgradnje | 1973 | 1993 | 1979 |
| Dužina preko svega (m) | 128,13 | 116 | 125 |
| Širina (m) | 19,62 | 18,9 | 18,5 |
| Gaz (m) | 5,73 | 5,2 | 5,3 |
| Brzina broda (čv) | 19,5 | 17,5 | 20,0 |
| Bruto tonaža | 10154 | 9487 | 9795 |
| Model motora | Stork Werkspoor Diesel 8TM410 | Bazan MAN B&W 8L40/54 A | MaK Diesel 8M551AK |
| Broj motora/vijka | 4/2 | 2/2 | 4/2 |
| Snaga motora MCR (kW) | 3750 | 3500 | 3310 |
| Broj cilindra | 8 | 8 | 8 |
| Okretaji motora (min ⁻¹) | 550 | 428 | 425 |
| Okretaji vijka (min ⁻¹) | 250 | 225 | 245 |
| Promjer cilindra (mm) | 410 | 400 | 450 |
| Hod stapa (mm) | 470 | 540 | 550 |
| Srednji efektivni tlak (bar) | 16,82 | 18,45 | 13,3 |
| Prosječna duljina plovidbe (Nm) | 136,7 | 102,6 | 115 |
| Prosječan brzina (čv) | 13,4 | 11,6 | 12,1 |

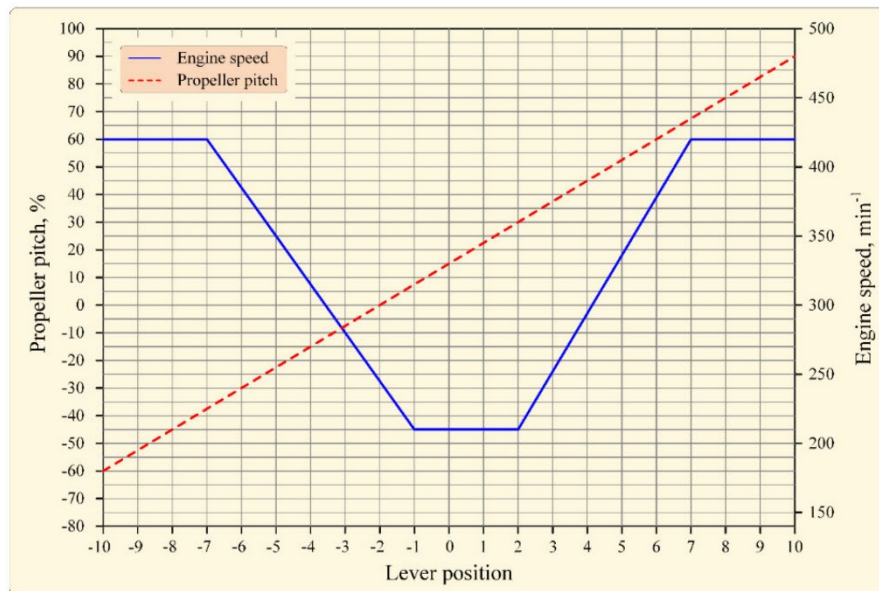
Svi glavni propulzijski motori na kojima je odrađeno mjerenje emisija su četverotaktni dizelski motori (8 cilindara), čije je otvaranje i zatvaranje ventila te rad visokotlačne pumpe goriva kontrolirano s bregastim vratilom. Na slici 22 prikazana je shema glavnih propulzijskih motora za sva tri Ro-Pax broda.



Slika 22. Shema postrojenja Ro-Pax brodova [133]

M/T Marko Polo posjeduje četiri glavna pogonska motora, koja su spojena u paru na jedan osovinski vod koji preko reduktora vodi do broskog vijka sa zakretnim krilima (engl. 'CPP-Controllable pitch propeller'). Dva motora pogone lijevi osovinski vod i označena su na slici s P (engl. 'portside'), dok druga dva motora označena s S (engl. 'starboard') pogone desni osovinski vod. Oba motora na lijevoj i desnoj strani imaju svoj zajednički ispušni kolektor. Raspored glavnih motora isti je i na M/T Dubrovnik, gdje su četiri motora (dva lijeva i dva desna) spojena u paru s pripadajućim osovinskim vodom i CPP vijkom. U slučaju M/T Zadar, postrojenje se sastoji od dva glavna motora (lijevi i desni) s osam cilindara, koji su spojeni zasebno svaki na svoj osovinski vod s CPP vijkom.

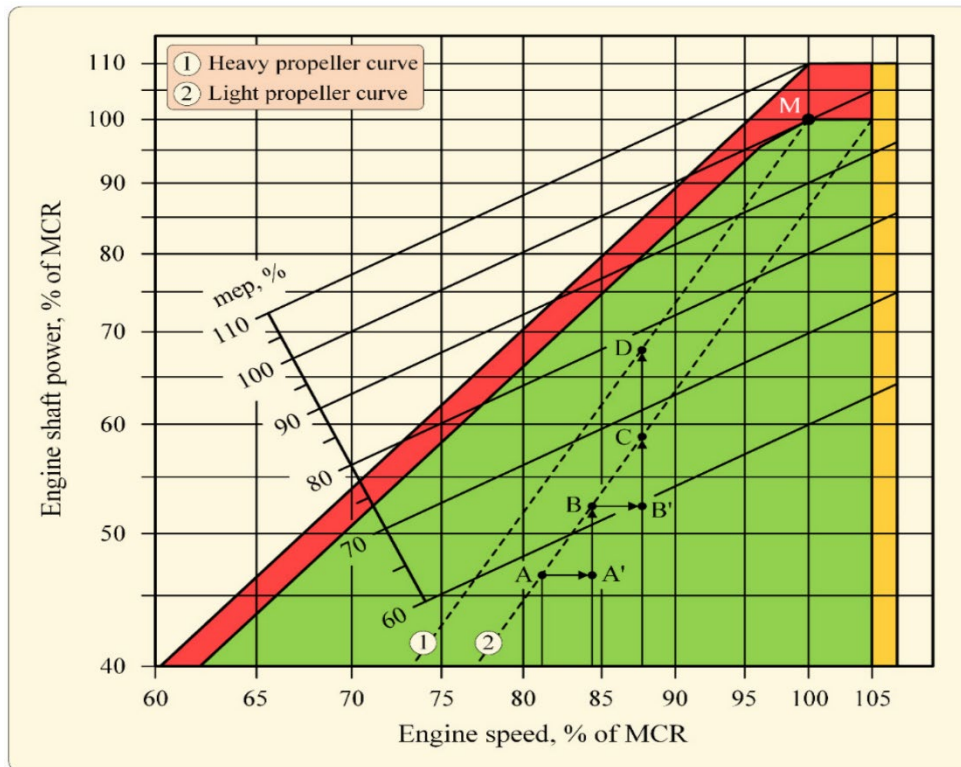
Promjena radnog opterećenja motora i uspona vijka (engl.'pitch') utječe na brzinu motora, trenutnu snagu, temperaturu ispušnih plinova, te posljedično i na koncentraciju emisija. Na slici 23 prikazan je primjer utjecaja promjene uspona vijka i položaja telegrafске ručke na brzinu motora.



Slika 23. Primjer odnosa uspona vijka, telegrafске ručke i brzine motora [133]

U slučaju pomaka telegrafске ručke električni signal dolazi do CPP kontrolne jedinice. Ako se želi povećati brzina motora, pozicija telegrafске ručke se mora postaviti na položaj veći od točke 2 na apscisi. Pozitivne vrijednosti na apscisi predstavljaju vožnju broda u smjeru pramca, dok negativne vrijednosti predstavljaju vožnju krmom. Do povećanja brzine motora (puna linija) doći će ako se položaj ručke postavi između točaka 2 i 7, što će ujedno rezultirati i povećanjem uspona vijka (isprekidana linija). Svako dodatno povećanje položaja ručke (od 7 do 10) neće utjecati na brzinu motora ali će dovesti do povećanja uspona vijka, a s time i do povećanja opterećenja motora. Isto radno načelo vrijedi i za negativne vrijednosti na apscisi, odnosno u slučaju vožnje krmom.

Na dijagramu opterećenja motora pri radu s CPP vijkom (slika 24) prikazan je utjecaj promjene brzine na uspona vijka, opterećenje motora i srednji efektivni tlak u cilindrima (engl. mean effective pressure – mep) u postocima (%). Linija 1 (engl. 'heavy propeller curve') označava liniju pri radu u otežanim vremenskim uvjetima ili u slučaju obraštanja trupa broda. Ako se uspon vijka i brzina motora održavaju konstantnom (točka C) s pripadajućom snagom na osovini i srednjim efektivnim tlakom u cilindrima, sav višak opterećenja uzrokovat će promjenu linije rada vijka (od točke C do D).



Slika 24. Dijagram opterećenja motora i radno područje s CPP vijkom [133]

Kod standardne (lake) radne linije 2 (engl. 'light propeller curve') prilikom povećanja opterećenja, prvo dolazi do povećanja brzine motora (npr. od točke A do A'), a zatim do povećanja uspona vijka (npr. od točke A' do B). Prilikom smanjenja opterećenja, prvo se uspon vijka smanjuje (npr. od C do B'), a zatim brzina motora (npr. od B' do B).

Vrsta korištenog goriva ima značajan utjecaj na ispušne emisije, te je stoga bitno ustanoviti koje se gorivo koristilo za vrijeme istraživanja. Kako bi se ustanovila kvaliteta i kemijski sastav goriva, od upravitelja stroja je zatražena otpremnica spremišta za gorivo dostavljena od distributera. Ustanovljeno je da su sva tri Ro-Pax broda koristila MDO brodsko gorivo – INA Marine Eurodizel s maksimalnim dopuštenim sadržajem sumpora od 0,1%. Deklaracija kvalitete (tablica 33, Prilog 1) izrađena je na temelju Ispitnog izvješća po rezultatima analize uzorka goriva u laboratoriju akreditiranom prema normi standarda HRN ISO/IEC 17025. Iz tablice je vidljivo da sadržaj sumpora (6,2 mg/kg) ne prelazi graničnu vrijednost od 10 mg/kg, odnosno 0,1%.

Tablica 33. Deklaracije kvalitete INA Marine Eurodizel goriva

| Značajka | Jedinica | Metoda ispitivanja | Granična vrijednost | Rezultat |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Kinematička viskoznost pri 40°C | mm ² /s | HRN EN ISO 3104 | 2,000 – 6,000 | 2,823 |
| Gustoća pri 15°C | kg/m ³ | HRN EN ISO 12185 | najviše/max. 890,0 | 833,1 |
| Cetanski indeks | | HRN EN ISO 4264 | najniže/min. 46,0 | 52,9 |
| Količina ukupnog sumpora | mg/kg | HRN EN ISO 20846 | najviše/max. 10,0 | 6,2 |
| Točka paljenja | °C | HRN EN ISO 2719 | najniže/min. 60,0 | 65,0 |
| Vodikov sulfid H ₂ S | mg/kg | IP 570 | najviše/max. 2,0 | <0,400 |
| Kiselinski broj | mg KOH/g | ASTM D 664 | najviše/max. 0,50 | 0,06 |
| Okidacija stabilnost | g/m ³ | HRN EN ISO 12205 | najviše/max. 25 | <25 |
| Točka zamucenja | °C | HRN ISO 3015 | iskazuje se/report | - 4 |
| Točka filtrabilnosti | °C | HRN EN 116 | HRN EN 116 | -9 |
| Točka tečenja | °C | HRN ISO 3016 | HRN ISO 3016 | - 15 |
| Izgled | | Vizualno | bistar i proziran | bistar i proziran |
| Količina pepela | %(m/m) | HRN EN ISO 6245 | najniže/min. 0,010 | <0,001 |
| Mazivost | µm | HRN EN ISO 12156 | najviše/max. 460 | 440 |

4.2.3. Rute plovidbe

S ciljem prikupljanja obuhvatne baze podataka, eksperimentalna mjerenja izvršena su za vrijeme eksploatacije u fazama plovidbe i manevriranja broda. Mjerenja su provedena na sljedećim rutama, tj. prekograničnim trajektnim linijama:

- Split – Ancona – Split (M/T Marko Polo)
- Split – Dubrovnik – Bari – Split (M/T Marko Polo)
- Zadar – Ancona – Zadar (M/T Zadar)
- Dubrovnik – Bari – Bar (M/T Dubrovnik).

M/T Marko Polo plovio je rutama između luka Hrvatske, Italije i Crne Gore. Prvo putovanje na kojem su obavljena mjerenja bilo je 2019. godine na ruti Split – Ancona. Duljina rute iznosi 158,6 Nm, dok je prosječna brzina broda bila 13,4 čvora, a prosječan smjer plovidbe broda (smjer u kojem se većina plovidbe odvijala) 260° u smjeru Split – Ancona i 99° u smjeru Ancona – Split. Prosječna brzina vjetera iznosila je 8,3 m/s sa smjerom od 128° u odnosu na stvarni (pravi) sjever, dok je stanje na moru iznosilo 5 po Beaufortovoj ljestvici.

Za vrijeme plovidbe broda u pogonu su uključena dva glavna motora (jedan lijevi i jedan desni) koji pogone obje osovine. Plovidba se odvijala u noćim satima s prosječnim vremenom trajanja od 9-10h i početkom manevriranja između 20 i 21 h. Prilikom povratka, u radu su bila druga dva motora koja nisu bila korištena u prethodnoj plovidbi. Višestruka mjerenja su obavljena svakih sat vremena na motorima koji su tad bili u pogonu. Istraživanje na ruti između luka Split i Ancone (slika 25) provedeno je 2019. i 2022. godine.



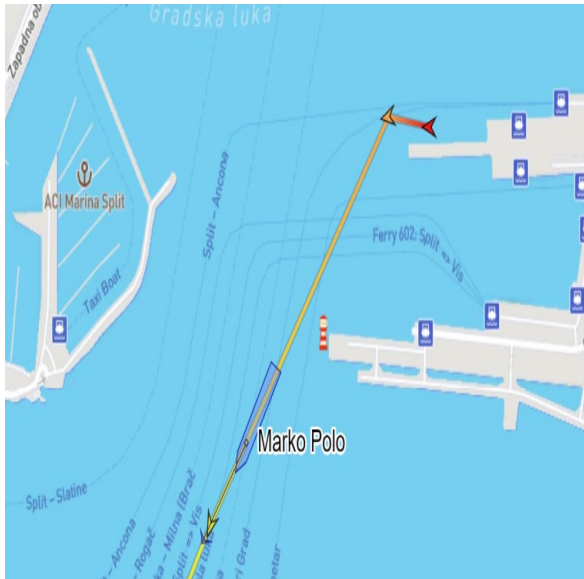
Slika 25. M/T Marko Polo na ruti Split – Ancona

Na slici 26 prikazana je ruta između luka Split – Ancona – Dubrovnik – Bari na kojoj su provedena mjerenja 2023. godine. Udaljenost između luke Split i Dubrovnik iznosi 133,4 Nm, a između luke Dubrovnik i Bari iznosi 115,9 Nm. Mjerenja su također izvršena na glavnim motorima za vrijeme faze plovidbe i manevriranja.

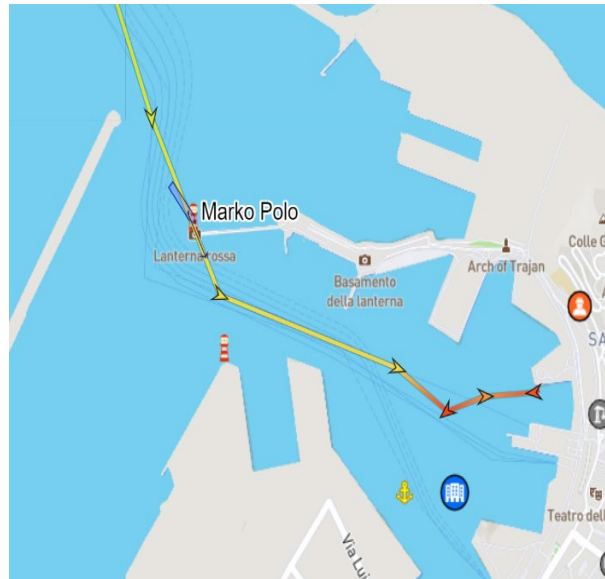


Slika 26. M/T Marko Polo na ruti Split -Ancona -Split -Dubrovnik-Bari

Primjer dolaska ili odlaska broda iz luke prikazan je na slikama 27 i 28. Trajanje faze manevriranja započinje od početka pilotaže broda uz pomoć pilota i tegljača, do završetka pilotaže i sigurnog odlaska iz luke. Prosječno vrijeme trajanja manevriranja iznosilo je 20 min. (manevriranje od/do terminala luke Ancona je dužeg vremenskog perioda zbog duljeg puta pristajanja i položaja lukobrana), gdje su mjerenja započela od početka upućivanja motora do postignuća nominalnog radnog opterećenja rada motora. Prosječna brzina broda za vrijeme manevriranja iznosila je 3,4 čv. do povećanja brzine na prosječnih 7,8 čv.

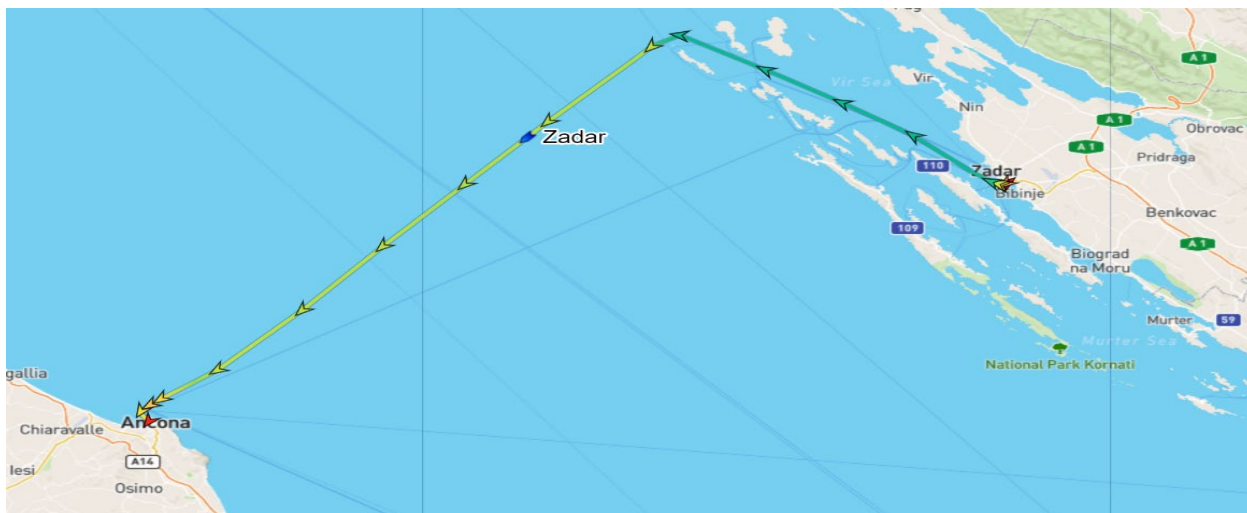


Slika 27. Manevriranje broda u luci Split



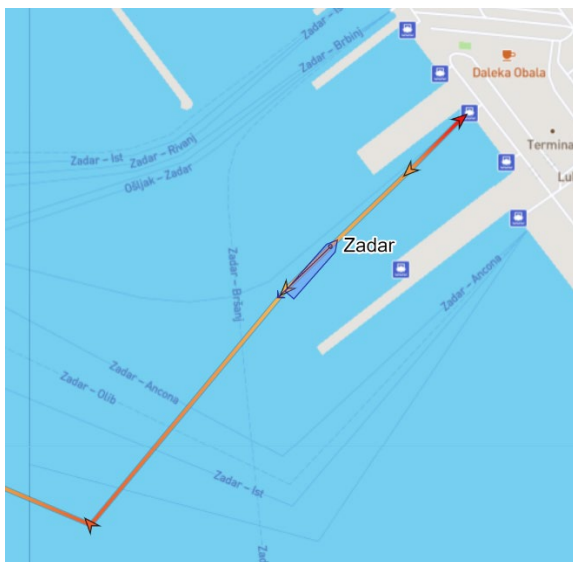
Slika 28. Manevriranje broda u luci Ancona

Mjerenja emisija na M/T Zadru odrađena su 2019. godine na ruti između putničke luke Zadar i luke Ancona (slika 29). Duljina ove rute iznosi 123,3 Nm, prosječna brzina broda iznosila je 11,6 čv., dok je prosječan smjer plovidbe broda bio 245° u smjeru Zadar – Ancona i 65° u smjeru Ancona – Zadar. Za vrijeme putovanja prosječna brzina vjetera iznosila je 3,2 m/s sa smjerom od 189° u odnosu na stvarni sjever, a stanje mora iznosilo je 2 po Beaufortovoj ljestvici. Mjerenja su izvršena na oba glavna motora koja su bila u pogonu za vrijeme plovidbe i manevriranja.

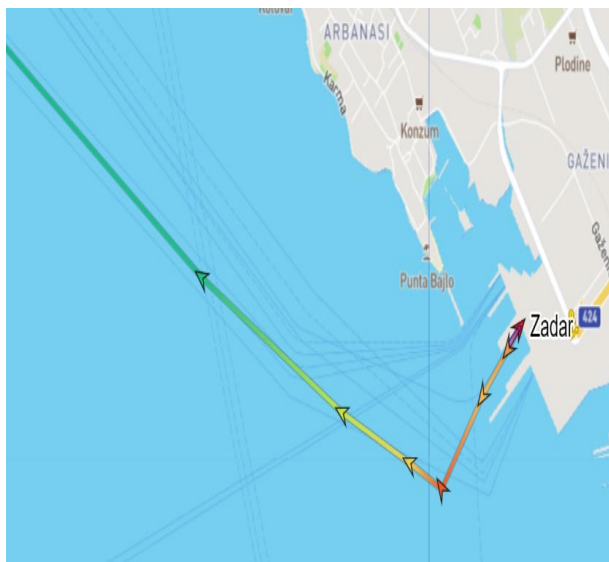


Slika 29. M/T Zadar na ruti Zadar - Ancona

Na slikama 30 i 31 prikazana je faza manevriranja u trajektnoj luci Zadar (Gaženica). Slika 30 prikazuje početak manevriranja i izlazak iz putničkog terminala, dok je na slici 31 prikazana preostala ruta manevriranja do početka povećanja brzine i opterećenja motora. Crvena i žuta boja označavaju smanjenje brzine rada motora, dok zelena boja predstavlja povećanje brzine i postignuće nominalnog broja okretaja motora. Manevriranje u luci Ancona prikazana je na prošlom primjeru, s toga u slučaju M/T Zadra neće biti prikazana jer je ruta identična.



Slika 30. Manevriranje broda u trajektnoj luci Zadar (Gaženica)

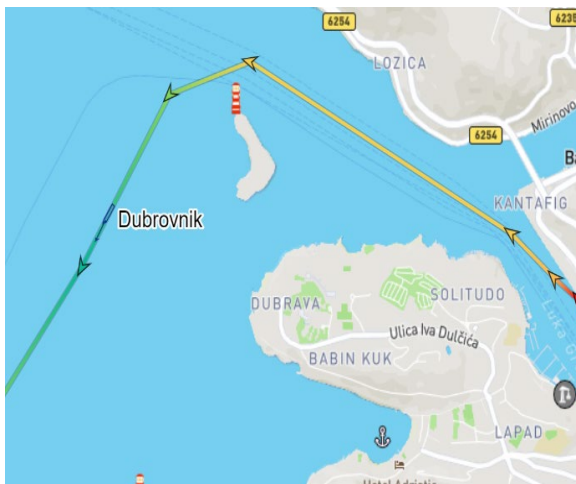


Slika 31. Manevriranje broda pri izlasku iz trajektno luke Zadar (Gaženica)

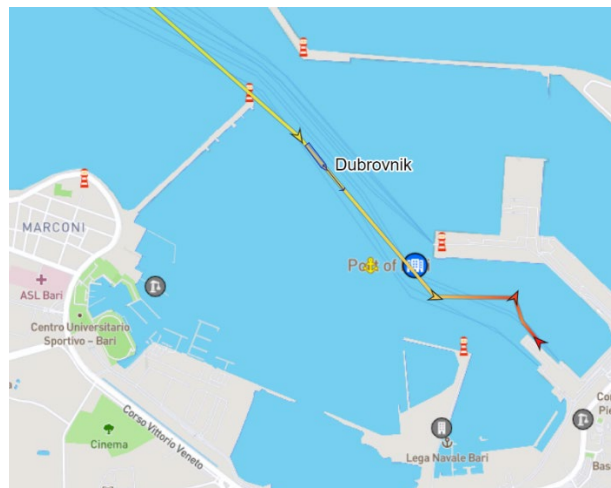


Slika 32. M/T Dubrovnik na ruti Dubrovnik - Bari - Bar

Putovanje M/T Dubrovnika na ruti između luka Dubrovnik, Bari i Bar prikazano je na slici 32. Mjerenja su odrađena 2019. godine i uključuju izmjerene emisije za vrijeme faze plovidbe i manevriranja (slika 33 i 34). Udaljenost rute između luka Dubrovnik i Bari iznosi 115,6 Nm, a između luka Bari i Bar 144,7 Nm. Prosječna brzina je iznosila 12,1 čv., a prosječan smjer plovidbe broda bio je 210° u smjeru Dubrovnik – Bari i 61° u smjeru Bari – Bar¹. Prosječna brzina vjetera iznosila je 3,1 m/s sa smjerom od 167° u odnosu na stvarni sjever, dok je stanje na moru iznosilo 2 po Beaufortovoj ljestvici. Mjerenja za vrijeme plovidbe su obavljena na sva četiri glavna motora.



Slika 33. Manevriranje broda u putničkoj luci Gruž (Dubrovnik)

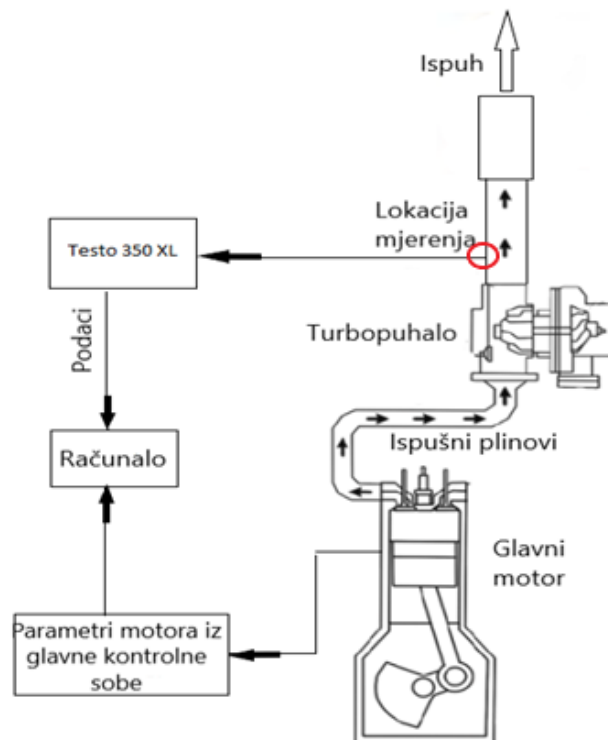


Slika 34. Manevriranje broda u luci Bari

¹ nap.a. Mjerenja u fazi manevriranja za luku Bar nisu odrađena, jer označava završetak putovanja i luku iskrcaja

4.2.4. Eksperimentalna mjerenja

Na prethodno opisanim rutama odrađena su eksperimentalna mjerenja emisija ispušnih plinova pri različitim opterećenjima glavnih motora. Uz upotrebu Testo 350 uređaja izmjerene su koncentracije ispušnih plinova i kreirana je baza podataka za plinove CO₂ (%), CO (ppm), NO_x (ppm) i O₂ (%). Prikupljanje i prijenos relevantnih podataka prikazano je na slici 35. Osim izmjerenih podataka svi varijabilni parametri koji utječu na proces izgaranja u motorima, a samim time i na koncentraciju ispušnih plinova, preuzeti su s mjernih instrumenata u glavnoj kontrolnoj sobi brodske strojarnice. U ovu skupinu spadaju podaci o brzini okretaja motora, turbo-puhala i osovine broda (rpm), temperature ispušnih plinova prije i poslije turbo-puhala (°C), trenutno opterećenje motora (%MCR), tlak ulja za podmazivanje (bar), temperatura rashladne vode (°C), temperatura i tlak ispirnog zraka i indeks ubrizgavanja pumpe goriva. Na skiciranoj shemi vidljiva je i lokacija mjerenja, odnosno mjesto priključenja sonde uređaja koje se nalazi iznad ispušne strane turbo-puhala.



Slika 35. Shema postavljanja mjerne opreme i prijenosa podataka

Odabir lokacije uzimanja uzorka mjerenja je od iznimne važnosti jer može utjecati na rezultate mjerenja. Nakon procesa izgaranja ispušni plinovi prije odlaska u atmosferu prolaze kroz plinsku stranu turbo-puhala (turbina) u ispušni kolektor. Na tome putu dio ispušnih plinova se ohladi i mjerenja pri tim uvjetima ne bi bila mjerodavna, jer se ne očitava početna temperatura ispušnih plinova koja je bitan parametar za ovo istraživanje. Iz tog razloga mjerenja su odrađena na lokaciji neposredno iznad ispušne strane turbo-puhala (slika 36 i 37) gdje je ugrađen kuglični ventil (slika 38 i 39) kroz koji prolazi sonda uređaja. Ventilni su postavljeni na ispušnim granama svih glavnih motora na kojima su obavljena mjerenja.



Slika 36. Lokacija mjerenja i priključak sonde



Slika 37. Prikaz mjerenja i priključka sonde



Slika 38. Kuglični ventil za priključak sonde



Slika 39. Kuglični ventil za priključak sonde 2

Prije početka mjerenja na kontrolnoj jedinici uređaja postavi se željeni program pohrane podataka, tj. vremenski interval između dva očitavanja. Program je najčešće bio postavljen da očitava i pohranjuje izmjerene podatke svakih tri ili pet sekundi. Radi boljeg uvida u program pohrane podataka za primjer su kreirane tablice 34 i 35 na temelju izvoda iz mjerenja na M/T Marko Polu i M/T Dubrovniku. U tablicama je osim izmjerenih vrijednosti ispušnih plinova vidljivo i vrijeme pohrane podataka, gdje je u slučaju tablice 34 postavljeno na pet sekundi, dok kod tablice 35 na tri sekunde.

Tablica 34. Izvod iz izmjerenih podataka (M/T Dubrovnik) s programom pohrane postavljenim na 5 sekundi

| Datum/Vrijeme | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | NO _x (ppm) | CO (ppm) | SO _x (ppm) | Tisp (°C) |
|----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------|
| 15.10.2019/ 21:56:18 | 4,84 | 14,07 | 775 | 41 | *0 | 379,4 |
| 15.10.2019/ 21:56:23 | 4,83 | 14,08 | 777 | 41 | *0 | 379,5 |
| 15.10.2019/ 21:56:28 | 4,84 | 14,06 | 779 | 40 | *0 | 379,6 |
| 15.10.2019/ 21:56:33 | 4,86 | 14,06 | 778 | 40 | *0 | 379,6 |
| 15.10.2019/ 21:56:38 | 4,82 | 14,08 | 775 | 40 | *0 | 379,7 |
| 15.10.2019/ 21:56:43 | 4,83 | 14,09 | 781 | 40 | *0 | 379,6 |
| 15.10.2019/ 21:56:48 | 4,83 | 14,08 | 779 | 41 | *0 | 379,7 |
| 15.10.2019/ 21:56:53 | 4,82 | 14,07 | 774 | 45 | *0 | 379,7 |
| 15.10.2019/ 21:56:58 | 4,82 | 14,09 | 774 | 50 | *0 | 379,8 |

Tablica 35. Izvod iz izmjerenih podataka (M/T Marko Polo) s programom pohrane postavljenim na 3 sekunde

| Datum/Vrijeme | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | NO _x (ppm) | CO (ppm) | SO _x (ppm) | Tisp (°C) |
|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------|
| 16.5.2023/ 23:09:20 | 6,31 | 12,76 | 778 | 298 | 22 | 416,5 |
| 16.5.2023/ 23:09:23 | 6,31 | 12,73 | 777 | 303 | 23 | 416,7 |
| 16.5.2023/ 23:09:26 | 6,31 | 12,73 | 779 | 302 | 22 | 416,8 |
| 16.5.2023/ 23:09:29 | 6,31 | 12,74 | 775 | 300 | 22 | 416,7 |
| 16.5.2023/ 23:09:32 | 6,27 | 12,77 | 774 | 298 | 22 | 416,6 |
| 16.5.2023/ 23:09:35 | 6,25 | 12,77 | 773 | 298 | 22 | 416,4 |
| 16.5.2023/ 23:09:38 | 6,26 | 12,78 | 769 | 298 | 22 | 416,1 |
| 16.5.2023/ 23:09:41 | 6,26 | 12,79 | 768 | 297 | 22 | 415,8 |
| 16.5.2023/ 23:09:44 | 6,25 | 12,81 | 779 | 290 | 21 | 415,5 |
| 16.5.2023/ 23:09:47 | 6,24 | 12,81 | 786 | 281 | 23 | 415,5 |

4.3. Rezultati eksperimentalnog mjerenja

Prethodno opisana eksperimentalna mjerenja rezultirala su opsežnom bazom podataka, koja se sastoji od 2607 izmjerena podataka za vrijeme plovidbe i 1889 podataka za vrijeme manevriranja broda. Baza podataka obuhvaća sljedeću podjelu podataka:

- M/T Marko Polo – 1801 podataka za vrijeme plovidbe i 1673 za vrijeme manevriranja
- M/T Zadar – 115 podataka za vrijeme plovidbe i 65 za vrijeme manevriranja
- M/T Dubrovnik – 691 podataka za vrijeme plovidbe i 151 za vrijeme manevriranja.

4.3.1. Rezultati mjerenja u fazi plovidbe

Radi jasnijeg uvida i analize rezultata kreirana je tablica 36 koja prikazuje srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe broda. Analizirani podaci podijeljeni su po glavnim motorima na kojima je izvršeno mjerenje, te su označeni s pripadajućim oznakom L (lijevi) ili D (desni). Osim izmjerenih koncentracija ispušnih plinova u tablici su prikazane i prosječne vrijednosti opterećenja (% MCR) rada motora, te prosječne temperature ispušnih plinova.

Standardna devijacija korištena u ovoj analizi dobivena je s jednadžbom:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (24.1)$$

gdje N označava broj mjerenja, x_i je određeni podatak u skupu, a μ predstavlja srednju vrijednost koja je definirana kao:

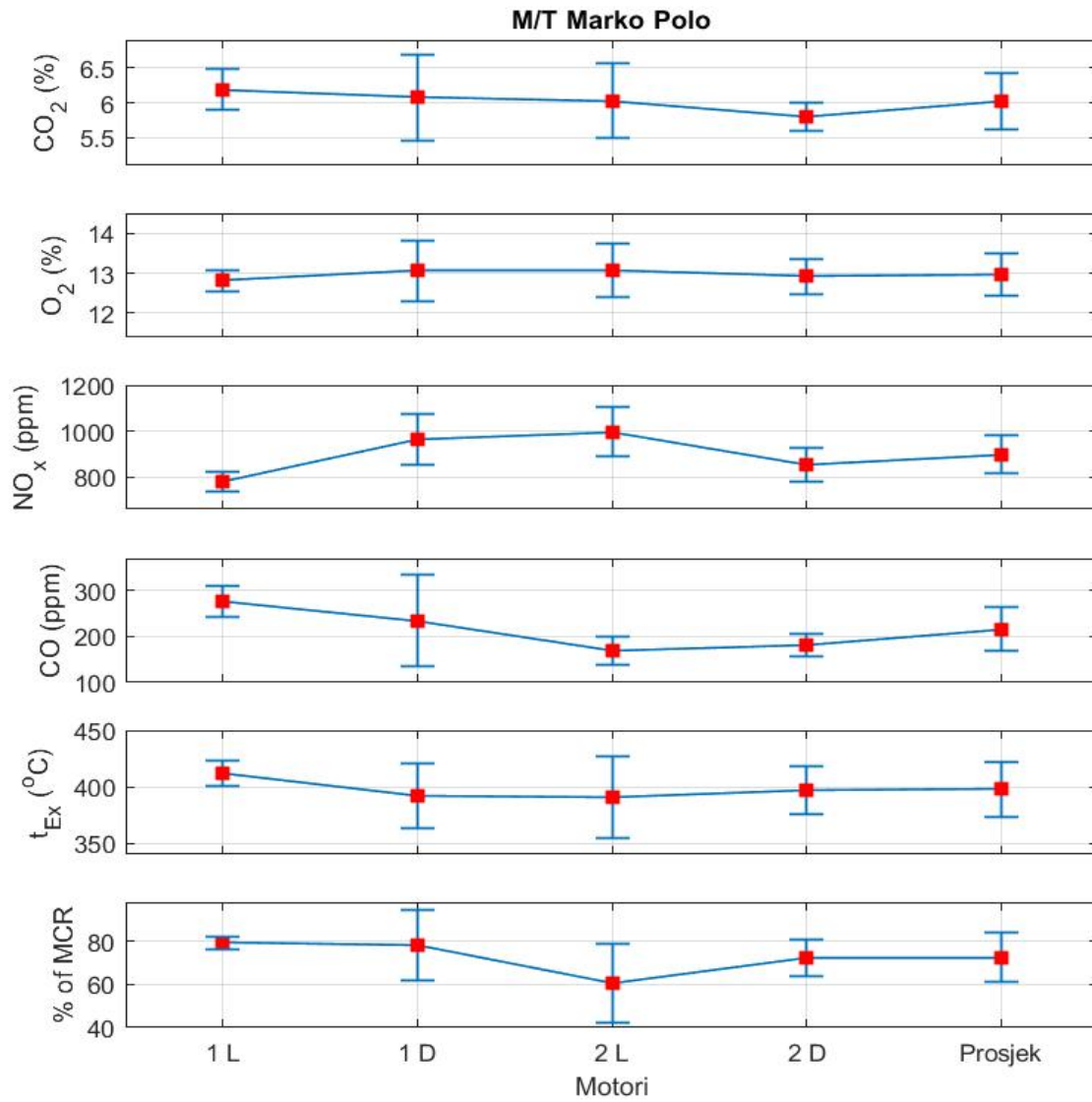
$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (24.2)$$

Tablica 36. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka u fazi plovidbe za sve brodove i motore s pripadajućim izračunatim prosječnim vrijednostima

| Brod | Motor | Parametar | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | NOx (ppm) | CO (ppm) | Temp. (°C) | MCR (%) |
|----------------------|----------|-----------|------------------------|-----------------------|--------------|-------------|---------------|------------|
| M/T Marko Polo | 1L | μ | 6,18 | 12,81 | 779,66 | 277,68 | 411,54 | 79,24 |
| | | σ | 0,29 | 0,25 | 42,10 | 33,72 | 11,46 | 2,85 |
| | 1D | μ | 6,07 | 13,07 | 963,85 | 234,23 | 392,06 | 77,96 |
| | | σ | 0,61 | 0,75 | 107,69 | 100,47 | 28,32 | 16,15 |
| | 2L | μ | 6,02 | 13,07 | 996,40 | 170,15 | 390,47 | 60,42 |
| | | σ | 0,53 | 0,67 | 108,02 | 30,85 | 36,68 | 18,09 |
| | 2D | μ | 5,79 | 12,91 | 852,09 | 181,58 | 397,15 | 72,17 |
| | | σ | 0,20 | 0,42 | 75,24 | 25,33 | 21,44 | 8,67 |
| | Prosjek | μ | 6,02 | 12,96 | 898,01 | 215,91 | 397,81 | 72,45 |
| | | σ | 0,41 | 0,52 | 83,26 | 47,59 | 24,48 | 11,44 |
| M/T Zadar | 1L | μ | 5,59 | 13,08 | 1183,62 | 149,74 | 331,71 | 65,47 |
| | | σ | 0,04 | 0,04 | 22,18 | 11,56 | 5,58 | 0,84 |
| | 1D | μ | 5,86 | 12,68 | 1287,59 | 161,60 | 345,07 | 76,34 |
| | | σ | 0,11 | 0,20 | 30,512 | 9,28 | 20,20 | 0,93 |
| | Prosjek | μ | 5,72 | 12,88 | 1235,61 | 155,67 | 338,39 | 70,90 |
| | | σ | 0,08 | 0,12 | 26,348 | 10,42 | 12,89 | 0,89 |
| M/T Dubrovnik | 1L | μ | 5,17 | 13,70 | 1002,76 | 39,07 | 393,46 | 64,04 |
| | | σ | 0,11 | 0,15 | 45,46 | 6,61 | 4,79 | 1,96 |
| | 2L | μ | 4,63 | 14,45 | 878,68 | 61,32 | 364,13 | 64,06 |
| | | σ | 0,11 | 0,18 | 15,52 | 10,73 | 5,44 | 9,96 |
| | 3D | μ | 5,30 | 13,47 | 994,57 | 48,90 | 406,61 | 73,61 |
| | | σ | 0,13 | 0,19 | 56,88 | 5,10 | 5,64 | 2,23 |
| | 4D | μ | 4,90 | 14,04 | 781,95 | 51,55 | 389,75 | 55,39 |
| | | σ | 0,14 | 0,21 | 40,33 | 3,57 | 5,40 | 4,48 |
| | Prosjek | μ | 5,00 | 13,92 | 914,49 | 50,21 | 388,49 | 64,28 |
| | | σ | 0,12 | 0,18 | 39,55 | 6,50 | 5,32 | 4,66 |
| Ukupan prosjek | μ | 5,58 | 13,25 | 1016,03 | 140,60 | 374,90 | 69,21 | |
| | σ | 0,20 | 0,27 | 49,72 | 21,50 | 14,23 | 5,83 | |

Iz prikazanih rezultata u tablici 36 vidljivo je da najveće opterećenje motora pripada brodu Marko Polo jer su mjerenja 2019. godine odrađena pri otežanim vremenskim uvjetima i pri povećanoj brzini broda zbog najdulje prosječne rute plovidbe. Prosječno opterećenje motora za ovaj slučaj iznosi 72.45%, dok je najmanje opterećenje od 64.28% za brod Dubrovnik. Koncentracije CO₂ i O₂ u ispušnim plinovima u slučaju Marko Polo i Zadra su vrlo slične što je tipično za opterećenja pri kojima su motori većinu plovidbe radili. Pri tim opterećenjima motori rade s dovoljnom količinom (viškom) zraka za izgaranje kako bi se postiglo učinkovito izgaranje. Shodno tome u slučaju Dubrovnik zbog relativno nižeg prosječnog opterećenja (64,28%) koncentracije CO₂ su niže, dok su koncentracije O₂ povećane usporedno s rezultatima

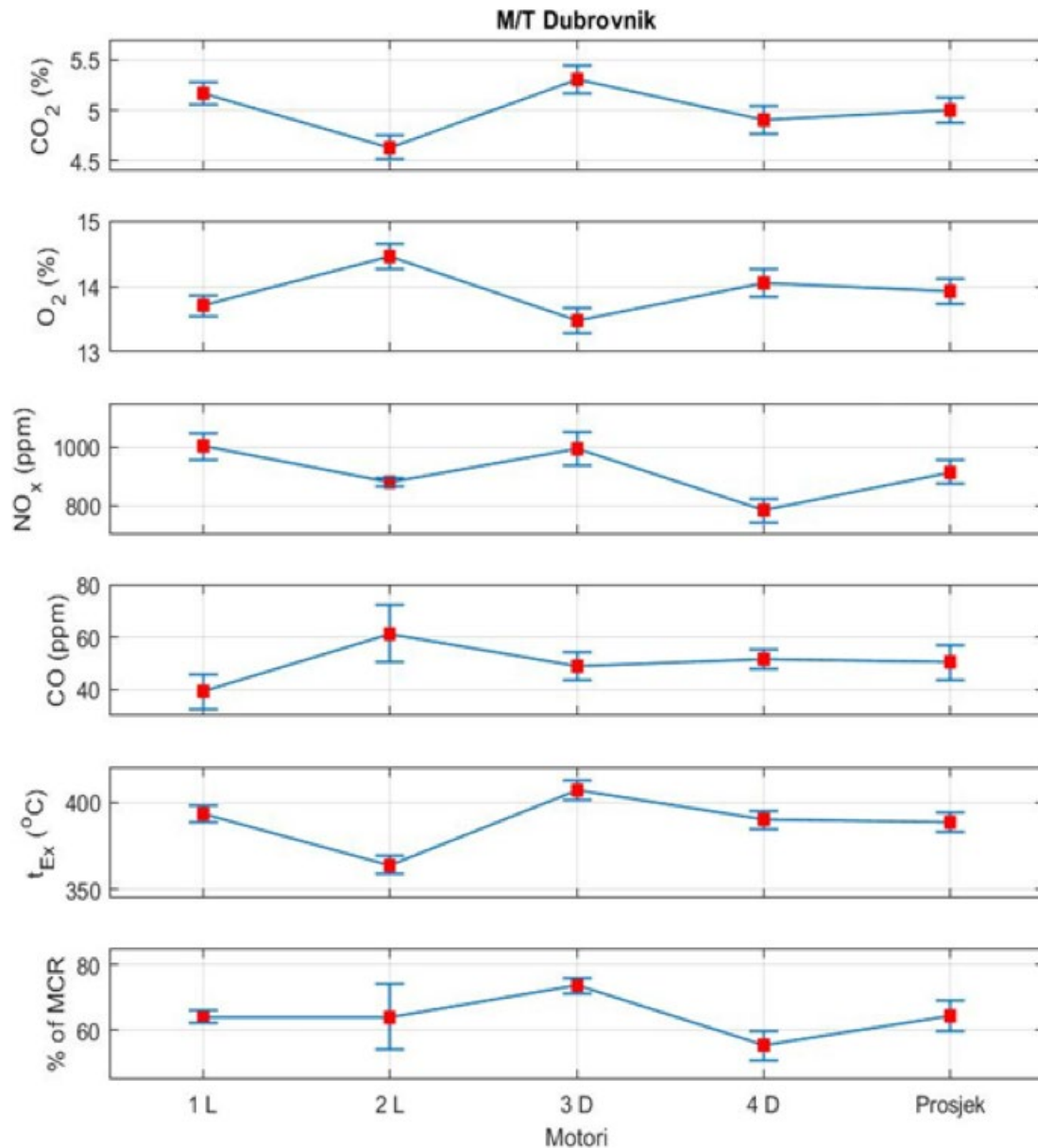
na preostala dva broda. Na slici 40 prikazane su srednje vrijednosti i standardne devijacije izmjerenih koncentracija plinova, ispušnih temperatura i opterećenja motora u fazi plovidbe za slučaj broda M/T Marko Polo.



Slika 40. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Marko Polo

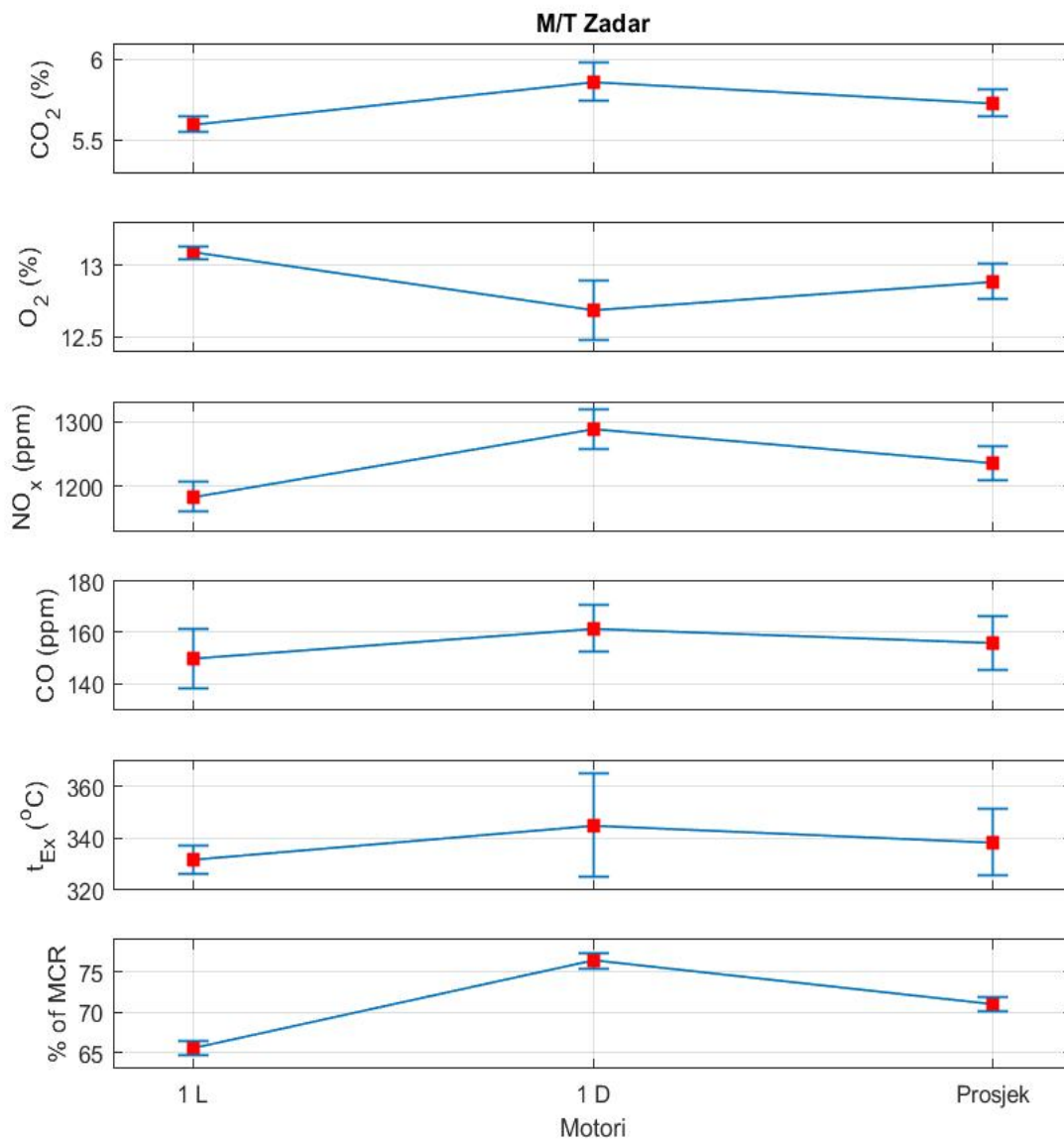
Rezultati mjerenja su podijeljeni na dva lijeva i dva desna motora (1L, 1D, 2L, 2D), te na ukupan prosjek za sva četiri motora. Motor 1L radio je pri najvećim opterećenjima ($\approx 80\%$) što posljedično uzrokuje najveće prosječne vrijednosti CO_2 (6,18%) i najveće ispušne temperature plinova ($411,54\text{ }^\circ\text{C}$). Nadalje, tako visoke temperature ispušnih plinova trebale bi uzrokovati i povećane NO_x vrijednosti, ali u slučaju 1L motora NO_x vrijednosti su najniže što ukazuje na neučinkovit proces izgaranja u cilindru kod kojeg dolazi do nepravilnog omjera goriva i dovedenog zraka u cilindar ili zakašnjelog procesa izgaranja. Utjecaj na tvorbu NO_x -a može imati i vrijeme zadržavanja ispušnih plinova u cilindru, koje je povezano s produljenim vremenom otvaranja ispušnih ventila. Drugi lijevi (2L) motor radio je pri najnižim opterećenjima ($\approx 60\%$) i s najmanjom prosječnom količinom CO (170,15 ppm), a najvećim udjelom NO_x -a (996,4 ppm) i najmanjom temperaturom ispušnih plinova ($390,47\text{ }^\circ\text{C}$). Kod 1D motora prosječne vrijednosti su slične kao kod 2L motora (osim CO = 234 ppm), dok je prosječno opterećenje motora ($\approx 78\%$) bilo veće od nego u slučaju 2L. Drugi desni (2D) motor radio je pri prosječnom opterećenju od 72%, s najmanjom CO_2 vrijednošću od 5,79% i relativno niskim CO (181 ppm). Iz izmjerenih podataka moguće je zaključiti da su motori na desnoj strani strojarnice radili pri idealnijim uvjetima rada, gdje se prvenstveno podrazumijeva kvalitetnija dobava zraka za izgaranje (održavanje turbo-puhala i pravilan pretičak zraka) i učinkovitiji proces izgaranja u cilindrima (pravilan rad visokotlačne pumpe goriva, adekvatno otvaranje/zatvaranje ventila i vrijeme ubrizgavanja goriva). Kad se svi motori uzmu u obzir dobivaju se ukupne prosječne vrijednosti za M/T Marko Polo koje iznose 72,45% MCR, 6% CO_2 , 215 ppm CO, 12,9% O_2 , 898 ppm NO_x i ispušne temperature od $397\text{ }^\circ\text{C}$.

Na slici 41 prikazani su rezultati mjerenja na brodu M/T Dubrovnik u fazi plovidbe, gdje su također mjerenja podijeljena po motorima na dva lijeva (1L, 2L) i dva desna (3D i 4D). Za razliku od Marka Pola, prosječna opterećenja motora su niža (osim 3D motora $\approx 73\%$) što rezultira i manjim koncentracijama CO_2 , CO i NO_x , a povećanim koncentracijama O_2 . Dva lijeva motora radila su s istim prosječnim opterećenjima od 64%, ali je 1L motor imao veće prosječne temperature (1L = $393\text{ }^\circ\text{C}$, 2L = $364\text{ }^\circ\text{C}$) što je rezultiralo u konačnici i većim NO_x (1002 ppm) koncentracijama. Najveći udio O_2 (14,45%) i CO (61,35 ppm) imao je 2L motor, a samim time i najmanji udio CO_2 od 4,63%. Motor 4D radio je s najmanjim prosječnim opterećenjem od 55%, te je ujedno imao i najmanje NO_x koncentracije (≈ 782 ppm). Rezultati mjerenja pri ovim opterećenjima, ukazuju na ispravan rad motora kod kojih nisu uočene nikakve vidljive nepravilnosti u procesu izgaranja goriva (osim kod 1L motora s malo povišenim NO_x koncentracijama).



Slika 41. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Dubrovnik

Ukupne prosječne vrijednosti za M/T Dubrovnik iznose 55,34% MCR, 5,5% CO₂, 50,2 ppm CO, 13,2% O₂, 914,4 ppm NO_x i ispušne temperature od 388°C.



Slika 42. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Zadar

U slučaju M/T Zadar (slika 42) rezultati mjerenja su podijeljeni na jedan lijevi (1L) i jedan desni (1D) motor s ukupnim izračunatim prosjekom. Motor 1D radio je pri većim opterećenjima (76,34%) za razliku od 1L motora, što rezultira ujedno i većim prosječnim vrijednostima NO_x-a (1287 ppm), CO₂ (5,86%) i ispušnim temperaturama od 345°C.

Za razliku od prethodna dva broda, koncentracije NO_x-a u slučaju oba motora su povišene i ukupne prosječne vrijednosti za opterećenje od 70% MCR-a iznosi 1235 ppm. Ovaj podatak ukazuje na nepravilnosti u radu motora koje utječu na tvorbe NO_x spojeva. Svi spomenuti

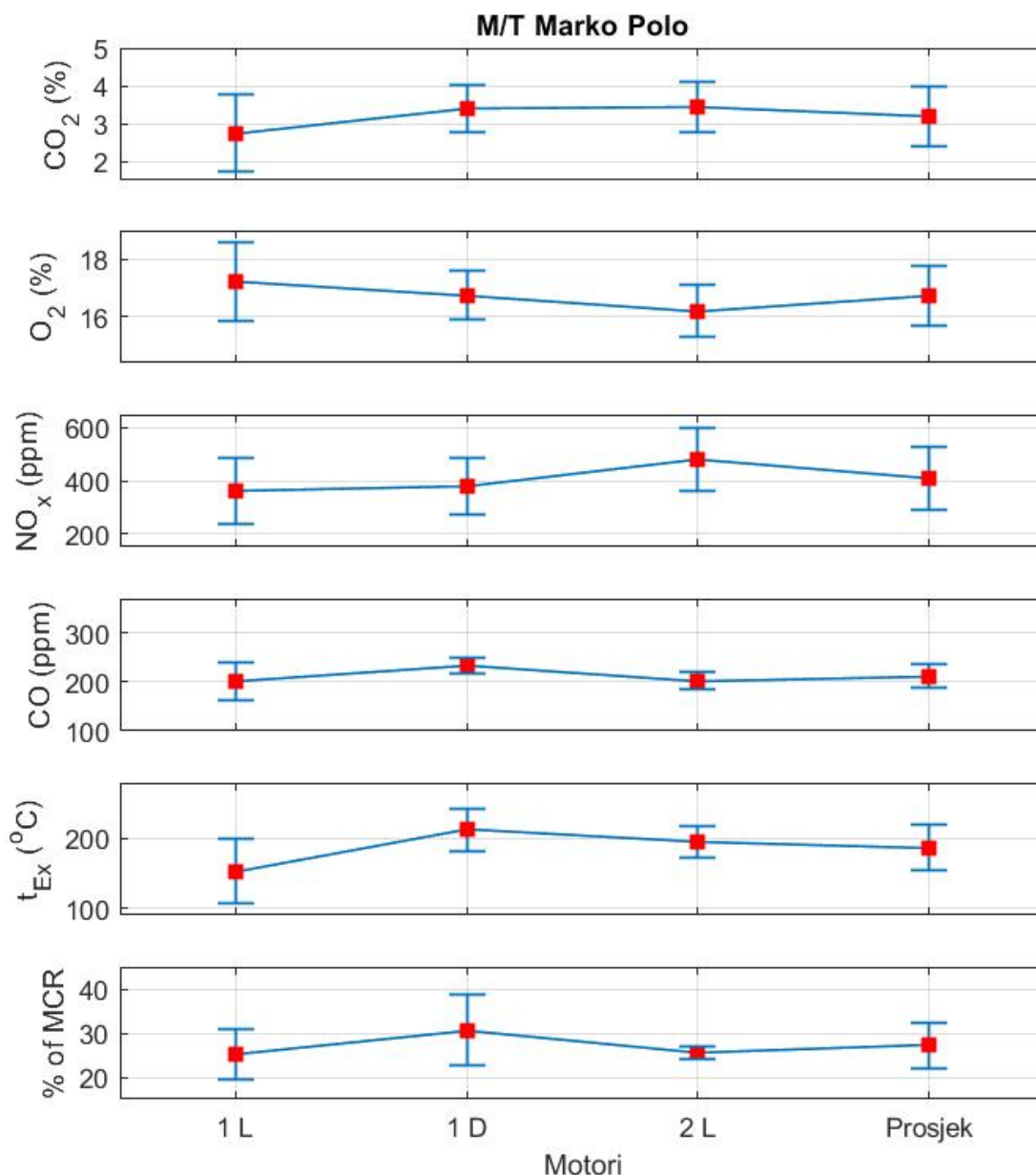
motori u ovome istraživanju ne podliježu IMO NOx Tehničkom Kodeksu jer su izgrađeni prije 1. siječnja 2000. godine, ali kontrola NOx spojeva je od izuzetne važnosti jer ukazuje na pravilan i učinkovit proces izgaranja.

4.3.2. Rezultati mjerenja u fazi manevriranja

Rezultati mjerenja koncentracije ispušnih plinova za vrijeme faze manevriranja, prikazani su u tablici 37. Za vrijeme manevriranja, motori u početku rade pri tzv. 'hladnom startu' gdje još nisu postignute adekvatne radne temperature. EU Komisija definirala je Uredbom 2017/1154 [136] hladni start motora kao vremenski period od prvog pokretanja motora pa dok rashladna voda motora ne postigne temperaturu od 70°C. Odnosno, kod manevriranja motori rade u nestacionarnom režimu što je razlog oscilacije parametara dok se motor (osobito turbo-puhalo i ubrizgavanje) ne stabilizira.

Tablica 37. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka u fazi manevriranja za sve brodove i motore s pripadajućim izračunatim prosječnim vrijednostima

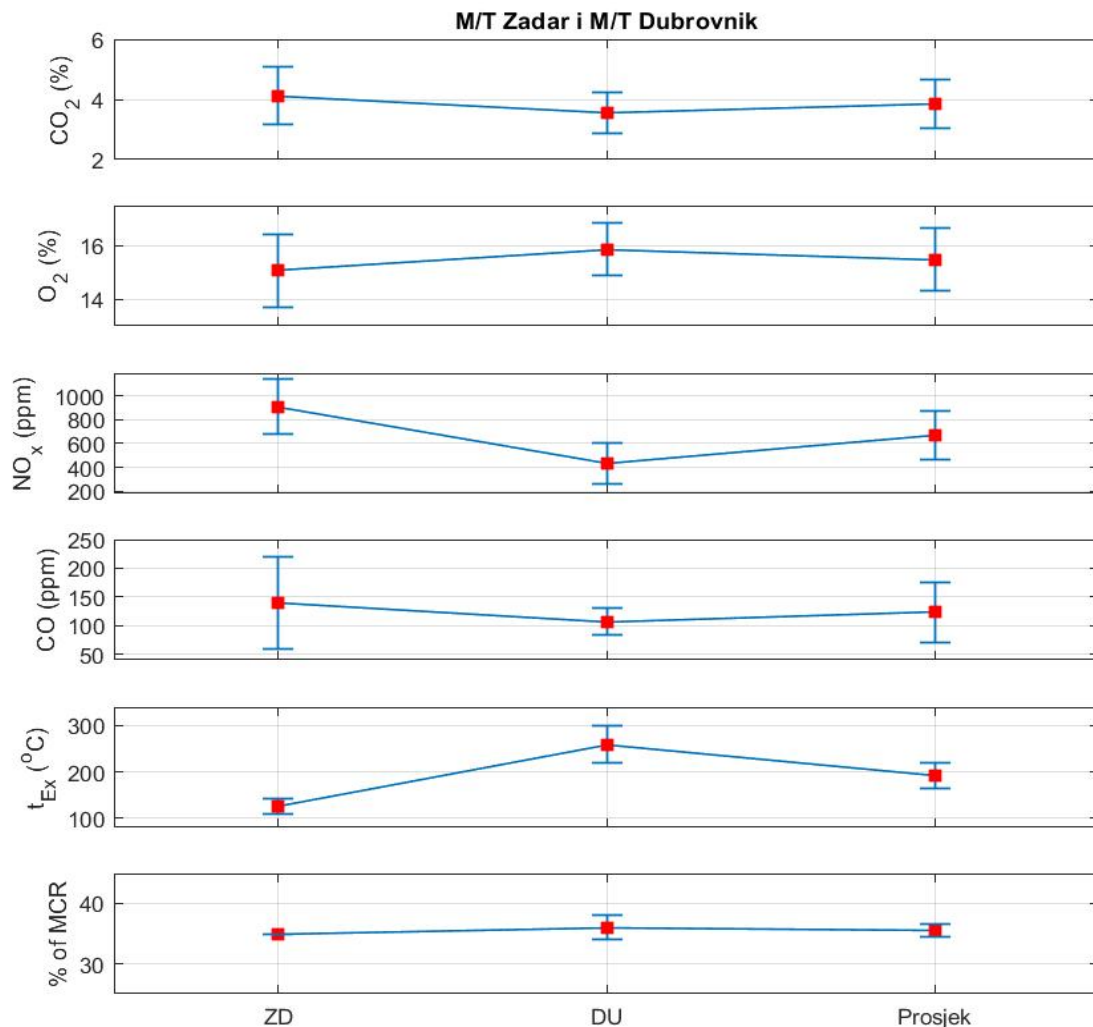
| Brod | Motor | Parametar | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | NOx (ppm) | CO (ppm) | Temp. (°C) | MCR (%) |
|----------------------|---------|-----------|------------------------|-----------------------|--------------|-------------|---------------|------------|
| M/T Marko Polo | 1L | μ | 2,74 | 17,21 | 359,60 | 201,45 | 153,02 | 25,27 |
| | | σ | 1,031 | 1,392 | 126,24 | 37,42 | 46,17 | 5,70 |
| | 1D | μ | 3,39 | 16,74 | 378,59 | 232,48 | 212,23 | 30,70 |
| | | σ | 0,63 | 0,832 | 109,46 | 15,84 | 29,61 | 7,95 |
| | 2L | μ | 3,43 | 16,20 | 482,09 | 202,56 | 195,33 | 25,45 |
| | | σ | 0,66 | 0,892 | 119,21 | 16,69 | 21,97 | 1,43 |
| | Prosjek | μ | 3,19 | 16,72 | 406,76 | 212,16 | 186,86 | 27,14 |
| | | σ | 0,77 | 1,039 | 118,30 | 23,319 | 32,59 | 5,03 |
| M/T Zadar | 1L | μ | 4,12 | 15,07 | 908,30 | 139,43 | 124,37 | 35 |
| | | σ | 0,94 | 1,36 | 231,55 | 81,29 | 16,51 | 0 |
| M/T Dubrovnik | 4D | μ | 3,56 | 15,86 | 429,06 | 106,74 | 258,88 | 35,93 |
| | | σ | 0,69 | 0,991 | 171,05 | 23,05 | 40,12 | 1,995 |
| Ukupan prosjek | | μ | 3,62 | 15,88 | 581,36 | 152,77 | 190,04 | 32,71 |
| | | σ | 0,80 | 1,13 | 173,63 | 42,55 | 29,74 | 2,34 |



Slika 43. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme manevriranja na brodu M/T Marko Polo

Na brodu M/T Marko Polo mjerenja su odrađena na motorima 1L, 1D i 2L, tj. ovisno koji je motor bio u funkciji za vrijeme manevriranja. Prosječno opterećenje rada motora kod 1L i 2L motora iznosilo je 25%, te 30% za 1D motor, što rezultira ukupnim prosječnim opterećenjem od 27,14%. Pri tako niskim opterećenjima prosječne temperature ispušnih plinova su 186°C, dok prosječna koncentracija CO₂ iznosi 3,19%. Zbog neučinkovitog rada motora i omjera dobavljenog zraka povećane su količine kisika (ukupan prosjek 16,72%), te koncentracije CO

zbog nepotpunog izgaranja koje može biti iz više razloga poput nepravilnog raspršivanja ili lošeg miješanja sa zrakom što je najčešće posljedica istrošenosti ili loše podešenosti pojedinih komponenti sustava ubrizgavanja ili propuštanja prostora izgaranja.



Slika 44. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme manevriranja na M/T Zadar i M/T Dubrovniku

U slučaju M/T Dubrovnik mjerenja su odrađena na 4D motoru, a kod M/T Zadar na 1L motoru. Opterećenja u oba slučaja iznosila su 35%, a prosječne vrijednosti CO₂ za Dubrovnik su 3,56% i 4,12% za Zadar. Koncentracije NO_x-a kod mjerenja na Zadru su povišene (908,3 ppm) iako su srednje vrijednosti temperatura ispušnih plinova (124,37°C) niže nego u slučaju Dubrovnika gdje iznose 258,88°C, dok je srednja vrijednost NO_x-a 429 ppm. Ukupne prosječne vrijednosti u fazi manevriranja za sva tri broda iznose: 32,71% opterećenja, 3,62% CO₂, 15,88% O₂, 581,36 ppm NO_x, 152,77 ppm CO i 190°C temperature ispušnih plinova.

5. MODELIRANJE I OBRADA PODATAKA

S ciljem unaprjeđenja procjene emisijskih faktora potrebno je izmjerene podatke obraditi metodom modeliranja tj. metodom strojnog učenja. U ovu svrhu korišten je programski jezik MATLAB za numeričko modeliranje u kojem je izrađen model uz pomoć višestruke nelinearne regresije. Za izradu modela korišteni su izmjereni podaci u fazama manevriranja i plovidbe. U ovome poglavlju objasniti će se korištena metoda regresije te će se dobivene procijenjene vrijednosti usporediti s stvarnim izmjerenim podacima kako bi se utvrdila reprezentativnost modela.

5.1. Gaussova višestruka regresija

Za numeričko modeliranje i obradu podataka korištena je Gaussova višestruka nelinearna regresija. Probabilistički model je potreban kako bi se procijenile izlazne vrijednosti i opisao odnos između ulaznih i izlaznih varijabli. Prednost Gaussove regresije je što minimalizira greške (odstupanja) izlaznih varijabli uz pomoć podešavanja kovarijance i optimizacije krivulje funkcije, posebice u slučaju velikog broja ulaznih podataka.

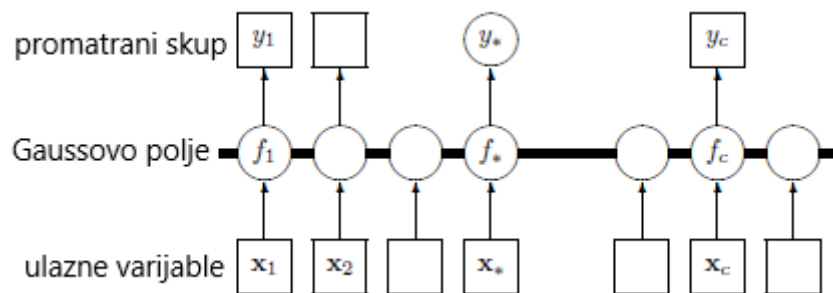
Gaussova distribucija (normalna razdioba) sa srednjim vrijednostima (μ) i varijancom (σ^2), definirana je funkcijom gustoće vjerojatnosti [134] za varijablu X:

$$P_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (25)$$

Modeliranje uz Gaussovu regresiju može se definirati kao distribucija vjerojatnosti mogućih funkcija koje odgovaraju skupu točaka. U regresiji postoji zadana funkcija koju pokušavamo modelirati uz pomoć skupa ulaznih podataka iz nepoznate funkcije f. Tradicionalne metode nelinearne regresije obično daju jednu funkciju za koju se smatra da najbolje odgovara skupu podataka. Međutim, često postoji više funkcija (x_1, x_2, \dots, x_D) koje jednako dobro odgovaraju promatranim podatkovnim točkama. Za promatrani skup podataka postoji beskonačan broj mogućih funkcija koje odgovaraju tim podatkovnim točkama, te uz pomoć Gaussove regresije definiramo distribuciju nad beskonačnim brojem funkcija. Budući da imamo distribuciju vjerojatnosti preko svih mogućih funkcija, može se izračunati srednja vrijednost kao funkcija i varijanca, da se dokaže koliko su predviđanja pouzdana.

Proces modeliranja s Gaussovom regresijom definiran je kao distribucija vjerojatnosti mogućih funkcija koje odgovaraju skupu točaka [135]. Ključne točke procesa Gaussove regresije:

- Gaussov proces predstavlja beskonačnu grupu slučajnih varijabli od kojih bilo koji od konačnih podskupova ima konstantnu zajedničku Gaussovu distribuciju
- dobivene funkcije se ažuriraju s novim skupom podataka
- funkcija srednje vrijednosti dobivena distribucijom svih mogućih funkcija, koristi se za regresijske procjene.



Slika 45. Grafički prikaz Gaussovog modeliranja [135]

Slika 45 prikazuje grafički prikaz modeliranja za Gaussovu regresiju, gdje kvadrati predstavljaju promatrane varijable, a krugovi nepoznate varijable. Ulazne varijable (x) i promatrane varijable (y), utječu na regresiju funkciju (f) koja je modelirana višestrukom Gaussovom regresijom i može se zapisati kao:

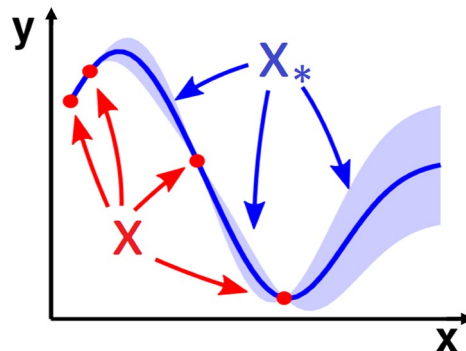
$$P(f|X) = N(f|\mu, K) \quad (26.1)$$

gdje $X = [x_1, \dots, x_2]$ predstavlja ukupni promatrani skup podataka, $f = [f(x_1), \dots, f(x_n)]$ funkcija promatranih podataka, $\mu = [m(x_1), \dots, m(x_n)]$ srednja vrijednost funkcije, $K_{ij} = k(x_i, x_j)$ kovarianca funkcije

Ovaj zapis može se prikazati i u matričnom prikazu, gdje za bilo koji proizvoljni skup podataka (x_1, x_2, \dots, x_N) vrijedi:

$$\begin{pmatrix} f(x_1) \\ \vdots \\ f(x_N) \end{pmatrix} \sim N \left(\begin{pmatrix} m(x_1) \\ \vdots \\ m(x_N) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & \dots & k(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_N, x_1) & \dots & k(x_N, x_N) \end{pmatrix} \right) \quad (26.2)$$

Model Gaussovih procesa je distribucija nad funkcijama čiji oblik (glatkoća) je definiran s kovarijancom (K). Ako varijable x_i i x_j imaju slične vrijednosti pri izračunu kovarijance (mala odstupanja), onda se smatra da izlazne funkcije $f(x_i)$ i $f(x_j)$ imaju slične vrijednosti. Proces modeliranja s Gaussovom regresijom prikazan je na slici 46. Crvene točke predstavljaju promatrani skup podataka uz pomoć kojeg se dobije procijenjena funkcija f (plava linija), dok točke X_* su nove varijable modela $f(x_*)$.



Slika 46. Teorijski proces Gaussove regresije [134]

Zajednička distribucija funkcije f i f_* izražena je kao:

$$\begin{bmatrix} f \\ f_* \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} m(X) \\ m(X_*) \end{bmatrix}, \begin{pmatrix} K & K_* \\ K_*^T & K_{**} \end{pmatrix} \right) \quad (27)$$

gdje je $K = K(X, X)$, $K_* = K(X, X_*)$, $K_{**} = K(X_*, X_*)$ i $(m(X), m(X_*)) = 0$

5.1.1. Kovarijanca

Kovarijanca predstavlja mjeru za određivanje stupnja statističke povezanosti varijabli, odnosno odstupanja vrijednosti dviju varijabli od njihovih aritmetičkih sredina. U regresijskom procesu, izlazne vrijednosti funkcije (predikcije) trebale bi imati slične vrijednosti u slučaju kad se dvije ulazne varijable nalaze u blizini. Ako se udaljenost između dviju varijabli povećava, onda se kovarijanca eksponencijalno smanjuje.

U Gaussovom procesu odabir kovarijance je vrlo važan jer određuje ponašanje (glatkoću, oblik, blizinu) funkcije koja se modelira. Kako bi se izračunala sličnost dvaju podataka koristi se jezgrena funkcija (engl. 'kernel') koja uzima dva podatka iz skupa X i kao rezultat daje sličnost između tih podataka.

Za jezgrenu funkciju vrijedi da je pozitivna i simetrična:

$$k(x, x') \geq 0 \quad (28.1)$$

$$k(x, x') = k(x', x) \quad (28.2)$$

U regresiji se često koriste jezgrene funkcije koje imaju razne oblike ovisno o strukturi promatranih podataka:

Linearna jezgra :

$$k(x, x') = \sigma_b^2 + \sigma_v^2 (x - c)(x' - c) \quad (29.1)$$

Kvadratna eksponencijalna jezgra:

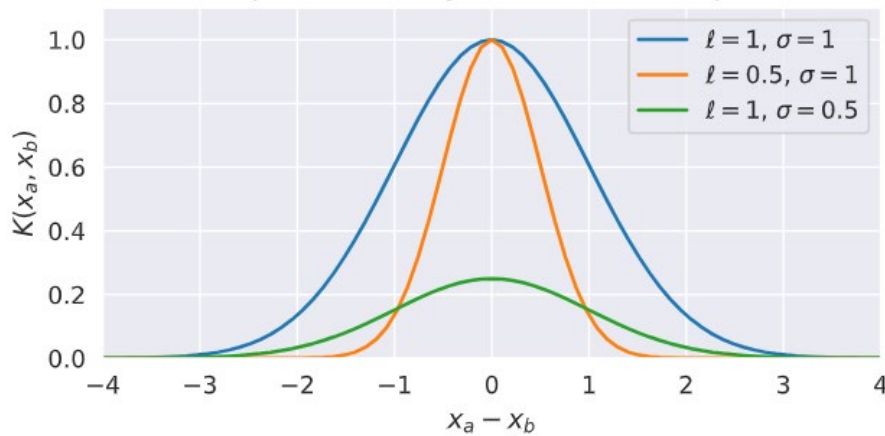
$$k(x, x') = \sigma^2 \exp\left(-\frac{(x - x')^2}{2l^2}\right) \quad (29.2)$$

Jezgre ovog tipa nazivaju se i radialno bazne funkcije (engl. 'radial basis functions') i najčešći su korišten oblik u Gaussovoj regresiji.

gdje je:

l = (engl. 'lengthscale'), opisuje glatkoću funkcije. Niska vrijednost duljine l ukazuje da se oblik funkcije može brzo mijenjati, dok visoke vrijednosti karakteriziraju funkcije koje se sporo mijenjaju. Ovaj podatak također ukazuje koliko se daleko može pouzdano ekstrapolirati iz treniranog skupa podataka.

σ = varijanca distribucije koja određuje odstupanje vrijednosti funkcije od njihove srednje vrijednosti. Često se ovaj parametar naziva i 'širina pojasa' jer određuje širinu Gaussovog 'zvona'. Ako je iznos varijanca veći onda je i 'zvono' šire, odnosno niska varijanca karakterizira funkcije koje su blizu svojih srednjih vrijednosti, tj. distribucija je uža. Na slici 47 prikazan je utjecaj promjene parametara na oblik 'zvona' kod kvadratne eksponencijalne jezgre.



Slika 47. Kvadratna eksponencijalna jezgra i utjecaj promjene parametara na oblik funkcije [136]

Racionalna kvadratna jezgra

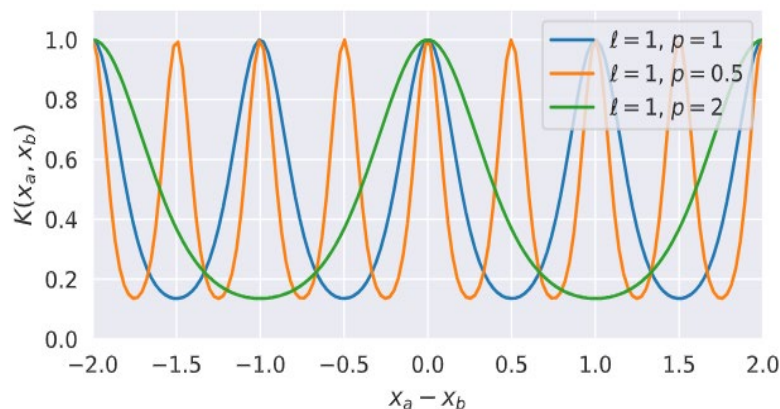
$$k(x, x') = \sigma^2 \left(1 + \frac{1}{2\alpha l^2} (x - x')^T (x - x'')^{-\alpha} \right) \quad (29.3)$$

Racionalna kvadratna jezgra definirana je kao zbroj različitih kvadratnih eksponencijalnih jezgri s različitim duljinama (l), gdje parametar α određuje odstupanje između različitih duljina.

Periodična jezgra

$$k(x_a, x_b) = \sigma^2 \exp \left(1 - \frac{2}{l^2} \sin^2 \left(\pi \frac{x_a - x_b}{p} \right) \right) \quad (29.4)$$

Za razliku od prethodnih jezgri, periodična jezgra se koristi kad imamo skup podataka s tendencijom ponavljanja s određenom amplitudom, te se u ovom slučaju uvrštava i parametar p koji određuje periodičnost prilikom modeliranja (slika 48). Povećanjem parametra p povećava se udaljenost između ponavljanja (povećanje valne duljine).



Slika 48. Primjer periodične jezgre s promjenom parametra periodičnosti [136]

5.2. Modeliranje podataka u fazi manevriranja i plovidbe

Prije obrade podataka potrebno je definirati zavisne (y) i nezavisne (x) varijable, nakon čega se uspoređuju dobivene vrijednosti, odnosno odstupanja empirijskih vrijednosti (izmjereni podaci) y od regresijskih (procijenjeni) vrijednosti \hat{y} . Zavisne varijable predstavljaju varijable koje ovise o vrijednostima drugih (ulaznih) varijabli, odnosno zavisne su o jednoj ili više nezavisnih varijabli. Smatraju se još kao 'mjerne' varijable te se u statistici najčešće označavaju s y . Nezavisne varijable (x) ne ovise o drugim varijablama te njihova promjena u eksperimentu utječe na vrijednosti zavisnih varijabli.

Od izmjerenih podataka odabrane zavisne varijable su CO₂ (%) i NO_x (ppm) koncentracije u ispušnim plinovima. Obe varijable su odabrane zbog svoje visoke relevantnosti u inventarima brodskih emisija i značajnog utjecaja na morski okoliš. Tri odabrane nezavisne varijable koje svojom promjenom utječu na zavisne varijable su:

x_1 – temperatura ispušnih plinova (°C)

x_2 – trenutno opterećenje motora (% od MCR)

x_3 – koncentracija kisika O₂ (%).

Izmjereni podaci modelirani su uz pomoć prethodno opisane Gaussove višestruke nelinearne regresije. Odabrana kovarijanca je s kvadratnom eksponencijalnom jezgrom, gdje se parametri duljine i distribucije optimiziraju s ciljem prilagođavanja preciznosti procijenjenih vrijednosti. Zbog svoje karakteristike visoke 'glatkoće' funkcije, jezgre ovog oblika su najzastupljenije kod Gaussove regresije i mogu se integrirati u većinu funkcija, a posebice pri modeliranju podataka gdje ulazne vrijednosti nemaju značajna odstupanja što je slučaj kod vrijednosti emisija ispušnih plinova.

Jedan od uvjeta za izbor višestruke regresije je statistički parametar tzv. koeficijent determinacije R^2 , čije su vrijednosti u intervalu [0,1]. Ako je koeficijent determinacije bliži jedinici smatra se da je model reprezentativniji. Također je uzet u obzir parametar RMSE (engl. 'Root Mean Square Error') – srednja kvadratna pogreška, koji predstavlja razliku između procijenjenih vrijednosti modela i promatranih (izmjerenih) vrijednosti, gdje rezultati bliži nuli ukazuju na manja odstupanja i manje greške procjene modela.

Jednadžba koeficijenta determinacije [137]:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (30)$$

gdje je:

SS_E – suma kvadrata odstupanja promatranih vrijednosti (y_i) od regresijskih vrijednosti (\hat{y}_i)

SS_T – suma kvadrata zavisne varijable y , koja predstavlja sumu odstupanja vrijednosti (y_i) i aritmetičke sredine (\bar{y})

Nedostatak koeficijenta determinacije je u tome što se njegova vrijednost povećava ukoliko se dodaju nove nezavisne varijable modelu, a da pri tome nisu nužno značajne za promjenu zavisne varijable y . Mjerodavniji pokazatelj uspješnosti modela je korigirani (engl. 'adjusted') koeficijent determinacije R_{adj}^2 , koji zanemaruje varijable čije dodavanje beznačajno smanjuje rezidualne vrijednosti zbroja kvadrata ($R_{adj}^2 \leq R^2$).

Korigirani koeficijent determinacije [137]:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)} (1 - R^2), \quad (31)$$

gdje n predstavlja broj podataka, dok k predstavlja broj nezavisnih varijabli

Jednadžba za srednju kvadratnu pogrešku [137]:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (32)$$

gdje je:

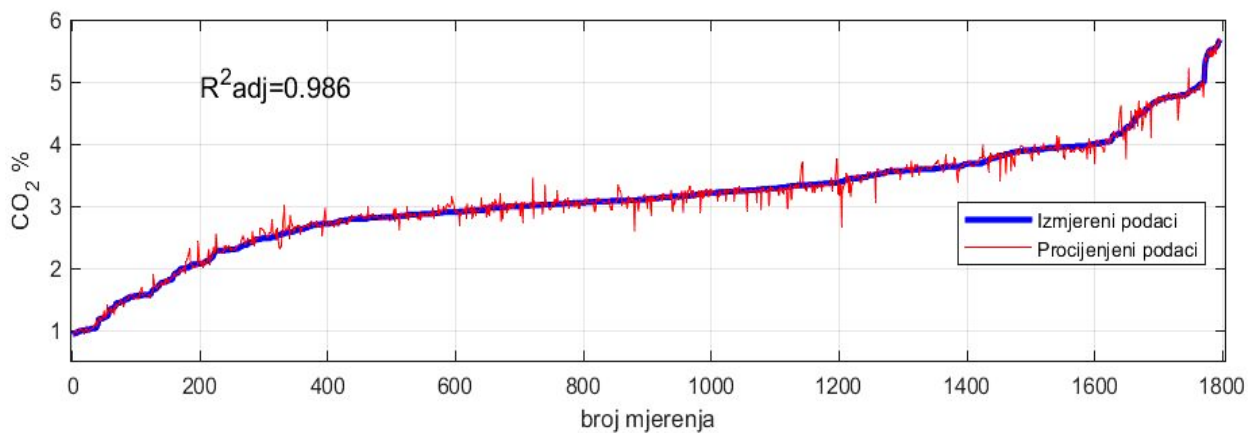
y_i – izmjeren podatak

\hat{y}_i – procijenjena vrijednost

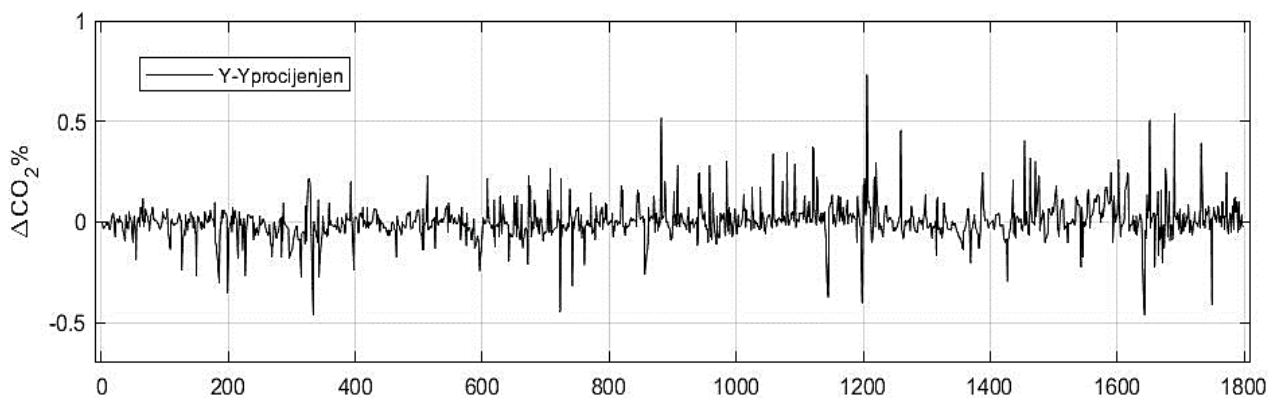
n – broj podataka.

5.2.1. Procijenjene vrijednosti CO₂ u fazi manevriranja

Dijagram na slici 49 prikazuje usporedbu CO₂ (%) vrijednosti između izmjerenih (plava boja) i procijenjenih (crvena boja). Korigirani koeficijent determinacije (0.986) ukazuje na visoku podudaranost između ulaznih izmjerenih podataka (y) i izlaznih procijenjenih (\hat{y}), dok RMSE iznosi 0,09. Minimalna izmjerena vrijednost u fazi manevriranja iznosi 0,94%, dok minimalna procijenjena iznosi 0,95%. Najveća izmjerena CO₂ vrijednost iznosi 5,68%, a najveća procijenjena je 5,71%. Srednja vrijednost svih izmjerenih podataka je 3,142%, a procijenjenih iznosi 3,139%.



Slika 49. Usporedba izmjerenih i procijenjenih CO₂ vrijednosti u fazi manevriranja

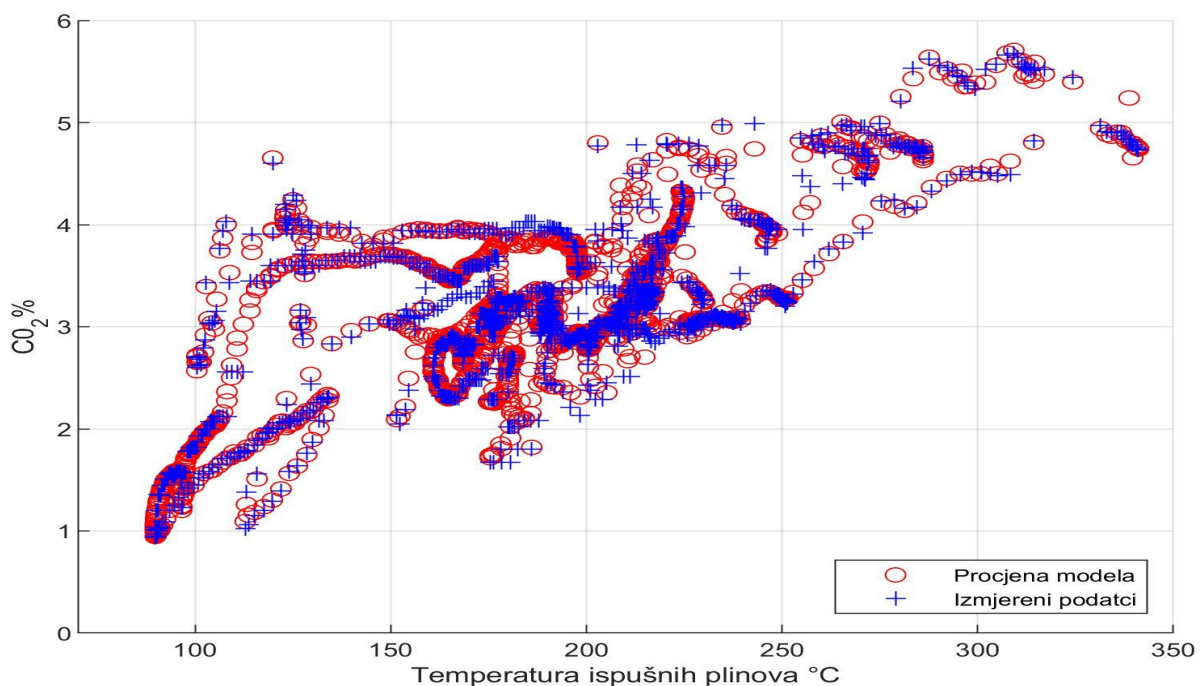


Slika 50. Rezidualne vrijednosti izmjerenih i procijenjenih CO₂ podataka

Rezidualna odstupanja predstavljaju razliku između izmjerenih i procijenjenih podataka, gdje njihova razlika ukazuje na uspješnost modela. Na slici 50 prikazane su rezidualne vrijednosti za CO₂ podatke u fazi manevriranja. Najveće odstupanje u jednoj točki iznosi 0,73, dok reziduali ostalih točaka ne prelaze 0,5 što je pokazatelj vrlo male razlike između stvarnih i

procijenjenih vrijednosti CO₂ varijable, odnosno pokazatelj je visoke reprezentativnosti modela.

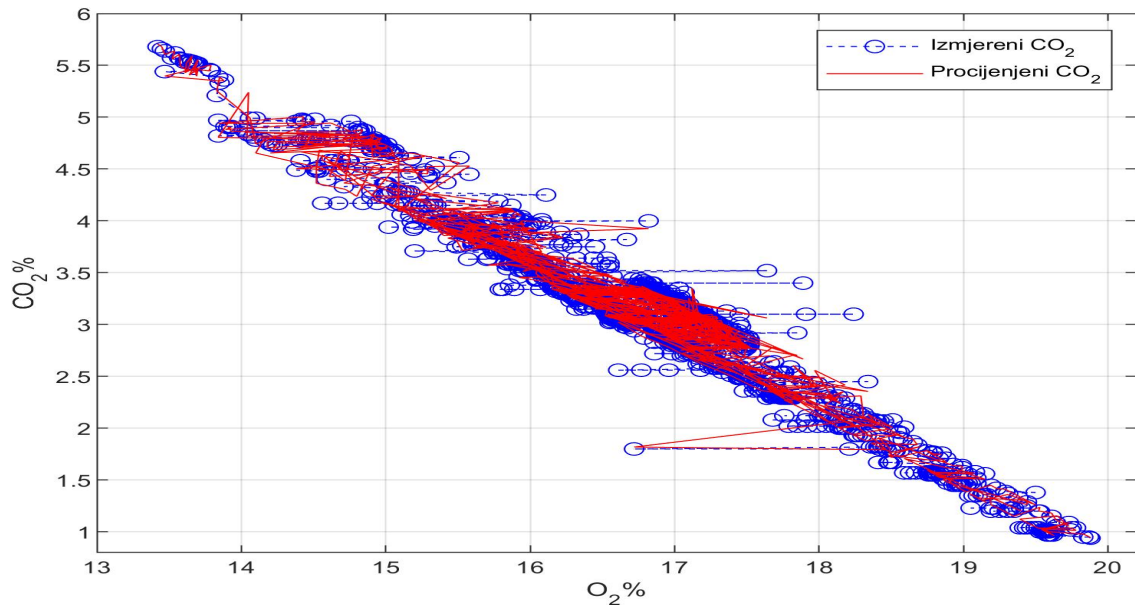
Dijagram procijenjenih i izmjerenih CO₂ podataka u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova (nezavisna varijabla x_1) prikazan je na slici 51. Iz dijagrama se može uočiti da su CO₂ koncentracije za vrijeme manevriranja pretežito bile u rasponu temperatura između 150 i 250°C (srednja prosječna temperatura iznosi 185,89°C). Vidljivo je da porastom temperature dolazi do povećanja CO₂ koncentracije, gdje podaci kod temperature od 300°C i iznad, označavaju povećanje opterećenja motora i završetak manevriranja te su mjerenja u tom trenutku prekinuta. Niske temperature od 100°C i niže ukazuju na početak manevriranja, gdje motori rade s niskim brojem okretaja. Svaki izmjereni podatak (plava boja) ima svoj odgovarajući procijenjeni podatak (crvena boja), gdje se većina preklapa zbog visoke podudarnosti.



Slika 51. Procijenjeni i izmjereni CO₂ podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova

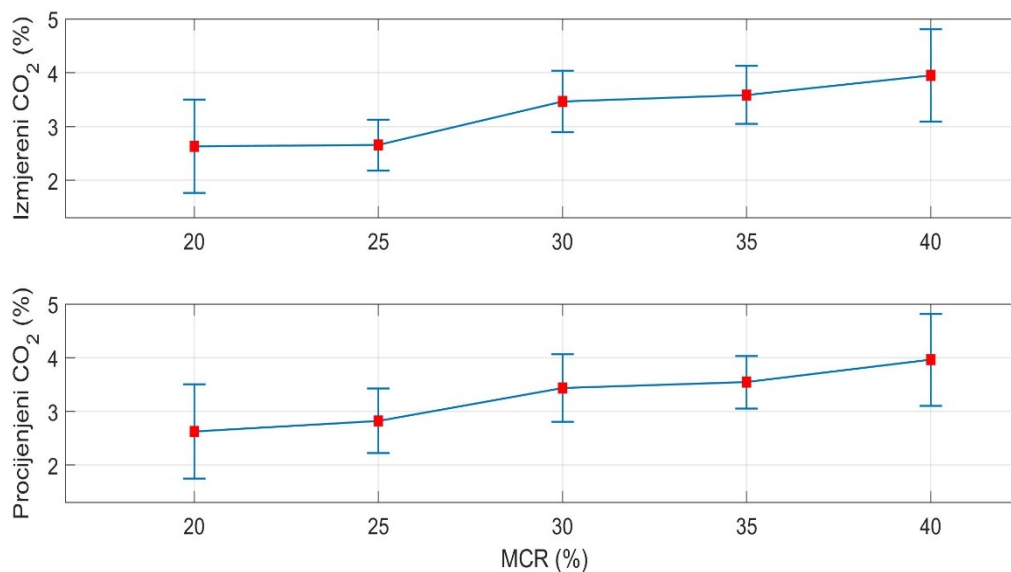
Ovisnost CO₂ koncentracije o udjelu kisika (nezavisna varijabla x_3) prikazan je na slici 52. Plava isprekidana linija s krugom predstavlja izmjerene podatke, a crvena linija procijenjene podatke. Postotak kisika ovisit će o uvjetima izgaranja što će u konačnici rezultirati tvorbom određenog CO₂ udjela. Na slici je vidljivo da povećanje koncentracije kisika rezultira s niskim udjelom CO₂ i obratno. Visoki postotak kisika (18-19%) označava period uhodavanja motora,

odnosno početak faze manevriranja. Srednja prosječna koncentracija kisika u fazi manevriranja iznosi 16,74%.



Slika 52. Procijenjeni i izmjereni CO₂ podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika

Faza manevriranja je podijeljena na opterećenja od 20, 25, 30, 35 i 40 % od MCR-a. Slika 53 prikazuje usporedbu izmjerenih i procijenjenih srednjih vrijednosti CO₂ varijable u ovisnosti o određenom postotku MCR-a (nezavisna varijabla x₂). Iz odbivenih rezultat može se primjetiti da povećanje MCR-a utječe i na povećanje koncentracije CO₂ u ispušnih plinovima. Pri opterećenju od 20% srednja CO₂ izmjerena vrijednost iznosi 2,63%, a procijenjena 2,62%.

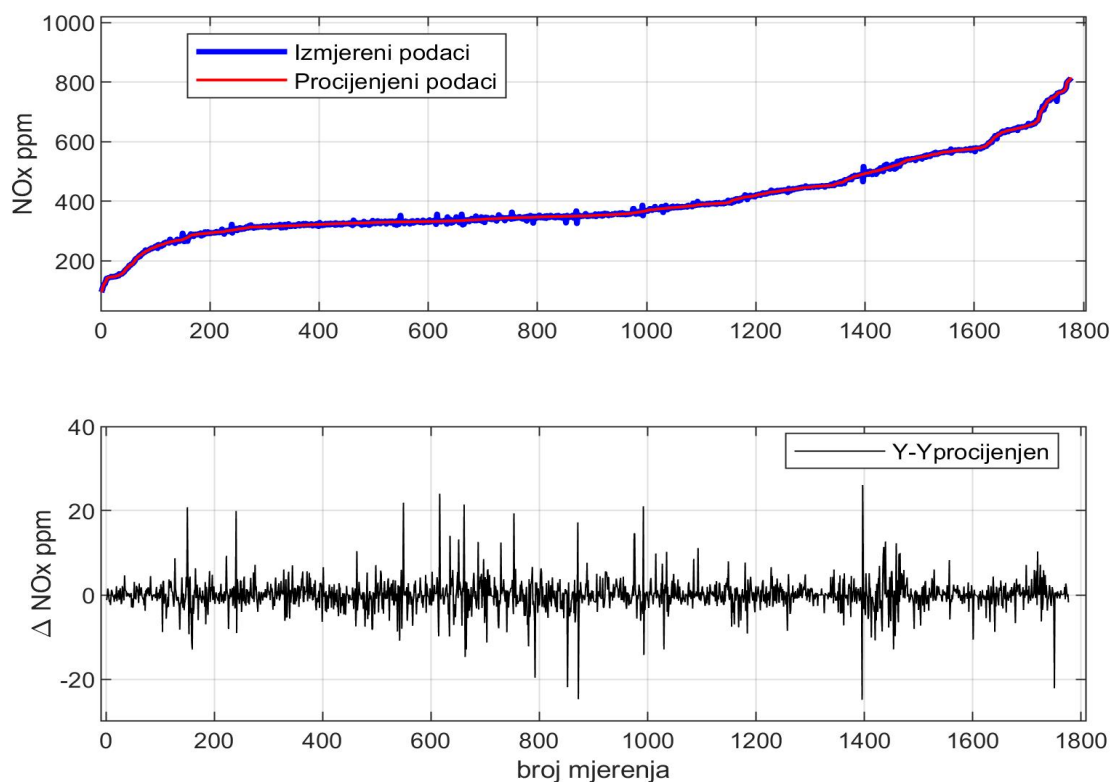


Slika 53. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih CO₂ vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu manevriranja

Izmjerena i procijenjena srednja vrijednost za preostala opterećenja iznosi: za 25% (2,65 i 2,87%), za 30% (3,46 i 3,43%), za 35% (3,58 i 3,54%) te za 40% (3,94 i 3,96%). Zbog visoke reprezentativnosti modela standardne devijacije su minimalne, te su srednje izmjerene i procijenjene CO₂ vrijednosti vrlo slične.

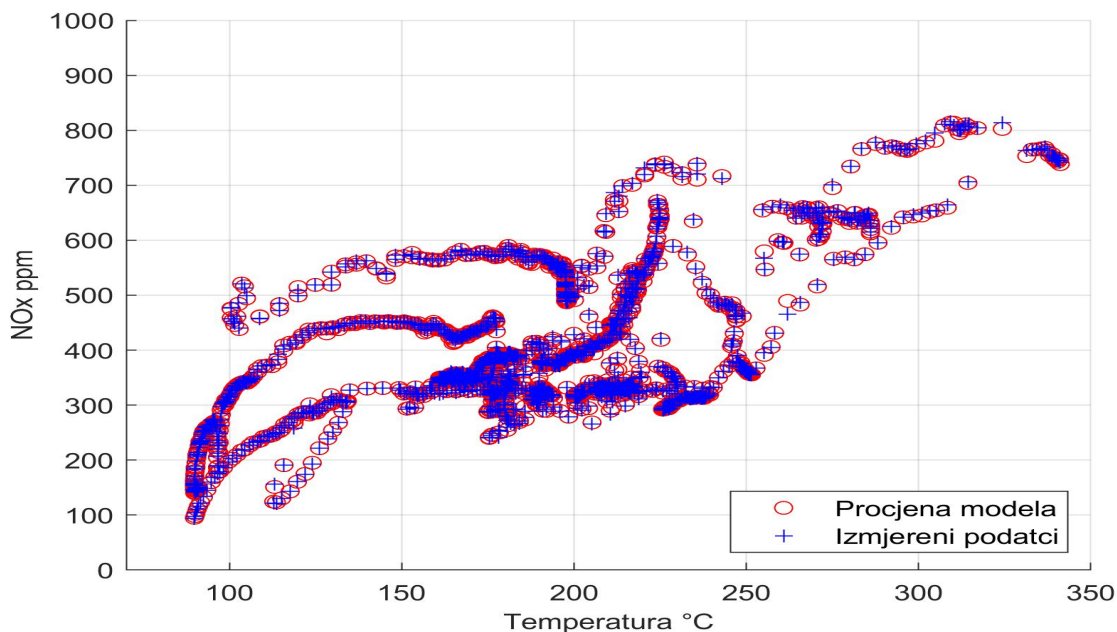
5.2.2. Procijenjene vrijednosti NO_x u fazi manevriranja

Druga zavisna varijabla NO_x, modelirana je na isti način kao i CO₂ varijabla. Na slici 54 prikazana je usporedba izmjerenih (plava boja) i procijenjenih (crvena boja) NO_x podataka, zajedno s izračunatim rezidualnim vrijednostima. Visoki koeficijent determinacije ($R=0,98$) ukazuje na mala odstupanja procijenjenih od izmjerenih NO_x vrijednosti. Najmanja izmjerena vrijednost iznosi 94 ppm, a procijenjena 95,24 ppm, dok najveća izmjerena iznosi 814 ppm, a procijenjena 815,77 ppm. Na dijagramu rezidualnih odstupanja prikazane su razlike između svih izmjerenih i procijenjenih podataka, gdje najveće odstupanje iznosi 26,1 ppm. Pošto su NO_x vrijednosti izražene u ppm jedinici, odstupanja u granicama od 0 do 26 ppm predstavljaju male razlike procijenjenih vrijednosti modela.



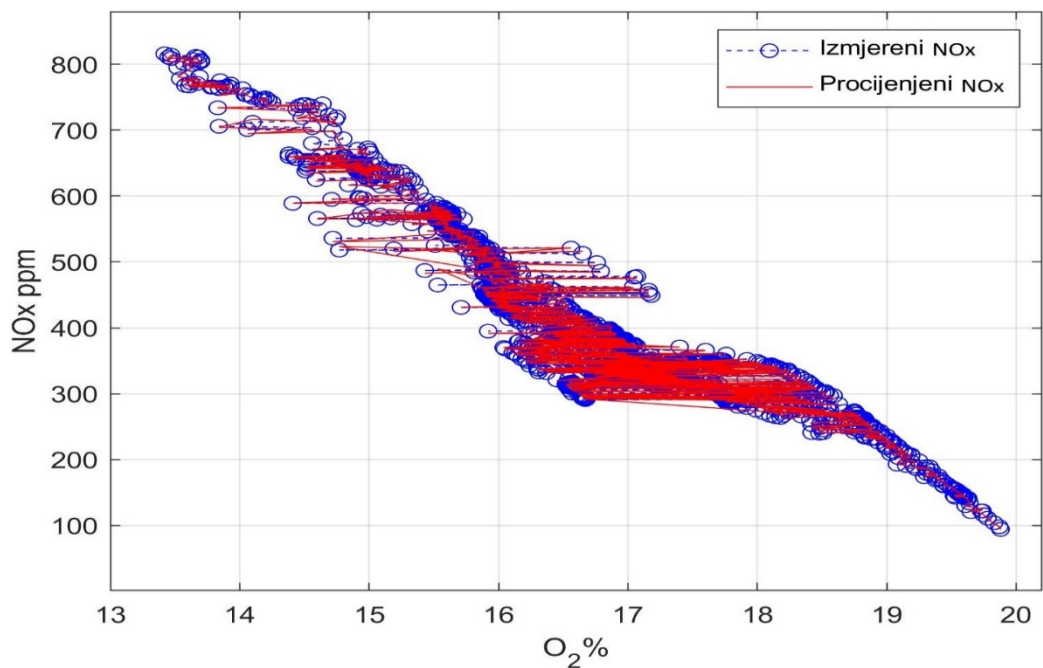
Slika 54. Izmjerene i procijenjene NOx vrijednosti u fazi manevriranja te njihova rezidualna odstupanja

Utjecaj temperature ispušnih plinova (nezavisne varijable) na koncentraciju NOx-a (zavisne varijable) u fazi manevriranja prikazan je na slici 55. Tvorba NOx spojeva ovisi o temperaturi plinova, gdje se pri povećanju temperature povećava i količina NOx-a. Ovaj trend porasta vidljiv je i na dijagramu gdje su NOx vrijednosti (ppm) najveće između temperatura 300 i 350°C. Budući da je riječ o fazi manevriranja većina radnih temperatura motora je između 150 i 250°C, dok su NOx vrijednosti u tim granicama između 300 i 500 ppm-a. Niska rezidualna odstupanja primjetna su na slici s bliskošću izmjerenih i procijenjenih podataka, gdje srednja procijenjena vrijednost NOx-a iznosi 397,4 ppm-a.



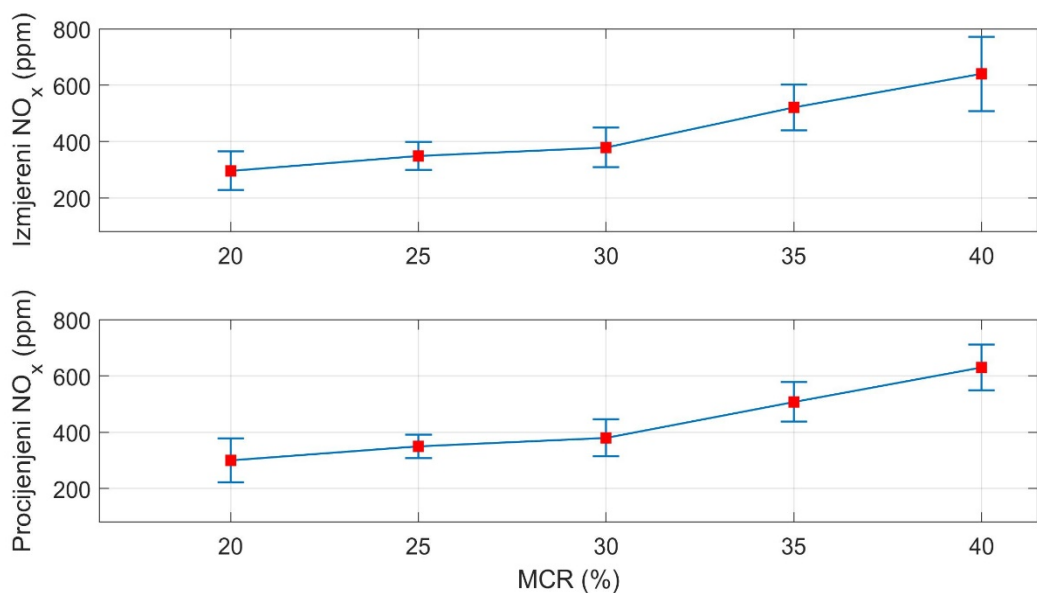
Slika 55. Procijenjeni i izmjereni NOx podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi manevriranja

Udio NOx-a u ispušnim plinovima ovisi i o koncentraciji kisika, odnosno o količini zraka koja ulazi u cilindar i uvjetima izgaranja. U fazi manevriranja motori ne rade s visokim stupnjem učinkovitosti, nego pri niskim opterećenjima kod kojih se ne postiže adekvatna izmjena radnog medija. Na slici 56 primjetno je da povećanje koncentracije kisika uvjetuje smanjenje NOx razine i obratno. U fazi manevriranja najveća izmjerena te ujedno i procijenjena količina podataka je u granicama od 16 do 18% udjela kisika, dok smanjenje udjela na 14% i niže ukazuje na povećanje opterećenja motora odnosno završetak faze manevriranja.



Slika 56. Procijenjeni i izmjereni NOx podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi manevriranja

Usporedba izmjerenih i procijenjenih NOx vrijednosti u ovisnosti o trenutnom opterećenju motora (MCR%) prikazano je na slici 57. Povećanje opterećenja rezultirat će i povećanjem NOx-a u ispušnim plinovima. Srednja izmjerena vrijednost za 20% MCR-a iznosi 296,45 ppm, a procijenjena 299,46 ppm.

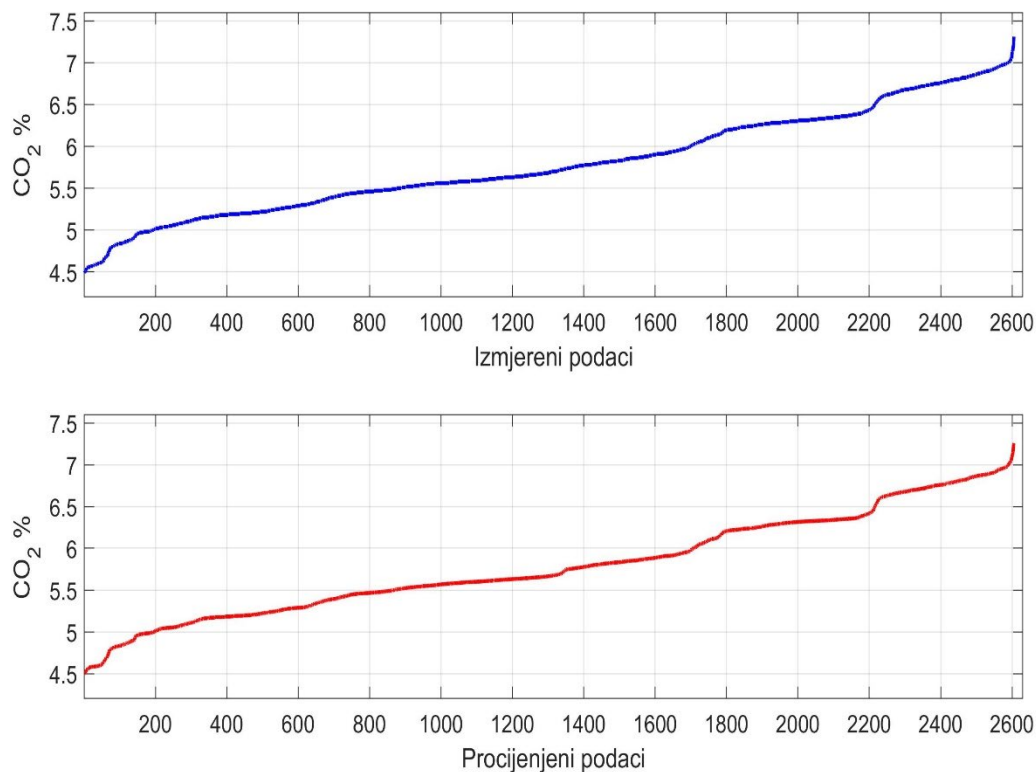


Slika 57. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih NOx vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu manevriranja

Za slučaj pri 25% opterećenja, izmjerena srednja vrijednost iznosi 349,54 ppm, a procijenjena 349,63 ppm, dok vrijednosti za preostala opterećenja iznose: 30% (379,52 i 381,76 ppm), 35% (520,66 i 507,65 ppm) i 40% (639,84 i 629,97 ppm). Ukupna srednja vrijednost NOx-a za fazu manevriranja iznosi 397,43 ppm-a.

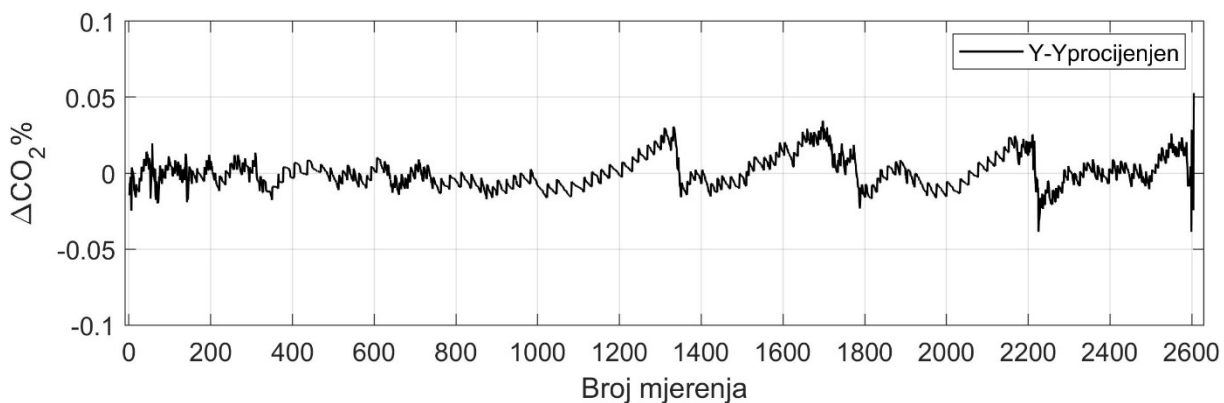
5.2.3. Procijenjene vrijednosti CO₂ u fazi plovidbe

Za razliku od manevriranja, u fazi plovidbe prikupljeno je znatno više podataka pri različitim opterećenjima. Koristeći objašnjenu Gaussovu višestruku regresiju dobivene su procijenjene CO₂ vrijednosti s visokim korigiranim koeficijentom determinacije ($R_{adj}^2 = 0,99$). Izmjerene vrijednosti su u granicama između minimalne 4,49% i maksimalne vrijednosti 7,31%, dok procijenjena minimalna vrijednost iznosi 4,55%, a maksimalna 7,25%. Ukupna izmjerena i procijenjena srednja vrijednost za fazu plovidbe iznosi 5,79 %. Radi jasnije analize izmjerenih i procijenjenih podataka, usporedba je prikazana na dva odvojena dijagrama gdje se vidi podudaranost procijenjenih podataka s izmjerenim, odnosno visoka reprezentativnost modela (slika 58).



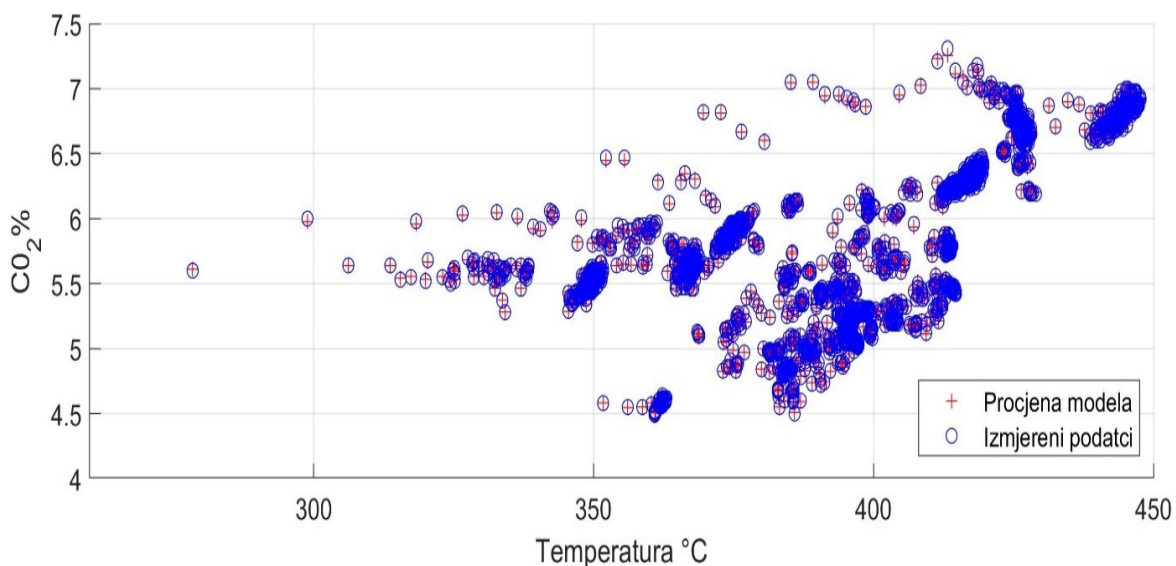
Slika 58. Usporedba izmjerenih i procijenjenih CO₂ vrijednosti u fazi plovidbe

Na dijagramu rezidualnih odstupanja (slika 59) za CO₂ vrijednosti, može se uočiti visoka reprezentativnost procijenjenih podataka s obzirom na razliku od izmjerenih. Vrijednosti svih reziduala su u granicama do 0,1%.



Slika 59. Rezidualna odstupanja CO₂ vrijednosti za fazu plovidbe

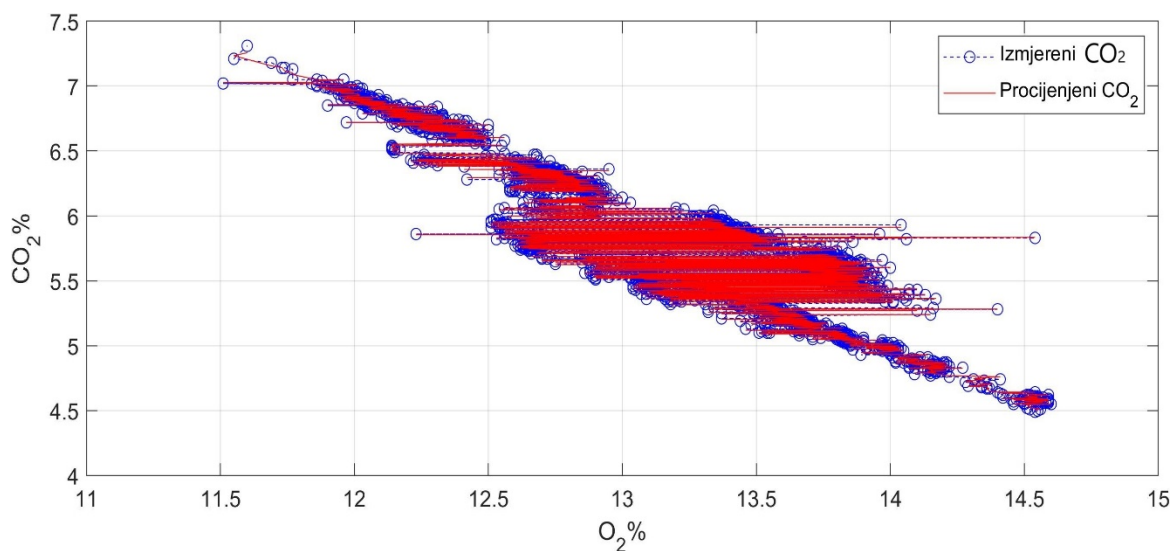
Za razliku od faze manevriranja gdje su se temperature ispušnih plinova kretale pretežito u granicama od 150 do 250°C, u fazi plovidbe granice su između 350 i 450°C. Prosječna srednja temperatura ispušnih plinova u plovidbi iznosi 393,43°C. Ovaj podatak može se uočiti i na slici 60, jer se u tome području nalazi najveći dio izmjerenih i procijenjenih podataka. Faza plovidbe uključuje veći raspon radnog opterećenja motora (55 do 90% MCR-a), gdje visoka opterećenja od 80 do 90% predstavljaju temperature iznad 400°C, dok temperature ispod 400°C odgovaraju nižim opterećenjima do 80% pri kojima se odvija većinski dio faze plovidbe.



Slika 60. Procijenjeni i izmjereni CO₂ podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi plovidbe

Povećanjem temperature ispušnih plinova rezultirat će i povećanje CO₂ vrijednosti posebice kod temperatura iznad 400°C, kod kojih CO₂ doseže i do 7%. Procijenjeni podaci modela zbog visoke reprezentativnosti preklapaju se sa stvarnim izmjerenim podacima (plava boja).

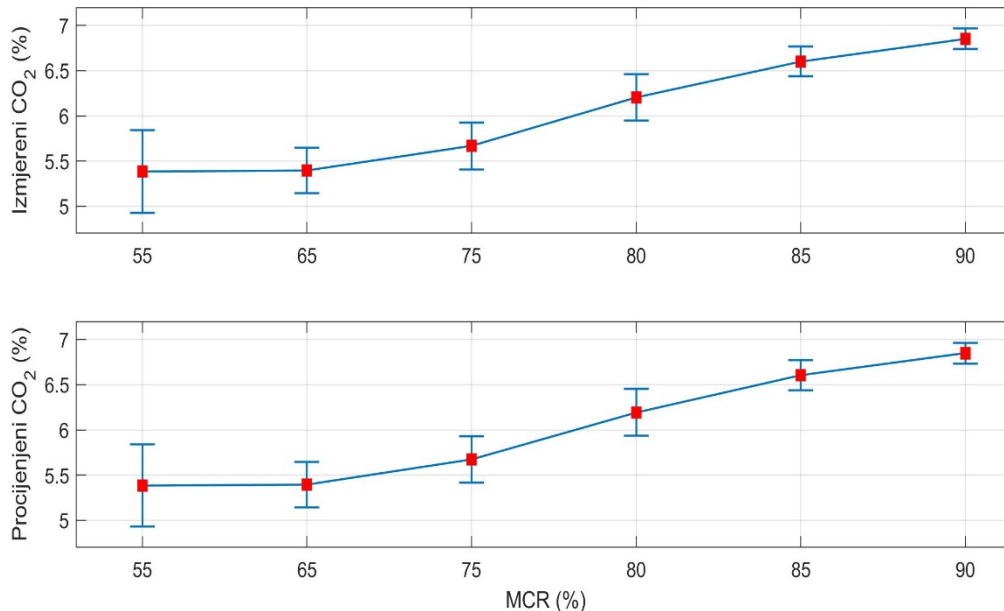
Izmjerene i procijenjene CO₂ vrijednosti u ovisnosti o postotku kisika u ispušnim plinovima za vrijeme plovidbe prikazane su na slici 61. Većina podataka u fazi plovidbe je u granicama između 12 i 14% O₂, dok srednja prosječna O₂ vrijednost iznosi 13,2%. Prosječni postotak kisika je manji nego kod slučaja manevriranja, jer motori rade s većim stupnjem učinkovitosti odnosno adekvatnijim omjerom zraka i goriva. Smanjenje kisika ispod 12% ukazuje na povećanje opterećenja rada motora, a ujedno i koncentracija CO₂.



Slika 61. Procijenjeni i izmjereni CO₂ podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi plovidbe

Sukladno izmjerenim podacima faza plovidbe je podijeljena u ovisnosti o MCR-u na 55, 65, 75, 80, 85 i 90%. Na slici 62 prikazana je usporedba izmjerenih i procijenjenih CO₂ vrijednosti u ovisnosti o određenom opterećenju motora. Povećanje opterećenja uzrokuje rast CO₂ udjela u ispušnim plinovima, što je vidljivo na dijagramu izmjerenih i procijenjenih podataka. Procijenjene vrijednosti modela imaju visoku podudaranost s izmjerenim podacima posebice kod određivanja srednjih prosječnih vrijednosti. Za opterećenje od 55% procijenjena vrijednost iznosi 5,38% CO₂, dok za 65% iznosi 5,40% CO₂.

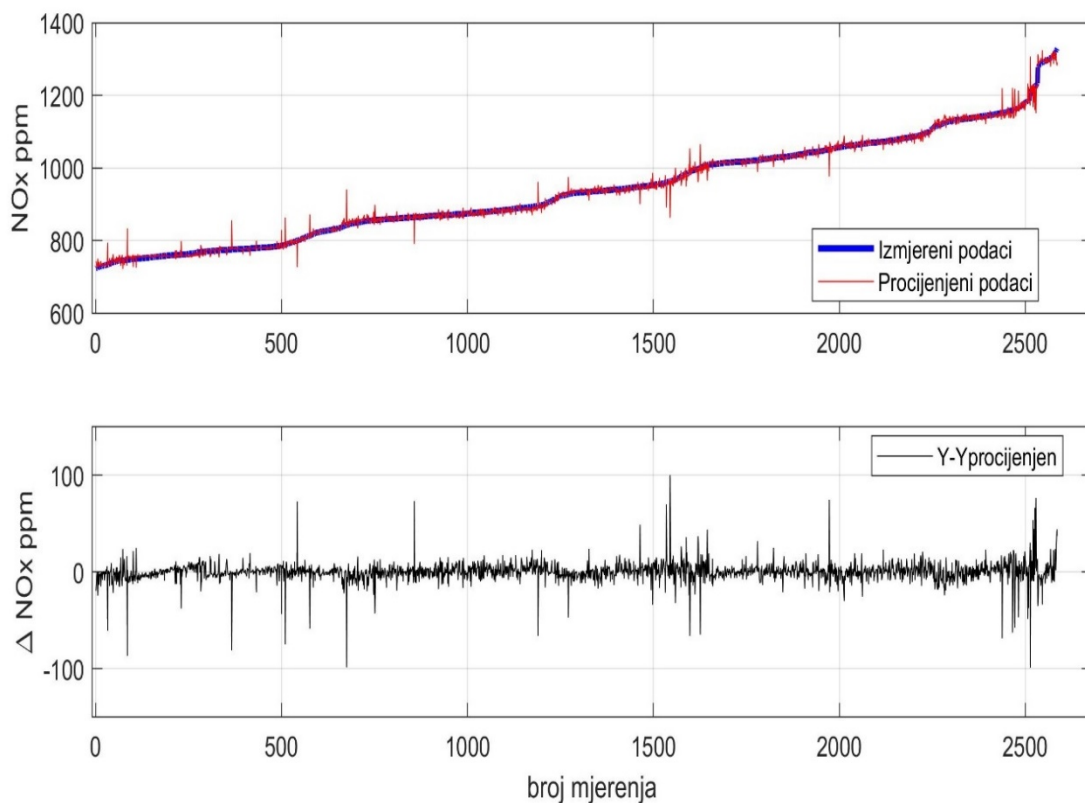
Radni uvjeti izgaranja i CO₂ koncentracije su vrlo slični pri 55 i 65% opterećenja, stoga i prosječne srednje vrijednosti. Razlika je u tome što pri 55% opterećenju dio izmjerenih (ujedno i procijenjenih) koncentracija je ispod 5% CO₂. Kod ostalih opterećenja primjetan je trend rasta CO₂ postotka, gdje pri 75% iznosi 5,66%, 80% (6,21%), 85% (6,60%) i 90% (6,85%).



Slika 62. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih CO₂ vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu plovidbe

5.2.4. Procijenjene vrijednosti NO_x u fazi plovidbe

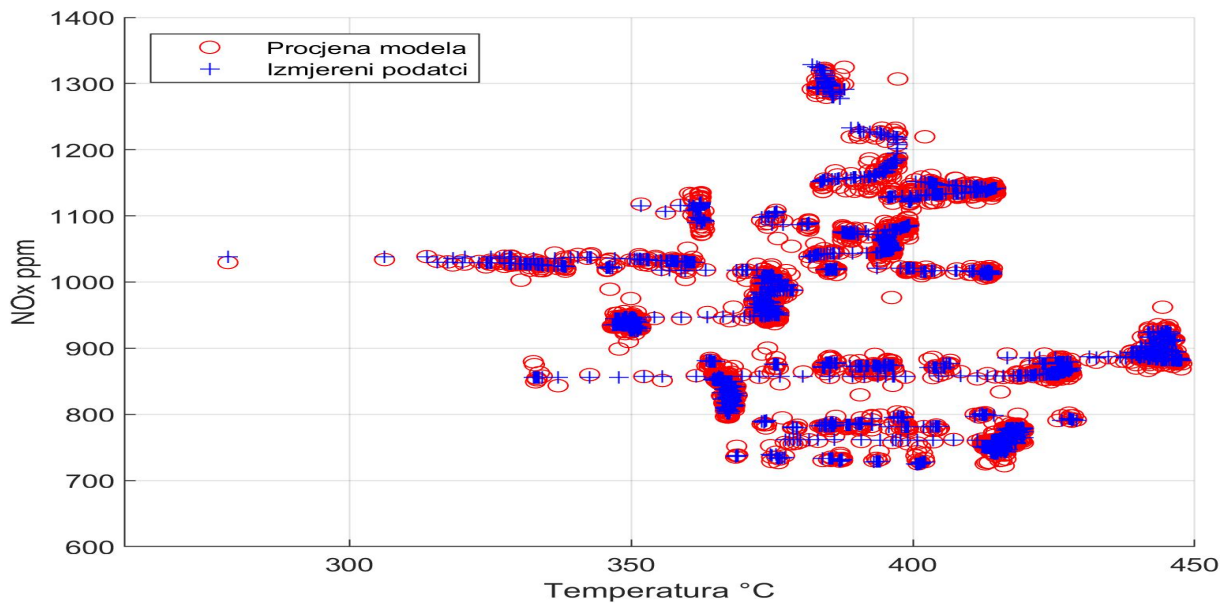
Osim CO₂ varijable, modelirana je i NO_x zavisna varijabla za fazu plovidbe sukladno izmjerenim podacima. Kod faze plovidbe motori rade kontinuirano pri visokim opterećenjima gdje dolazi do povećanja temperatura ispušnih plinova, a s time i prosječne vrijednosti NO_x-a. Na slici 63 prikazana je usporedba izmjerenih (plava linija) NO_x podataka i procijenjenih podataka modela (crvena linija), koristeći Gaussovu višestruku regresiju. Korigirani koeficijent determinacije R_{adj}^2 iznosi 0,98 što je pokazatelj visoke reprezentativnosti procijenjenih podataka. Najniža izmjerena NO_x vrijednost u fazi plovidbe iznosi 724 ppm-a, a najniža procijenjena 722,3 ppm-a, dok najveća izmjerena NO_x razina iznosi 1329 ppm-a i procijenjena 1324,6 ppm-a.



Slika 63. Izmjerene i procijenjene NOx vrijednosti te njihova rezidualna odstupanja u fazi plovidbe

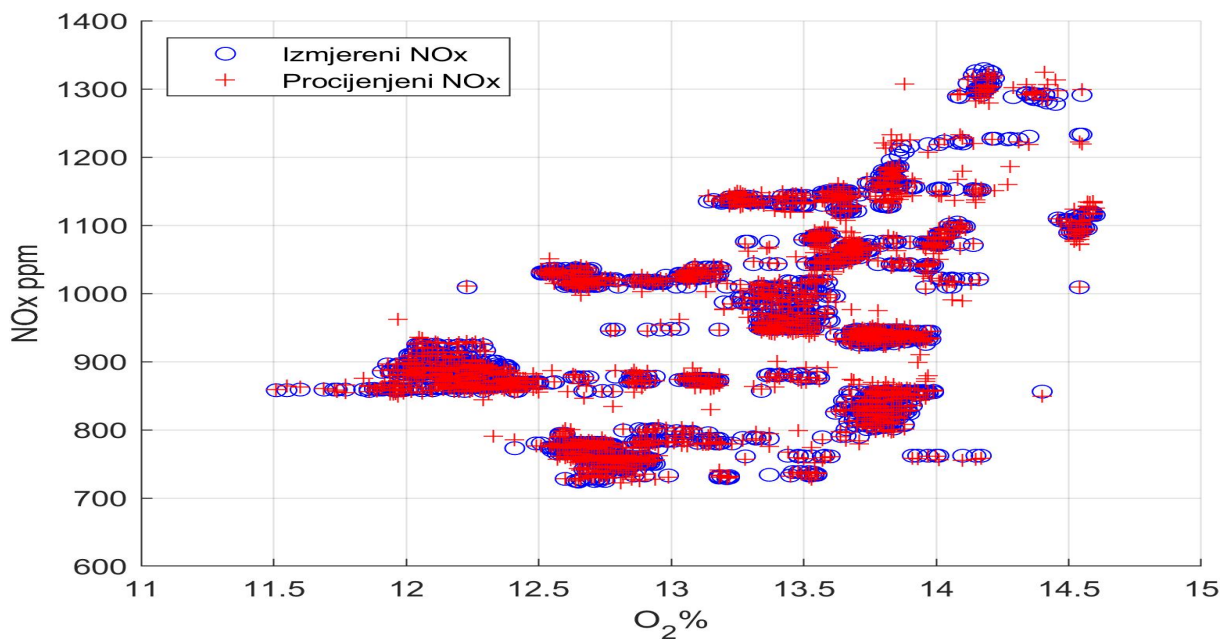
Na dijagramu rezidualnih odstupanja uočljivo je da procijenjene vrijednosti imaju visoku pouzdanost zbog malih odstupanja od izmjerenih. Najveće odstupanje iznosi 98,95 ppm-a, ali takva odstupanja su samo za tri procijenjena podataka, dok su ostale vrijednosti u granicama do 57 ppm (srednja vrijednost reziduala).

Zavisnost NOx-a o temperaturi ispušnih plinova te usporedba procijenjenih i izmjerenih podataka prikazana je na slici 64, gdje se također može uočiti visoka reprezentativnost zbog blizine procijenjenih i izmjernih podataka. Za razliku od faze manevriranja, dio NOx podataka ne prati trend porasta ovisno o povećanju temperature ispušnih plinova. Jedan od razloga su izmjerene vrijednosti na M/T Zadru čije NOx vrijednosti su povišene (usporedno s ostalim podacima za isto opterećenje na drugim brodovima) i ukazuju na mogućnost nepravilnog izgaranja.



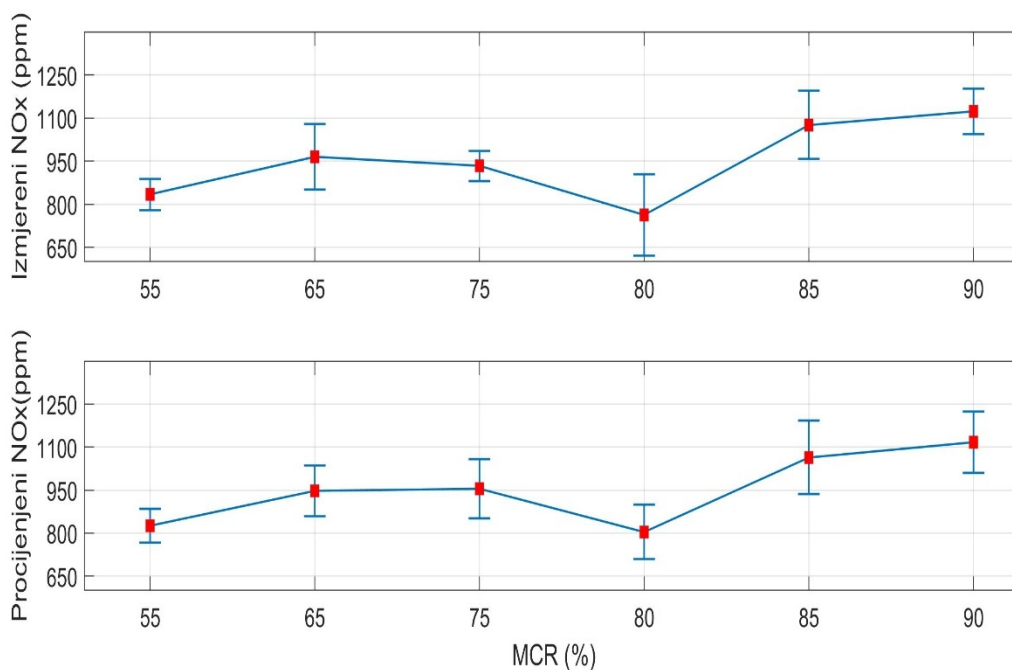
Slika 64. Procijenjeni i izmjereni NOx podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi plovidbe

U fazi plovidbe zbog učinkovitog rada motora smanjen je i postotak kisika, te srednja prosječna O₂ vrijednost (%) iznosi 13,19%, što je vidljivo na slici 65 gdje su većina izmjerenih i procijenjenih podataka u granicama od 12 do 14%. Podaci u fazi manevriranja pokazali su da povećanje postotka kisika uzrokuje smanjenja NOx-a i obratno, dok u plovidbi dio podataka pripada radu s učinkovitim opterećenjem gdje su smanjene NOx vrijednosti i udio kisika (većina podataka ne prelazi 1000 ppm-a).



Slika 65. Procijenjeni i izmjereni NOx podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi plovidbe

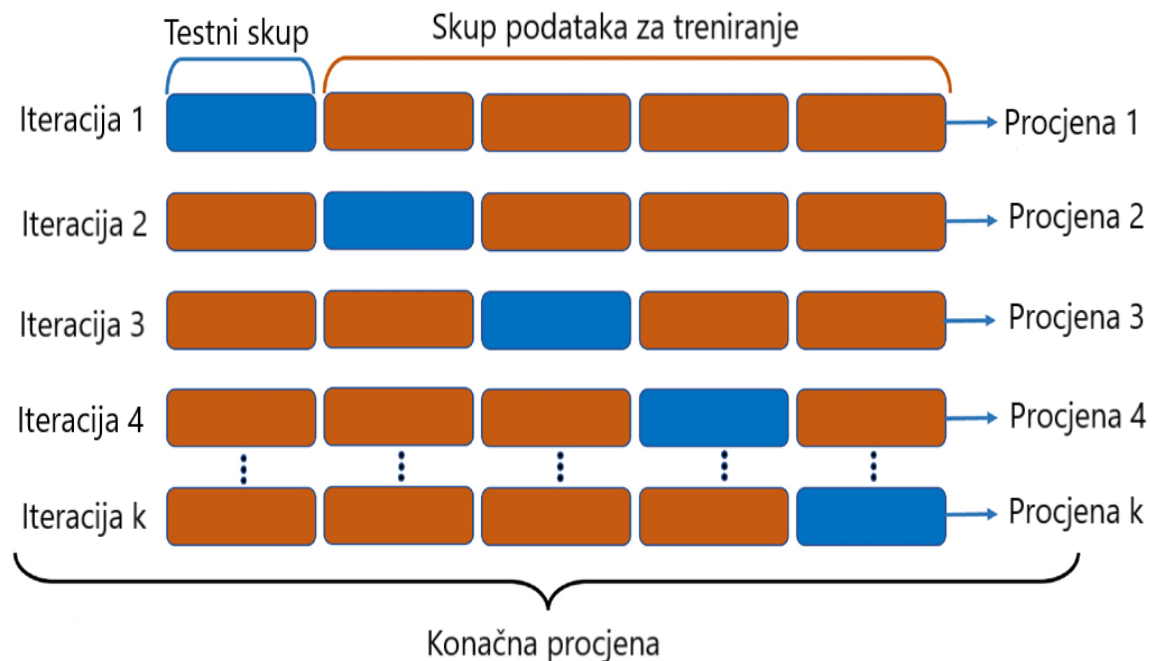
Promjena opterećenja motora utječe na koncentracije NO_x-a u ispušnim plinovima. Na slici 66 prikazan je utjecaj promjene opterećenja, gdje su upoređene srednje vrijednosti i standardne devijacije izmjerenih i procijenjenih NO_x vrijednosti. Faza plovidbe podijeljena je između 55% i 90% opterećenja kao u slučaju CO₂ varijable. Plovidba pri 55% MCR-a rezultirala je srednjim NO_x vrijednostima od 833,6 ppm, dok procijenjena vrijednost za isto opterećenje iznosi 825,36 ppm. Kod opterećenja od 65% i 75% dolazi do povećanja NO_x-a, gdje izmjerena srednja vrijednost za 65% iznosi 964,49 ppm, a procijenjena 947,60ppm, te pri opterećenju od 75% srednja izmjerena vrijednost iznosi 932,88 ppm i procijenjena 955,35 ppm. Pri opterećenju od 80% izmjereni rezultati ukazuju da motori rade s višim stupnjem djelovanja, gdje su NO_x vrijednosti snižene, te srednja vrijednost iznosi 762,50 ppm. Sukladno tome procijenjena srednja vrijednost NO_x-a za 80% opterećenja iznosi 804,58 ppm. Dodatno povećanje opterećenja (85 i 90%) rezultira povišenim NO_x vrijednostima, gdje kod 85% srednja izmjerena vrijednost iznosi 1076,22 ppm, a procijenjena 1064,07 ppm. Za slučaj od 90% opterećenja srednja izmjerena NO_x vrijednost iznosi 1123,33 ppm, a procijenjena 1117,02 ppm.



Slika 66. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih NO_x vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu plovidbe

5.3. Validacija modela

Nakon prikazanih dobivenih modela, bilo je potrebno izvršiti validaciju kako bi se utvrdila uspješnost modela i reprezentativnost za buduća istraživanja. Korištena metoda validacije je tzv. unakrsna validacija (engl. 'Cross-Validation'). Podaci su podijeljeni na skup podataka za treniranje s kojima se razvija model, te podatke za testiranje na kojima se dobiveni model ispituje (slika 67). Kod unakrsne validacije podaci se podijele u određen broj podskupova (engl. 'k-folds') koji se koriste za testiranje modela dok se preostali skup podataka koristi za treniranje. Proces se ponavlja ovisno o broju iteracija, te se pri svakoj iteraciji koristi različiti podskup za testiranje. Nakon odrađene zadnje iteracije uzima se u obzir prosjek učinkovitosti modela u odnosu na svaki podskup, te se dobiva konačna pouzdanost modela. Broj podskupova odabire se ovisno o količini podataka.



Slika 67. Prikaz izvođenja unakrsne validacije [138]

Ova metoda validacije izabrana je zbog visoke pouzdanosti kod velikog broja podataka i jer testni skupovi radi podjele obuhvaćaju sve uvjete (sva različita opterećenja motora) pri kojima je model izrađen. Metoda validacije gdje se jedan dio podataka izostavi (engl. 'holdout validation') i kasnije se koristi za testiranje modela, nije adekvatna za ovo istraživanje jer bi validacija obuhvaćala samo izmjerene podatke za jedno određeno opterećenje.

Svi podaci iz faze plovidbe i manevriranja podijeljeni su u 10 podskupova ($k=10$). U fazi plovidbe svaki pojedini podskup sadrži 260 podataka za testiranje modela, što od ukupnog broja podataka (2607) obuhvaća 11%. U slučaju faze manevriranja, podskup sadrži 180 podataka od ukupno 1802, tj. 10% podataka pripada testnom skupu. Nakon svake određene iteracije računa se srednja pogreška modela, te se rezultati svih iteracija kombiniraju da se dobije konačna greška modela.

U MATLAB-u je odrađena unakrsna validacija CO₂ i NO_x modela s 10 podskupova te je izračunata ukupna srednja greška modela (engl. 'kfoldLoss'):

CO₂ ukupna srednja greška = 0,0064 = 0,64%

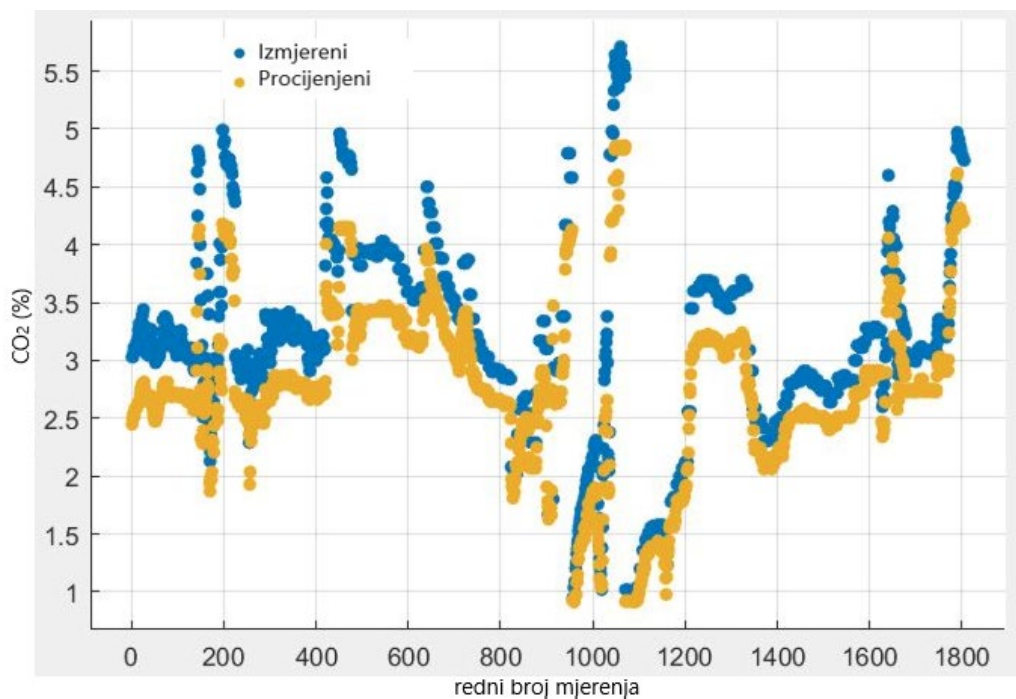
NO_x ukupna srednja greška = 0,0114 = 1,14%

Rezultati unakrsne validacije ukazuju na visoku reprezentativnost modela i uspješnu procjenu zavisnih varijabli.

Osim Gaussove metode, testirane su: metoda regresijskog stabla i metoda višestruke linearne regresije. Nedostatak višestruke linearne regresije je taj što se pretpostavlja da je odnos zavisne i nezavisne varijable linearan što kod ne linearnih podataka rezultira u odstupanju u procijenjenim vrijednostima. Nadalje, ova metoda je osjetljiva na podatke koji odstupaju od linearnog puta (pravca) regresije što je slučaj kod prikupljenih CO₂ i NO_x podataka zbog njihovih promjena u vrijednostima prilikom plovidbe. Kod linearne višestruke regresije pretpostavlja se da su rezidualne vrijednosti varijabli konstantne, te ako je ovo pravilo narušeno dolazi do pogrešaka u procjenama izlaznih varijabli.

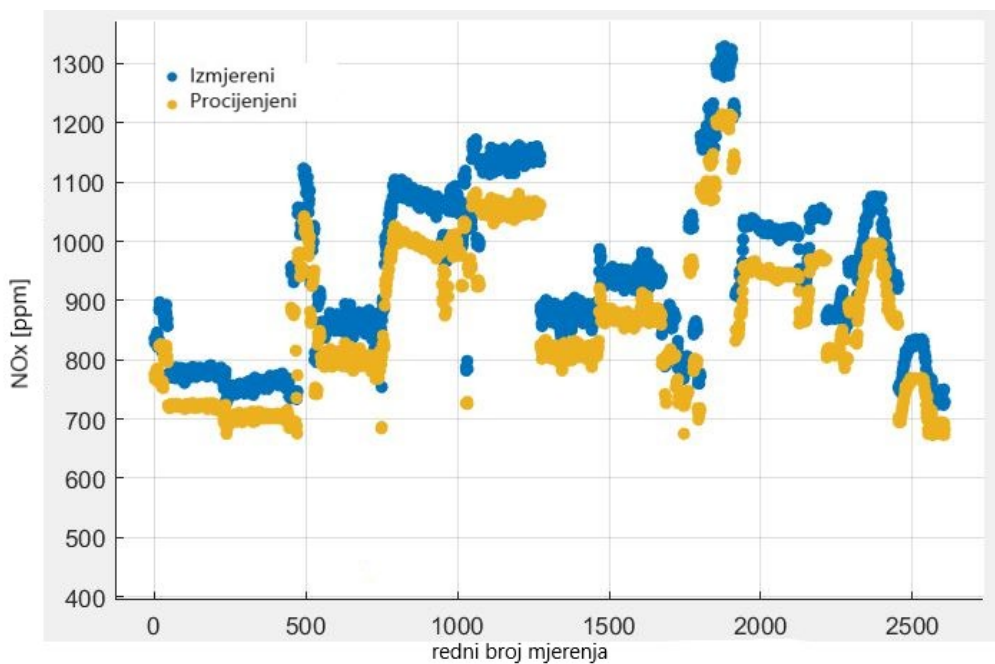
Metoda stabla regresije još se naziva i metoda 'stabla odlučivanja', a koristi se u procesima modeliranja i klasifikacijskih problema. Ova metoda je korisna kod nelinearnih podataka jer pruža mogućnost prikazati model u razumljivom obliku, odnosno struktura modela je kreirana s pravilima (granama) koji se mogu interpretirati na logičan način. Glavni problem je tzv. 'overfitting' gdje model zanemaruje podatke koji odstupaju i procijenjene vrijednosti su jednake stvarnim, što u konačnici dovodi do nereprezentativnog modela. Nedostatak je što male promjene podataka mogu dovesti do značajnih promjena u strukturi stabla (npr. izgaranje goriva je specifično za svaki pojedini motor i sastav ispušnih plinova se ne mijenja zbog istog pravila na svima ispitanim motorima).

Gaussova metoda višestruke regresije omogućava modeliranje s nelinearnim podacima, te ne ovisi o unaprijed definiranim parametrima modela jer koristi mogućnost odabira (podešavanje) kovarijance (poglavlje 5.1.1) što je korisno kod promjenjive distribucije podataka. S ovim pristupom se minimaliziraju greške (odstupanja) izlaznih varijabli posebice u slučaju velikog broja ulaznih podataka. Prednost metode je i učinkovita procjena podataka koji su u interpolaciji ili ekstrapolaciji.



Slika 68. Modeliranje CO₂ varijable u fazi manevriranja s metodom regresijskog stabla (R=0,75, RMSE=54,046)

Pokušaj modeliranja CO₂ varijable s metodom regresijskog stabla prikazan je na slici 68, gdje se može uočiti odstupanje procijenjenih od izmjerenih podataka. Srednja kvadratna pogreška iznosi 54,046, dok koeficijent determinacije iznosi 0,75 što je pokazatelj da model nije dovoljno uspješan, za razliku od Gaussove regresije gdje je koeficijent determinacije iznosio u slučaju CO₂ varijable 0,986.



Slika 69. Modeliranje NOx-a u fazi plovidbe s metodom slučajnog regresijskog stabla ($R=0,75$, $RMSE=68,891$)

Na slici 69 prikazano je modeliranje s metodom slučajnog regresijskog stabla, gdje je pojedino 'stablo' modela izrađeno s različitim skupom podataka (nasumice odabrani redovi i stupci). Rezultati NOx modeliranja ukazuju na odstupanja gdje je koeficijent determinacije 0,75, a srednja kvadratna pogreška 68,891. Kod modeliranja s Gaussovom regresijom srednja kvadratna pogreška iznosi 0,09 i koeficijent determinacije 0,98 što je pokazatelj visoke uspješnosti modela. Rezultatima unakrsne validacije prikazana je visoka uspješnost modela, dok je usporedbom s ostalim metodama nelinearnih regresija dokazana prednost modeliranja s Gaussovom regresijom.

6. PRIMJENA REZULTATA I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

U ovome poglavlju prikazat će se usporedba procijenjenih emisijskih faktora s emisijskim faktorima iz relevantnih studija inventara brodskih emisija, te preporuke za unaprijeđene procjena emisija iz brodskih postrojenja. Nakon dobivenih rezultata modeliranja, procijenjene CO₂ i NO_x vrijednosti potrebno je pretvoriti u emisijske faktore (g/kWh).

6.1. Pretvorba mjernih jedinica

Izmjerene i procijenjene NO_x vrijednosti prikazane su u ppm mjernoj jedinici, dok su CO₂ vrijednosti prikazane kao postotak udjela u ispušnim plinovima. Potrebno ih je pretvoriti u g/kWh, što predstavlja emisijske faktore izražene kao omjer mase plina po jedinici snage motora.

Pretvorba ppm-a u g/kWh dobivena je s jednadžbom [33]:

$$EF_i = C_j \cdot 10^{-6} \cdot \frac{M_i}{M_{isp}} \cdot \frac{m_{isp}}{P} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (33.1)$$

Jednadžba za pretvorbu postotka u g/kWh [33]:

$$EF_i = C_j \cdot 10^{-2} \cdot \frac{M_i}{M_{isp}} \cdot \frac{m_{isp}}{P} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (33.2)$$

gdje je:

EF_i = emisijski faktor za određeni plin (g/kWh)

C_j = NO_x ili CO₂ koncentracija u ispušnim plinovima (ppm ili %)

M_i = relativna molekularna masa plina (kmol/kg)

M_{isp} = molekularna masa ispušnih plinova (kmol/kg)

m_{isp} = protok ispušnih plinova (kg/h)

P = trenutna snaga glavnog motora (kW).

Kako bi se odredila točna količina protoka ispušnih plinova potrebno je poznavati kemijski sastav goriva. Prilikom procesa izgaranja goriva koje sadrži udio ugljika, vodika i sumpora, ukupni volumen (V_{isp}) i masa (m_{isp}) nastalih ispušnih plinova izračunavaju se s jednadžbama [139]:

$$V_{isp} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \left[\frac{kmol_{isp.plinova}}{kg_{goriva}} \right] \quad (34.1)$$

$$m_{isp} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} \left[\frac{kg_{isp.plinova}}{kg_{goriva}} \right] \quad (34.2)$$

Za izračun masenog i volumnog udjela pojedinog plina korištene su stehiometrijske jednadžbe izgaranja [140]:

$$V_{CO_2} = \frac{c}{12} \left[\frac{kmol_{CO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.1)$$

$$m_{CO_2} = 44 \cdot \frac{c}{12} \left[\frac{kg_{CO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.2)$$

$$V_{SO_2} = \frac{s}{32} \left[\frac{kmol_{SO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.3)$$

$$m_{SO_2} = 2 \cdot s \left[\frac{kg_{SO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.4)$$

$$V_{N_2} = \frac{n}{28} + 0,79 \cdot \lambda \cdot \frac{V_{O,min}}{0,21} \left[\frac{kmol_{N_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.5)$$

$$m_{N_2} = n + 0,77 \cdot \lambda \cdot \frac{m_{O,min}}{0,23} \left[\frac{kg_{N_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.6)$$

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot V_{O,min} \left[\frac{kmol_{O_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.7)$$

$$m_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot m_{O,min} \left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (35.8)$$

Gdje se minimalna (teorijska) potrebna količina kisika za izgaranje izračunava [141]:

$$V_{O,min} = \frac{c}{12} + \frac{1}{4} \left(h - \frac{o}{8} \right) + \frac{s}{32} \left[\frac{kmol_{O_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (36.1)$$

$$m_{O,min} = 2,66 + 8 \left(h - \frac{o}{8} \right) + s \left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (36.2)$$

Te minimalna količina zraka za izgaranje i pretičak zraka (λ) za izgaranje [141]:

$$V_{zrak,min} = \frac{V_{O,min}}{0,21} \left[\frac{kmol_{zrak}}{kg_{goriva}} \right] \quad (37.1)$$

$$V_{zrak} = \lambda \cdot V_{zrak,min} \left[\frac{kmol_{zrak}}{kg_{goriva}} \right] \quad (37.2)$$

$$m_{zrak,min} = \frac{m_{O,min}}{0,23} \left[\frac{kg_{zrak}}{kg_{goriva}} \right] \quad (37.3)$$

$$\lambda = \frac{V_{zrak}}{V_{zrak,min}} = \frac{m_{zrak}}{m_{zrak,min}} \quad (37.4)$$

Radi jasnijeg uvida u pretvorbu NO_x (ppm) i CO₂ (%) vrijednosti u mjernu jedinicu g/kWh, prikazani su primjeri izračuna koristeći jednadžbe (33.1) i (33.2).

Primjer izračuna NO_x emisijskog faktora:

$$EF(NO_x)[ppm] = 932,88ppm \cdot 10^{-6} \cdot \frac{46kg/mol}{29,4905 kg/mol} \cdot \frac{20004,16 kg/h}{2640 kW} = 11,0126 g/kWh$$

U prikazanom primjeru uzeta je NO_x vrijednost (932,88 ppm) pri plovidbi s opterećenjem motora od 75%. Trenutna snaga iznosi 2640 kW i dobivena je s umnoškom ukupne snage (3520 kW) i opterećenja motora od 0,75. Relativna molekularna masa plina za NO_x iznosi 46 kg/kmol, dok je masa ukupnih suhih dimnih plinova 29,4905 kg/kmol, koja je izračunata s jednadžbom (34.2) što predstavlja zbroj svih masenih udjela plinova ($m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2}$). Protok suhih dimnih plinova iznosi 20004,2 kg/h, te je dobiven kao umnožak izračunatog volumena ukupnih dimnih plinova (37,3114 kg/kg) i potrošnje goriva (536,141 kg/h). Volumen dimnih plinova nije izmjeren podatak nego izračunat koristeći jednadžbu (34.1), gdje su izračunati i zbrojeni svi volumni sastavi pojedini plinovi ($V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$) i predstavljaju ukupni volumen u suhim dimnim plinovima.

Prilikom izračuna volumnog i masenog sastava ispušnih plinova potrebno je odrediti kemijski sastav goriva te pretičak zraka. Udio sumpora je potvrđen s Deklaracijom kvalitete (tablica 33. i Prilog I), dok je udio ugljika (87,3%) i vodika (12,6%) određen u skladu s ISO 8217 2017 normom koja odgovara ovoj vrsti brodskog goriva. Pretičak zraka je izračunat s jednadžbom (37.4), odnosno omjerom stvarno dovedene količine zraka za izgaranje i minimalno potrebne (teoretske) količine zraka:

$$\lambda = \frac{V_{zrak}}{V_{zrak,min}} = \frac{35,6436 kg/kg}{14,4834 kg/kg} = 2,461$$

Primjer izračuna CO₂ emisijskog faktora:

$$EF(CO_2)[\%] = 5,667 \% \cdot 10^{-2} \cdot \frac{44kg/kmol}{29,4905 kg/kmol} \cdot \frac{20004,16 kg/h}{2640 kW} = 640,68 g/kWh$$

Za CO₂ primjer izračuna u g/kWh prikazan je primjer s vrijednošću od 5,667% koji odgovara opterećenju motora od 75%. Relativna molekularna masa plina za CO₂ iznosi 44 kg/kmol, dok su ostale vrijednosti u jednadžbi jednake kao u prethodnom primjeru. Nakon izračuna dobiva se vrijednost u g/kWh te je pretvoreno u g/kWh.

6.2. Usporedba emisijskih faktora

S ciljem unaprijeđena procjene emisija iz brodskih postrojenja potrebno je usporediti dobivene emisijske faktore koje uključuju eksploatacijske uvjete plovidbe s trenutno postojećim emisijskim faktorima. Korištenjem prethodno opisanih jednadžbi dobiveni su emisijski faktori (g/kWh) za CO₂ i NO_x tvari u fazi plovidbe i manevriranja pri različitim opterećenjima rada motora. U tablici 38 prikazani su emisijski faktori za CO₂ i NO_x tvari u fazi plovidbe, ovisno o zadanome opterećenju motora. Iz tablice je vidljivo da promjena opterećenja motora utječe na vrijednosti emisijskih faktora, odnosno da promjenjivi eksploatacijski uvjeti rezultiraju promjenama emisijskih faktora, s čime je potvrđena prva pomoćna hipoteza istraživanja. Procijenjeni su emisijski faktori za opterećenja od 55 do 90%, te prosječna srednja vrijednost za fazu plovidbe u slučaju ako se ne uzima specifično opterećenje. Procijenjeni srednji CO₂ emisijski faktor za fazu plovidbe iznosi 680,25 g/kWh, dok za NO_x iznosi 11,21 g/kWh.

Tablica 38. Procijenjeni emisijski faktori za fazu plovidbe

| MCR opterećenje % | Emisijski faktor g/kWh | |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| | CO ₂ u plovidbi | NO _x u plovidbi |
| 55 | 830,33 | 13,43 |
| 65 | 703,63 | 12,09 |
| 75 | 640,68 | 11,02 |
| 80 | 657,34 | 8,44 |
| 85 | 658,57 | 11,22 |
| 90 | 645,63 | 11,06 |
| Prosjek | 680,25 | 11,21 |

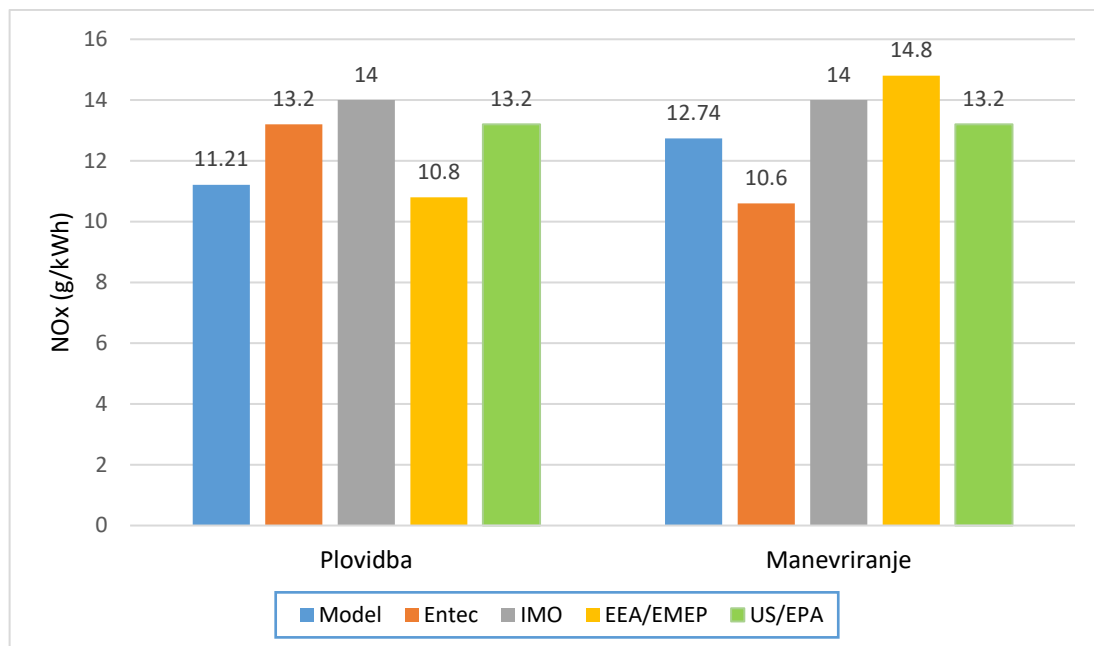
Kod slučaja manevriranja emisijski faktori procijenjeni su za opterećenja od 20 do 40%, također i prosječni emisijski faktor za fazu manevriranja koji iznosi 926,2 g/kWh za CO₂ i 12,74 g/kWh za NO_x tvari (tablica 39). Kao u fazi plovidbe, vrijednosti emisijskih faktora su promjenjive ovisno o opterećenju motora.

Tablica 39. Procijenjeni emisijski faktori za fazu manevriranja

| MCR opterećenje % | Emisijski faktor g/kWh | |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | CO ₂ u manevriranju | NO _x u manevriranju |
| 20 | 1112,5 | 13,27 |
| 25 | 957,8 | 12,39 |
| 30 | 970,85 | 11,23 |
| 35 | 856,39 | 12,85 |
| 40 | 826,71 | 13,96 |
| Prosjek | 926,2 | 12,74 |

Dijagram na slici 70 prikazuje usporedbu NO_x emisijskih faktora (g/kWh) iz relevantnih studija inventara emisija s procijenjenim emisijskim faktorima (Model). Emisijski faktori su podijeljeni u dvije kategorije, za fazu plovidbe i manevriranja, te se isključivo odnose na srednjeokretne glavne motore pri upotrebi goriva s niskim udjelom sumpora (0,1%).

Pošto se model zasniva na istraživanju kod motora koji su ugrađeni prije 2000. godine, sukladno tome preuzeti su NO_x emisijski faktori za tu kategoriju (NO_x Razred 0). Jedan od problema studija inventara je taj što se uzima jedan univerzalan emisijski faktor za određen tip motora i vrstu goriva, bez obzira na trenutno opterećenje i snagu motora, odnosno zanemaruju se promjenjivi eksploatacijski režimi plovidbe. Studije IMO i US/EPA nemaju definirane kategorije za aktivnost broda (manevriranje i plovidba), s toga je uzet jednak emisijski faktor za obje kategorije (IMO - 14 g/kWh, US/EPA – 13,2 g/kWh) kao referenta vrijednost što može rezultirati pogrešnom procjenom ukupnih emisija. Procijenjeni emisijski faktor modela u plovidbi iznosi 11,21 g/kWh, te je niži nego u fazi manevriranja gdje iznosi 12,74 g/kWh. Razlog je taj jer se uzima u obzir učinkovito i optimizirano izgaranje pri većim opterećenjima rada motora, što je karakteristično za fazu plovidbe. Sve navedene studije ne definiraju emisijske faktore ovisno o opterećenju motora, već prihvaćaju procjenu Entec studije gdje je faza plovidbe određena s 80%, a manevriranje s 20% opterećenja rada motora.

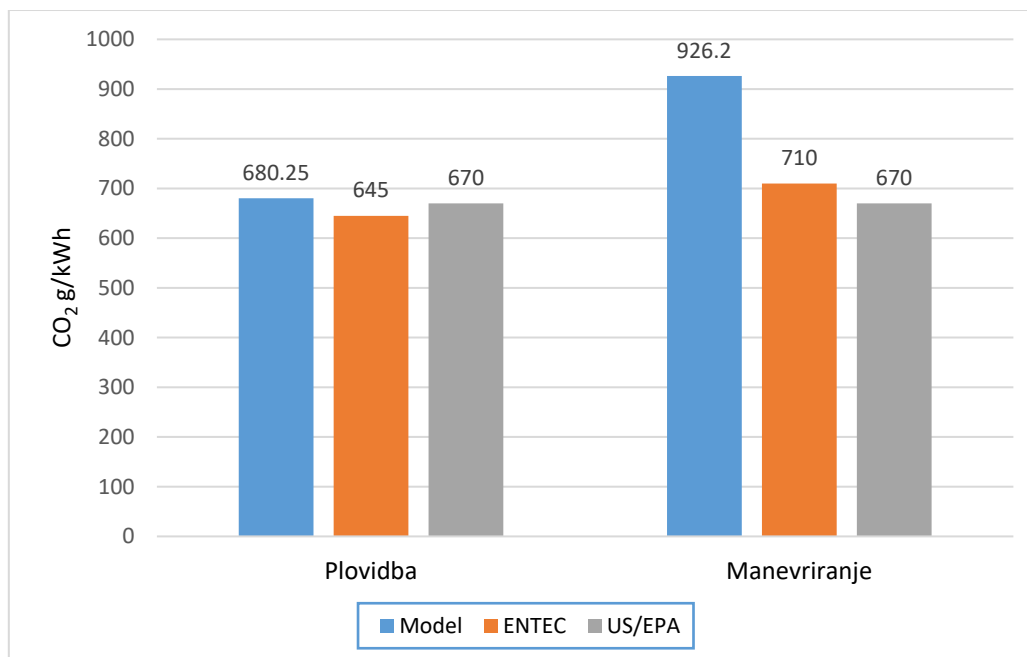


Slika 70. Usporedba NO_x emisijskih faktora (g/kWh) u fazama plovidbe i manevriranja

Ako bi se opterećenje od 80% postavilo kao referentna vrijednost za plovidbu, onda procijenjeni NO_x emisijski faktor iznosi 8,44 g/kWh. Za razliku od ostalih studija, ova vrijednost uzima u obzir optimalan način rada motora što je dokazano usporedbom sa stvarnim izmjerenim podacima gdje su NO_x koncentracije pri 80% opterećenja bile najniže. Prednost procijenjenih vrijednosti modela je mogućnost izbora emisijskog faktora ovisno o načinu rada motora, tj. eliminirana je zavisnost o srednjoj prosječnoj vrijednosti što je slučaj u navedenim studijama. U prethodnom poglavlju prikazani su dijagrami ovisnosti NO_x-a o temperaturi ispušnih plinova i koncentraciji kisika, te se na temelju njih može također izvući odgovarajući emisijski faktor pošto se NO_x koncentracije mijenjaju sukladno promjenama ovih dviju varijabli.

U fazi manevriranja srednja prosječna NO_x vrijednost modela je veća nego kod faze plovidbe te iznosi 12,74 g/kWh. Ovaj procijenjen podatak odgovara stvarnim uvjetima jer kod niskih opterećenja dolazi do neadekvatnog izgaranja. Ostale studije zanemaruju ove uvjete rada motora te su njihovi emisijski faktori smanjeni kod manevriranja, osim kod EEA/EMEP studije gdje emisijski faktor za plovidbu iznosi 10,8 g/kWh, dok u manevriranju iznosi 14,8 g/kWh. Kod Entec studije emisijski faktor za plovidbu iznosi 13,2 g/kWh, a za manevriranje 10,6 g/kWh uz procijenjen stupanj pogreške za NO_x ($\pm 20\%$ za plovidbu i $\pm 40\%$ za manevriranje). IMO studija i US/EPA nemaju definiranu aktivnost broda, s toga njihove prosječne NO_x vrijednosti mogu dodatno odstupati od stvarnih, posebice kod faze manevriranja. Isto kao kod faze plovidbe, prednost emisijskih faktora modela je mogućnost odabira ovisno o trenutnom opterećenju motora prilikom manevriranja, što uključuje opterećenja od 20,25,30,35 i 40%. Odabirom željenog emisijskog faktora ovisno o opterećenju motora rezultirat će i reprezentativnijom procjenom ukupne količine NO_x emisija.

Procijenjeni CO₂ emisijski faktori (Model) uspoređeni su s Entec i US/EPA studijama, dok IMO i EEA/EMEP studije ne prikazuju CO₂ emisijske faktore na temelju nastalih emisija po jedinici snage motora. Na slici 69 prikazan je dijagram usporedbe emisijskih faktora za CO₂ u fazama plovidbe i manevriranja. U fazi plovidbe procijenjeni emisijski faktor iznosi 680,25 g/kWh, 645 g/kWh u studiji Entec, te 670 g/kWh kod US/EPA studije. Pretpostavka Entec studije je da opterećenje od 80% MCR-a predstavlja fazu plovidbe, s procjenom pogreške emisijskih faktora od $\pm 10\%$. Procijenjeni emisijski faktori obuhvaćaju raspon opterećenja od 55 do 90%, te pružaju mogućnost odabira CO₂ faktora ovisno o stvarnom opterećenju motora.



Slika 71. Usporedba CO₂ emisijskih faktora (g/kWh) u fazama plovidbe i manevriranja

U slučaju manevriranja emisijski faktori spomenutih studija i modela, procijenjeni su na veće vrijednosti nego u fazi plovidbe, zbog neadekvatnog izgaranja goriva pri nižim opterećenjima. Nedostatak procjene Entec studije je u tome da opterećenja do 20% predstavljaju fazu manevriranja, a sve iznad podrazumijeva se da je faza plovidbe, te se pogreška CO₂ procjene za manevriranje pretpostavlja na $\pm 30\%$.

Kod US/EPA studije nedostatak je u tome što se pretpostavlja da je emisijski faktor (670 g/kWh) jednak za obje aktivnosti broda, s čime se ne uzima u obzir trenutno opterećenje motora. Nadalje, prilikom izračuna emisijskih faktora odabir opterećenja motora rezultirat će i promjenom snage motora što u konačnici utječe na vrijednost emisijskog faktora. Procijenjeni emisijski faktor za fazu manevriranja iznosi 926,2 g/kWh, te su prikazani emisijski faktori za opterećenja faze manevriranja od 20 do 40% , što može višestruko unaprijediti procjenu emisija.

Prikazani rezultati istraživanja ukazuju na korelaciju između emisijskih faktora i promjenjivih eksploatacijskih uvjeta plovidbe. Predloženi model obuhvaća procjenu CO₂ i NO_x emisijskih faktora u fazama plovidbe i manevriranja, a da pri tome uzima u obzir različita opterećenja motora. Slijedom toga, može se zaključiti da model omogućava vjerodostojnije emisijske faktore od trenutno dostupnih s čime je dokazana druga pomoćna hipoteza rada.

Ukoliko bi se primijenili procijenjeni emisijski faktori za izradu inventara emisija, unaprijedila bi se procjena ukupne količine CO₂ i NO_x emisija, a samim time i postojeće baze podataka. Ova tvrdnja proizlazi iz razloga jer model omogućava fleksibilnost odabira željenog emisijskog faktora čija primjena omogućuje vjerodostojniju procjenu emisija za određeno brodsko postrojenje ili odabrano područje plovidbe, a s time i potvrdu treće pomoćne hipoteze.

Razvijen je numerički model za procjenu emisijskih faktora koji uzima u obzir promjenjive uvjete eksploatacije broda, što uključuje promjenu u opterećenju rada motora, promjenama u temperaturama ispušnih plinova i udjelima kisika u plinovima. Primjenom modela moguće je izračunati vjerodostojnije emisijske faktore uz pomoć kojih će se unaprijediti procjena ukupnih emisija štetnih plinova. S obzirom na sve dokazane pomoćne hipoteze i prikazane rezultate istraživanja, može se zaključiti da je temeljna hipoteza rada također potvrđena.

6.3. Preporuke za daljnja istraživanja

Na temelju provedenog istraživanja i dobivenih rezultata predložene su preporuke za unaprjeđenje istraživanja na temu emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja. Dio preporuka ukazuje na ograničenja ovog istraživanja te smjernice za daljnja istraživanja:

- provesti dodatna mjerenja emisija ispušnih plinova s ciljem unaprjeđenja baze podataka, posebice za opterećenja motora u fazi manevriranja gdje je uočen manjak istraživanja što dovodi do nepouzdanih emisijskih faktora
- istraživanje za doktorski rad je provedeno na tri Ro-Pax broda s motorima ugrađenim prije 2000. godine. Preporuka je da se primijeni ista metodologija ovog istraživanja na novije brodove s ciljem unaprjeđenja baze podataka za tu vrstu pogona
- mjerenja, modeliranje i rezultati doktorskog rada su usmjereni isključivo za glavne pogonske motore. Ako bi se provelo istraživanje za pomoćne motore i dobili odgovarajući emisijski faktori, dodatno bi se unaprijedila procjena ukupnih emisija ispušnih plinova
- provesti istraživanje i mjerenje emisija na različitim brodskih gorivima, posebice na motorima pogonjenim na dvojna goriva
- nedovoljno su provedena istraživanja vezana za emisije iz brodskih generatora pare, odnosno na brodskim postrojenjima s parnom turbinom ili plinskom turbinom. Istraživanje bi unaprijedilo procjenu emisija iz spomenutih postrojenja
- u radu je fokus na CO₂ i NO_x emisijske faktore za vrijeme plovidbe i manevriranja. Potrebno je provesti mjerenja za ostale onečišćujuće čestice poput SO_x, PM, VOC, s ciljem unaprjeđenja procjene svih nastalih emisija prilikom izgaranja brodskog goriva
- istražiti koliko tehnologije za smanjenje SO_x i NO_x tvari utječu na njihovu koncentraciju u ispušnim plinovima. Dobivene rezultate mjerenja usporediti s emisijama kod brodova bez ugrađenih tehnologija za smanjenje koncentracije, te na temelju usporedbe predložiti isplativost ugradnje ili nove emisijske faktore
- provesti mjerenja emisija na brodovima pogonjenim na alternativna brodska goriva. Istražiti emisije stakleničkih plinova (CO₂ i CH₄) na LNG brodovima, emisije različitih bio-goriva sa smanjenim udjelom ugljika ili emisije pri upotrebi metanola
- izraditi inventar emisija pomorskog prometa za određeno područje s predloženim novim emisijskim faktorima, te usporediti odstupanja prilikom izračuna inventara s trenutnim emisijskim faktorima iz različitih studija.

7. ZAKLJUČAK

Procjene emisija ispušnih plinova iz brodskih postrojenja predstavljaju vrlo zahtjevan proces zbog mnogih nepredvidivih karakteristika eksploatacijskih uvjeta plovidbe i različitih vrsta brodskih postrojenja. Istraživanja na ovu temu uglavnom se zasnivaju na prikupljanju statističkih podataka iz raznih relevantnih studija procjena emisija iz pomorskog prometa, gdje često dolazi do odstupanja prilikom izračuna emisija zbog oslanjanja na statističke pretpostavke. U metodologijama izrade inventara emisija uočeni su nedostaci prilikom procjena, ovisno je li riječ o procjeni emisija za određeno područje plovidbe (nacionalna/globalna razina) ili u slučaju procjene za jedno ili više brodskih postrojenja. Mnoge varijable utječu prilikom izračuna emisija poput duljine i vremena plovidbe, snage glavnih i pomoćnih motora, godine ugradnje motora, trenutnog opterećenja motora, vrste korištenog goriva i određenog emisijskog faktora.

Emisijski faktori onečišćujućih tvari predstavljaju ključnu varijablu kod izračuna emisija, neovisno o izboru metodologije procjene. Često se uzimaju kao referentne vrijednosti iz studija inventara u kojima nisu uzeti u obzir eksploatacijski uvjeti, te nisu ažurirane vrijednosti emisijskih faktora sukladno novim ekološki prihvatljivim brodskim gorivima i ekonomičnijim načinom plovidbe. Problematika ovog znanstvenog istraživanja odnosi se na utjecaj promjenjivih parametara motora pri različitim režimima plovidbe na vrijednosti emisijskih faktora.

Uvjeti izgaranja goriva i kvaliteta procesa izgaranja utječu na sastav produkta izgaranja, što u konačnici definira nastale emisije iz brodskih motora. U ovome radu provedeno je mjerenje koncentracije onečišćujućih tvari nastalih u ispušnim plinovima kako bi se istražio utjecaj promjene ispušnih emisija s obzirom na promjene prilikom eksploatacije broda, odnosno da bi se potvrdile ili opovrgnule postavljene hipoteze rada. Rezultati eksperimentalnih mjerenja na svim odrađenim brodovima ukazali su da promjene opterećenja motora, utječu na promjene u temperaturama ispušnih plinova i udjelu kisika, što u konačnici dovodi do promjena u koncentracijama CO₂, NO_x i CO plinova. Mjerenja su izvršena u fazi manevriranja pri opterećenju rada motora u rasponu od 20 do 40 % i u fazi plovidbe od 55 do 90%, te se može zaključiti da je prikupljen reprezentativan uzorak podataka. Podaci sa svih brodova obrađeni su Gaussovom nelinearnom regresijom i objedinjeni u jedan model s ciljem procjene emisijskih faktora za različite režime plovidbe.

Prva pomoćna hipoteza : „Promjenjivi uvjeti eksploatacije broda utječu na koncentraciju onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima što rezultira i u promjenama emisijskih faktora“, potvrđena je rezultatima mjerenja gdje su promjenjivi uvjeti eksploatacije broda utjecali na promjene sastava ispušnih plinova, odnosno promjene opterećenja rada motora rezultirale su različitim koncentracijama onečišćujućih tvari. Posljedično, promjene sastava ispušnih plinova utjecat će na vrijednosti emisijskih faktora, te se može zaključiti da emisijski faktori nemaju konstantnu vrijednost.

Druga pomoćna hipoteza : „Primjenom predloženog modela dobit će se vjerodostojniji podaci o vrijednostima emisijskih faktora od onih dostupnih u trenutnim bazama podataka“, potvrđena je CO₂ i NO_x modelima izrađenim na temelju izmjerenih podataka u fazama manevriranja i plovidbe. U poglavlju 6.2. uspoređeni su procijenjeni emisijski faktori dobiveni modeliranjem s emisijskim faktorima iz najrelevantnijih studija inventara emisija iz pomorskog prometa, gdje su istaknuti nedostaci pojedinih studija i prednosti predloženih modela. Procijenjeni emisijski faktori smatraju se vjerodostojnijima jer su zasnovani na promjenjivim uvjetima plovidbe i omogućavaju izbor vrijednosti ovisno o trenutnom opterećenju motora.

Treća pomoćna hipoteza: „Primjenom predloženog modela moguće je izraditi vjerodostojniji registar emisija ispušnih plinova za određeno brodsko postrojenje ili područje plovidbe“, potvrđena je usporedbom procijenjenih i trenutno dostupnih emisijskih faktora, gdje su uočeni nedostaci u vrijednostima emisijskih faktora iz pojedinih studija. Nepouzdanost emisijskih faktora proizlazi prvenstveno zbog upitnih pretpostavki koje utječu na konačne vrijednosti. Predloženi modeli smanjuju nepouzdanost prilikom procjena emisija, jer omogućavaju prilagodljive emisijske faktore ovisne o trenutnoj fazi plovidbe i radu motora. Ukoliko bi se za izračun ukupnih emisija koristili emisijski faktori iz dobivenih CO₂ i NO_x modela, rezultati izračuna predstavljali bi reprezentativnije procjene emisija za određeno područje plovidbe ili brodsko postrojenje.

Rezultati modeliranja ukazuju da vrijednosti CO₂ i NO_x emisijskih faktora ovise o promjenama parametara (opterećenje, temperatura ispušnih plinova, udio kisika) rada motora i predstavljaju vjerodostojnije vrijednosti nego u trenutno dostupnim bazama podataka. Nadalje, može se zaključiti da primjena procijenjenih emisijskih faktora omogućava izradu reprezentativnijeg inventara ispušnih emisija iz brodskih postrojenja. Sve potvrđene pomoćne hipoteze rada i sve navedene prednosti modela i procijenjenih emisijskih faktora, ukazuju na unaprjeđenje metode procjene emisija što potvrđuje i temeljnu hipotezu : „Moguće je unaprijediti metodu procjene emisije štetnih plinova razvojem numeričkog modela za izračun emisijskih faktora koji uzima u obzir promjenjive uvjete eksploatacije broda“.

Slijedom prikazanih rezultata istraživanja i potvrđenih hipoteza rada, izvorni znanstveni doprinos doktorskog rada:

- razvijen model procjene emisijskih faktora na temelju parametara postrojenja u stvarnim uvjetima plovidbe. Na temelju modela unaprjeđenja je procjena CO₂ i NO_x emisijskih faktora u fazama plovidbe i manevriranja za srednjeokretne četverotaktne brodske motore. Predloženi emisijski faktori predstavljaju pouzdanije vrijednosti jer omogućavaju izbor emisijskog faktora ovisno o promjenjivim parametrima postrojenja, odnosno opterećenju rada glavnih motora
- unaprjeđenje postojećih baza podataka emisijskih faktora i smanjenje pogreške pri izradi inventara brodskih emisija. Primjenom modela i odgovarajućih emisijskih faktora moguće je izračunati ukupne CO₂ i NO_x emisija i na taj način unaprijediti procjenu ukupnih emisija za određeno brodsko postrojenje ili područje plovidbe.

Sam proces mjerenja emisija trebao bi pratiti tehnološki napredak i omogućiti jednostavnije, brže i transparentne rezultate mjerenja. Također i sve buduće izrade inventara emisija trebale bi uzimati u obzir nova tehnološki učinkovita brodska postrojenja i primjenu ekološki prihvatljivijih goriva. Osim unaprjeđenja procjene emisijskih faktora, moguće je unaprijediti izradu inventara brodskih emisija s primjenom adekvatnih emisijskih faktora, što u konačnici može dovesti do uvođenja novih zakonskih regulativa s ciljem zaštite morskog okoliša, prvenstveno na regionalnoj ili nacionalnoj razini.

LITERATURA

- [1] “ENTEC UK Limited: UK Ship Emission Inventory, Final Report,” Defra, 2010.
- [2] “MEPC-75-7-15-Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Final-report-Secretariat,” IMO, 2020.
- [3] C. Trozzi, “EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook- 2016,” European Environment Agency, 2016.
- [4] L. Browning, “Current Methodologies and Best Practices for Preparing Port Emission Inventories,” *US EPA*, p. 20, 2009.
- [5] F. Alver, B. A. Saraç, and Ü. Alver Şahin, “Estimating of shipping emissions in the Samsun Port from 2010 to 2015,” *Atmospheric Pollution Research*, vol. 9, no. 5, pp. 822–828, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apr.2018.02.003.
- [6] M. Tichavska and B. Tovar, “Port-city exhaust emission model: An application to cruise and ferry operations in Las Palmas Port,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 78, pp. 347–360, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.05.021.
- [7] H. Lee, D. Park, S. Choo, and H. T. Pham, “Estimation of the Non-Greenhouse Gas Emissions Inventory from Ships in the Port of Incheon,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8231, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12198231.
- [8] A. Agrawal, G. Aldrete, and B. Anderson, “Port of Los Angeles, Inventory of air emissions 2019-2021,” Starcrest Consulting Group, LCC, Technical Report 191122–551, Sep. 2021.
- [9] S. Song, “Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port,” *Atmospheric Environment*, vol. 82, pp. 288–297, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.006.
- [10] X. Peng, Y. Wen, L. Wu, C. Xiao, C. Zhou, and D. Han, “A sampling method for calculating regional ship emission inventories,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 89, p. 102617, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102617.
- [11] D. Chen *et al.*, “Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China,” *Atmospheric Environment*, vol. 145, pp. 10–18, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.086.
- [12] P. S. Yau, S. C. Lee, J. J. Corbett, C. Wang, Y. Cheng, and K. F. Ho, “Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong,” *Science of The Total Environment*, vol. 431, pp. 299–306, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.092.
- [13] D. Woo and N. Im, “Spatial Analysis of the Ship Gas Emission Inventory in the Port of Busan Using Bottom-Up Approach Based on AIS Data,” *JMSE*, vol. 9, no. 12, p. 1457, Dec. 2021, doi: 10.3390/jmse9121457.
- [14] A. Tokuslu, “Estimation of shipping emissions in the Iskenderun Gulf, Turkey,” *IJGW*, vol. 23, no. 4, p. 397, 2021, doi: 10.1504/IJGW.2021.114345.
- [15] C. Deniz and Y. Durmuşoğlu, “Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey,” *Science of The Total Environment*, vol. 390, no. 1, pp. 255–261, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.033.
- [16] X. Martinez, “Emission Models: A Comparison to Determine the Impact of Maritime Transport on Emissions in SW European Short Sea Shipping,” p. 13.
- [17] Hugo Denier van der Gon, “Methodologies_for_estimating_shipping_emissions_in.pdf,” Netherlands Environmental Assessment Agency, 2010.

- [18] E. Tzannatos, “Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece,” *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 3, pp. 400–407, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.024.
- [19] J. Moreno-Gutiérrez, E. Pájaro-Velázquez, Y. Amado-Sánchez, R. Rodríguez-Moreno, F. Calderay-Cayetano, and V. Durán-Grados, “Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship’s emissions and energy consumption based on operational data,” *Science of The Total Environment*, vol. 650, pp. 575–584, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.045.
- [20] J. Moreno-Gutiérrez and V. Durán-Grados, “Calculating ships’ real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties,” *Science of The Total Environment*, vol. 750, p. 141471, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141471.
- [21] J. Moreno-Gutiérrez, V. Durán-Grados, Z. Uriondo, and J. Ángel Llamas, “Emission-factor uncertainties in maritime transport in the Strait of Gibraltar, Spain,” *Gases/In Situ Measurement/Data Processing and Information Retrieval*, preprint, Aug. 2012. doi: 10.5194/amtd-5-5953-2012.
- [22] D. Toscano, “Atmospheric ship emissions in ports: A review. Correlation with data of ship traffic,” *Atmospheric Environment*, p. 15, 2019.
- [23] L. Tang *et al.*, “The impact of ship emissions on air quality and human health in the Gothenburg area – Part 1: 2012 emissions,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 12, pp. 7509–7530, Jun. 2020, doi: 10.5194/acp-20-7509-2020.
- [24] S. Barberi, M. Sambito, L. Neduzha, and A. Severino, “Pollutant Emissions in Ports: A Comprehensive Review,” *Infrastructures*, vol. 6, no. 8, p. 114, Aug. 2021, doi: 10.3390/infrastructures6080114.
- [25] S. L. Kuzu, L. Bilgili, and A. Kiliç, “Estimation and dispersion analysis of shipping emissions in Bandırma Port, Turkey,” *Environ Dev Sustain*, vol. 23, no. 7, pp. 10288–10308, Jul. 2021, doi: 10.1007/s10668-020-01057-6.
- [26] V. Knežević, R. Radonja, and Č. Dundović, “Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Zadar,” *Pomorstvo (Online)*, vol. 32, no. 2, pp. 239–244, Dec. 2018, doi: 10.31217/p.32.2.9.
- [27] D. Pastorčić, R. Radonja, V. Knežević, and V. Pelić, “Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Šibenik,” *Pomorstvo (Online)*, vol. 34, no. 1, pp. 86–92, Jun. 2020, doi: 10.31217/p.34.1.10.
- [28] V. Knezevic, Z. Pavin, and J. Čulin, “Estimating Shipping Emissions – A Case Study for Cargo Port of Zadar, Croatia,” *TransNav*, vol. 15, no. 3, pp. 615–620, 2021, doi: 10.12716/1001.15.03.16.
- [29] R. Radonja, R. Ivče, A. Zekić, and L. Catela, “Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Rijeka,” *Pomorstvo (Online)*, vol. 34, no. 2, pp. 387–395, Dec. 2020, doi: 10.31217/p.34.2.19.
- [30] L. Stazić, R. Radonja, V. Pelić, and B. Lalić, “The Port of Split international marine traffic emissions inventory,” *Pomorstvo (Online)*, vol. 34, no. 1, pp. 32–39, Jun. 2020, doi: 10.31217/p.34.1.4.
- [31] B. Dragović, “Ship emissions and their externalities in cruise ports,” *Transportation Research Part D*, p. 12, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.11.007>.
- [32] V. Garaniya, *Development of a methodology to measure and assess ship emissions*. in Research Project / IAMU 2015 research project, no. 2.2015. Tokyo: IAMU, 2016.
- [33] T. Chu-Van *et al.*, “On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions,” *Environmental Pollution*, vol. 237, pp. 832–841, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.008.

- [34] T. Chu-Van *et al.*, “A comparison of particulate matter and gaseous emission factors from two large cargo vessels during manoeuvring conditions,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1390–1398, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.10.001.
- [35] H. Agrawal, W. A. Welch, S. Henningsen, J. W. Miller, and D. R. Cocker, “Emissions from main propulsion engine on container ship at sea,” *J. Geophys. Res.*, vol. 115, no. D23, p. D23205, Dec. 2010, doi: 10.1029/2009JD013346.
- [36] H. Agrawal, W. A. Welch, J. W. Miller, and D. R. Cocker, “Emission Measurements from a Crude Oil Tanker at Sea,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 19, pp. 7098–7103, Oct. 2008, doi: 10.1021/es703102y.
- [37] M. Y. Khan *et al.*, “Measuring in-use ship emissions with international and U.S. federal methods,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 63, no. 3, pp. 284–291, Mar. 2013, doi: 10.1080/10962247.2012.744370.
- [38] C. Huang *et al.*, “Emission factors of particulate and gaseous compounds from a large cargo vessel operated under real-world conditions,” *Environmental Pollution*, vol. 242, pp. 667–674, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.036.
- [39] F. Zhang *et al.*, “Emission factors for gaseous and particulate pollutants from offshore diesel engine vessels in China,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 10, pp. 6319–6334, May 2016, doi: 10.5194/acp-16-6319-2016.
- [40] M. Fu, “Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China,” *Atmospheric Environment*, p. 8, 2013.
- [41] T. Chu Van *et al.*, “Effect of cold start on engine performance and emissions from diesel engines using IMO-Compliant distillate fuels,” *Environmental Pollution*, vol. 255, p. 113260, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113260.
- [42] H. Winnes and E. Fridell, “Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 59, no. 12, pp. 1391–1398, Dec. 2009, doi: 10.3155/1047-3289.59.12.1391.
- [43] S. Ergin, S. Kalender, and M. Durmaz, “On Board Measurements of Exhaust Emissions From a Ferry Sailing at Marmara Sea,” *GMO-SHIPMAR 2016, Istanbul, Turkey*, p. 8, 2016.
- [44] D. Cooper, “Exhaust emissions from ships at berth,” *Atmospheric Environment*, vol. 37, no. 27, pp. 3817–3830, Sep. 2003, doi: 10.1016/S1352-2310(03)00446-1.
- [45] “Miller J.W., :Criteria Emissions from the Main Propulsion Engine of a Post-Panamax Class Container Vessel Using Distillate and Residual Fuels, Draft Final Report 2009.”
- [46] University of Split *et al.*, “Air Pollutant Emission Measurement,” *ped*, vol. 93, no. 6s, pp. 132–140, Aug. 2021, doi: 10.53656/ped21-6s.11air.
- [47] C. Bai, Y. Li, B. Liu, Z. Zhang, and P. Wu, “Gaseous Emissions from a Seagoing Ship under Different Operating Conditions in the Coastal Region of China,” *Atmosphere*, vol. 11, no. 3, p. 305, Mar. 2020, doi: 10.3390/atmos11030305.
- [48] E. J. Williams, B. M. Lerner, P. C. Murphy, S. C. Herndon, and M. S. Zahniser, “Emissions of NO_x, SO₂, CO, and HCHO from commercial marine shipping during Texas Air Quality Study (TexAQS) 2006,” *J. Geophys. Res.*, vol. 114, no. D21, p. D21306, Nov. 2009, doi: 10.1029/2009JD012094.
- [49] J. Moldanová *et al.*, “Physical and chemical characterisation of PM emissions from two ships operating in European Emission Control Areas,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 6, no. 12, pp. 3577–3596, Dec. 2013, doi: 10.5194/amt-6-3577-2013.
- [50] H. Jiang, D. Peng, Y. Wang, and M. Fu, “Comparison of Inland Ship Emission Results from a Real-World Test and an AIS-Based Model,” *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, p. 1611, Dec. 2021, doi: 10.3390/atmos12121611.
- [51] J. Beecken, J. Mellqvist, K. Salo, J. Ekholm, and J.-P. Jalkanen, “Airborne emission measurements of SO₂, NO_x and

- particles from individual ships using a sniffer technique,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, no. 7, pp. 1957–1968, Jul. 2014, doi: 10.5194/amt-7-1957-2014.
- [52] C. D. Cappa *et al.*, “A case study into the measurement of ship emissions from plume intercepts of the NOAA ship Miller Freeman,” *Atmos. Chem. Phys.*, p. 16, 2014.
- [53] L. Pirjola *et al.*, “Mobile measurements of ship emissions in two harbour areas in Finland,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, no. 1, pp. 149–161, Jan. 2014, doi: 10.5194/amt-7-149-2014.
- [54] J. Ding, R. J. van der A, B. Mijling, J.-P. Jalkanen, L. Johansson, and P. F. Levelt, “Maritime NO_x Emissions Over Chinese Seas Derived From Satellite Observations,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 4, pp. 2031–2037, Feb. 2018, doi: 10.1002/2017GL076788.
- [55] A. J. Prata, “Measuring SO_x ship emissions with an ultra-violet imaging camera,” *Gases/Remote Sensing/Instruments and Platforms*, preprint, Nov. 2013. doi: 10.5194/amtd-6-9467-2013.
- [56] F. Zhou, Y. Fan, J. Zou, and B. An, “Ship emission monitoring sensor web for research and application,” *Ocean Engineering*, vol. 249, p. 110980, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110980.
- [57] S. Jahangiri, N. Nikolova, and K. Tenekedjiev, “An improved emission inventory method for estimating engine exhaust emissions from ships,” *Sustainable Environment Research*, vol. 28, no. 6, pp. 374–381, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.serj.2018.08.005.
- [58] S. Jahangiri *et al.*, “Development of Emission Factors for Ships’ Emissions at Berth,” p. 7, 2017.
- [59] S. Jahangiri, N. Nikolova, and K. Tenekedjiev, “Empirical testing of inventories applying on-board measurements of exhaust emissions at port and at sea,” *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, vol. 3, no. 2, pp. 6–33, Nov. 2018, doi: 10.14254/jsdtl.2018.3-2.1.
- [60] T. Fletcher *et al.*, “An Application of Machine Learning to Shipping Emission Inventory,” *International Journal of Maritime Engineering*, vol. Vol 160, no. A4, Dec. 2018, doi: 10.3940/rina.ijme.2018.a4.500.
- [61] N. Ma, W. Y. Shum, T. Han, and F. Lai, “Can Machine Learning be Applied to Carbon Emissions Analysis: An Application to the CO₂ Emissions Analysis Using Gaussian Process Regression,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 756311, Sep. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.756311.
- [62] S. Asante-Okyere, C. Shen, Y. Yevenyo Ziggah, M. Moses Rulegeya, and X. Zhu, “Investigating the Predictive Performance of Gaussian Process Regression in Evaluating Reservoir Porosity and Permeability,” *Energies*, vol. 11, no. 12, p. 3261, Nov. 2018, doi: 10.3390/en1123261.
- [63] Y. Sekmen, M. Gölcü, P. Erduranlı, and Y. Pancar, “Prediction of Performance and Smoke Emission Using Artificial Neural Network in a Diesel Engine,” *MCA*, vol. 11, no. 3, pp. 205–214, Dec. 2006, doi: 10.3390/mca11020205.
- [64] Universiti Malaysia Terengganu, E. Azamin, M. Noor, and Universiti Malaysia Terengganu, “Development of marine engine performance prediction model through neural network approach,” *UMT JUR*, vol. 3, no. 3, pp. 107–118, Jul. 2021, doi: 10.46754/umtjur.2021.07.012.
- [65] Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia *et al.*, “Prediction of marine diesel engine performance by using artificial neural network model,” *J. Mech, Eng, Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 1917–1930, Jun. 2016, doi: 10.15282/jmes.10.1.2016.15.0183.
- [66] P. Shanmugam, V. Sivakumar, A. Murugesan, and M. Ilangkumaran, “Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using Hybrid Fuel with an Artificial Neural

- Network,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 33, no. 15, pp. 1440–1450, May 2011, doi: 10.1080/15567036.2010.539085.
- [67] A. Bogdanowicz and T. Kniaziewicz, “Marine Diesel Engine Exhaust Emissions Measured in Ship’s Dynamic Operating Conditions,” *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6589, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226589.
- [68] “https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2022/02/scce2022_atelier-transport-maritime_cr_eng_vf-1.pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2022/02/scce2022_atelier-transport-maritime_cr_eng_vf-1.pdf
- [69] “International shipping: CO2 emissions by ship type,” Statista. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/216048/worldwide-co2-emissions-by-ship-type/>
- [70] “Brief History of IMO.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>
- [71] “DNV_Maritime_Forecast to 2050 ; Energy Transition Outlook, Report 2021.”
- [72] “MEPC.304(72).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)
- [73] G. Mallouppas and E. Ar. Yfantis, “Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals,” *JMSE*, vol. 9, no. 4, p. 415, Apr. 2021, doi: 10.3390/jmse9040415.
- [74] S. Lagouvardou, H. N. Psaraftis, and T. Zis, “A Literature Survey on Market-Based Measures for the Decarbonization of Shipping,” *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 3953, May 2020, doi: 10.3390/su12103953.
- [75] H. N. Psaraftis and S. Lagouvardou, “Market Based Measures for the Reduction of Green House Gas Emissions from Ships: A Possible Way Forward,” *samfundsokonomien*, vol. 2019, no. 4, pp. 60–70, Sep. 2023, doi: 10.7146/samfundsokonomien.v2019i4.140635.
- [76] “MEPC.334(76).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334(76).pdf)
- [77] “MEPC.351(78).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.351\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.351(78).pdf)
- [78] D. Rutherford, “Potential CO₂ reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index”.
- [79] “MEPC.352(78).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.352\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.352(78).pdf)
- [80] “CII - Carbon Intensity Indicator.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/>
- [81] H. N. Psaraftis, “Shipping decarbonization in the aftermath of MEPC 76,” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 1, p. 100008, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.clscn.2021.100008.
- [82] T.-H. Joung, S.-G. Kang, J.-K. Lee, and J. Ahn, “The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050,” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 4, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2020, doi: 10.1080/25725084.2019.1707938.
- [83] “UREDBA (EU) 2015/ 757 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA - od 29. travnja 2015. - o praćenju emisija ugljikova dioksida iz pomorskog prometa, izvješćivanju o njima i njihovoj verifikaciji te o izmjeni Direktive 2009/ 16/ EZ”.

- [84] “THETIS-MRV.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/eumrv>
- [85] “Direktiva 2003/87/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 13. listopada 2003. o uspostavi sustava trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova unutar Zajednice i o izmjeni Direktive Vijeća 96/61/EZ Tekst značajan za EGP”.
- [86] “EU ETS – Emissions Trading System.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eu-emissions-trading-system/>
- [87] I. Grgić and Hrnčević, Lidija, “Europski sustav trgovine emisijskim dozvolama // Naftaplin, 40 (2020), 163-164; 70-83”.
- [88] S. Solomon, Intergovernmental Panel on Climate Change, and Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds., *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- [89] “Pariški sporazum o klimatskim promjenama.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [90] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009325844.
- [91] “Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels | National Oceanic and Atmospheric Administration.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>
- [92] U. N. Environment, “Emissions Gap Report 2022,” UNEP - UN Environment Programme. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <http://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>
- [93] P. Manshausen, D. Watson-Parris, M. W. Christensen, J.-P. Jalkanen, and P. Stier, “Invisible ship tracks show large cloud sensitivity to aerosol,” *Nature*, vol. 610, no. 7930, pp. 101–106, Oct. 2022, doi: 10.1038/s41586-022-05122-0.
- [94] “What happens when fuel oils containing sulphur are burnt in a diesel engine without an exhaust gas cleaning system? – EGCSA.com.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.egcsa.com/technical-reference/what-happens-when-fuel-oils-containing-sulphur-are-burnt-in-a-diesel-engine-without-an-exhaust-gas-cleaning-system/>
- [95] P. Friedlingstein *et al.*, “Global Carbon Budget 2021,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, no. 4, pp. 1917–2005, Apr. 2022, doi: 10.5194/essd-14-1917-2022.
- [96] N. Gray, S. McDonagh, R. O’Shea, B. Smyth, and J. D. Murphy, “Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors,” *Advances in Applied Energy*, vol. 1, p. 100008, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100008.
- [97] “Shipping’s ‘big three’ account for almost 80% of CO2 emissions,” Lloyd’s List. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://lloydslist.com/LL1136035/Shipplings-big-three-account-for-almost-80-of-CO2-emissions>
- [98] “Vincent Martijn van Essen: Fundamental limits of NO formation in fuel-rich premixed methane-air flames, University of Groningen 2007.”
- [99] “T.Senčić : Analiza mogućnosti smanjenja emisija čađe i NOx na suvremenim sporohodnim dizelskim dvotaktnim motorima, doktorska disertacija, Rijeka 2010.”

- [100] “MEPC.177(58).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.177\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.177(58).pdf)
- [101] “Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [102] J. Deng, X. Wang, Z. Wei, L. Wang, C. Wang, and Z. Chen, “A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels,” *Science of The Total Environment*, vol. 766, p. 144319, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144319.
- [103] “MEPC.198(62).pdf.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.198\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.198(62).pdf)
- [104] “Inside the industry: Shipping is going green,” Contship. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.contshipitalia.com/en/news-blog/inside-industry-shipping-going-green>
- [105] “DIREKTIVA (EU) 2016/ 802 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA - od 11. svibnja 2016. - o smanjenju sadržaja sumpora u određenim tekućim gorivima”.
- [106] “IMO Adopts Mediterranean SECA with 0.10% Sulfur Emission Limit,” Ship & Bunker. Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://shipandbunker.com/news/emea/788503-imo-adopts-mediterranean-seca-with-010-sulfur-emission-limit>
- [107] “Metin Ugur: Requirements for fuel oil sulphur content in Turkey,.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.ulgener.com/dosya/The_Bosphorus_Online_Vol27.pdf
- [108] “South Korea - Major ports designated as ECAs and as Low Speed Areas.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ukpandi.com/news-and-resources/articles-post-migration/south-korea-major-ports-designated-as-ecas-and-as-low-speed-areas/>
- [109] “Ocean-Going Vessel Fuel Regulation | California Air Resources Board.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/ocean-going-vessel-fuel-regulation>
- [110] F. Di Natale and C. Carotenuto, “Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40, pp. 166–191, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.08.011.
- [111] “Uredba o graničnim vrijednostima sadržaja hlapivih organskih spojeva u određenim bojama i lakovima koji se koriste u graditeljstvu i proizvodima za završnu obradu vozila.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_06_69_1366.html
- [112] L. Malherbe and C. Mandin, “VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment,” *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 30, pp. 6322–6330, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.02.018.
- [113] “MEPC.185(59).pdf.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.185\(59\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPDocuments/MEPC.185(59).pdf)
- [114] “Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_02_21_798.html
- [115] G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J. M. Baldasano Recio, J. D. W. Kahl, and R. E. Antonio Durán, “Review of Top-Down Method to Determine Atmospheric Emissions

- in Port. Case of Study: Port of Veracruz, Mexico,” *JMSE*, vol. 10, no. 1, p. 96, Jan. 2022, doi: 10.3390/jmse10010096.
- [116] “MEPC.245(66).pdf.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MPCDocuments/MEPC.245\(66\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MPCDocuments/MEPC.245(66).pdf)
- [117] “Uredba Komisije (EU) br. 601/2012 od 21. lipnja 2012. o praćenju i izvješćivanju o emisijama stakleničkih plinova u skladu s Direktivom 2003/87/EZ Europskog parlamenta i Vijeća Tekst značajan za EGP”.
- [118] Z. Franić, “Praćenje, izvještavanje i provjera emisija co2 u pomorskom prometu,” *Sigurnost (Online)*, vol. 63, no. 2, pp. 198–201, Jul. 2021, doi: 10.31306/s.63.2.6.
- [119] F. Bojić, A. Gudelj, and R. Bošnjak, “Port-Related Shipping Gas Emissions—A Systematic Review of Research,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 3603, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12073603.
- [120] N. Acomi and O. C. Acomi, “The Influence of Different Types of Marine Fuel over the Energy Efficiency Operational Index,” *Energy Procedia*, vol. 59, pp. 243–248, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.373.
- [121] A. Grigoriadis, S. Mamarikas, E. Majamäki, J.-P. Jalkanen, and E. Fridell, “SCIPPER Project D4.1 New set of emission factors and activity information Public (PU)”.
- [122] “International Council on Clean Transportation: Black Carbon Measurement Methods and Emission Factors from Ships_Consultant-Report 2016.”
- [123] US EPA, “Port and Goods Movement Emission Inventories.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ports-initiative/port-and-goods-movement-emission-inventories>
- [124] “ISO 8178-2:2021,” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/75546.html>
- [125] “Testo 350 Maritime V2 - Flue gas analyzer, Instruction manual.”
- [126] “MEPC.103(49).pdf.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MPCDocuments/MEPC.103\(49\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MPCDocuments/MEPC.103(49).pdf)
- [127] “GUTTA-VISIR.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.gutta-visir.eu/>
- [128] G. Mannarini, L. Carelli, J. Orović, C. Martinkus, and G. Coppini, “Towards Least-CO2 Ferry Routes in the Adriatic Sea,” *JMSE*, vol. 9, no. 2, p. 115, Jan. 2021, doi: 10.3390/jmse9020115.
- [129] C. Cot, D. Aksentijević, A. Jugović, G. Cacciapaglia, and G. Mannarini, “Maritime transportation and people mobility in the early diffusion of COVID-19 in Croatia,” *Front. Public Health*, vol. 11, p. 1183047, Aug. 2023, doi: 10.3389/fpubh.2023.1183047.
- [130] “Marko Polo.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.amatori.com/en/ferries/info/jadrolinija_fleet_en/marko-polo
- [131] “ZADAR, Passenger/Ro-Ro Cargo Ship - Details and current position - IMO 9021485 - VesselFinder.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.vesselfinder.com/vessels/details/9021485>
- [132] “PLAVA MAGISTRALA ‘Vratimo brodsku liniju Rijeka-Dubrovnik!’ |,” Morski HR. Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.morski.hr/plava-magistrala-vratimo-brodsku-liniju-rijeka-dubrovnik/>
- [133] J. Orović, M. Valčić, V. Knežević, and Z. Pavin, “Comparison of the on Board Measured and Simulated Exhaust Gas Emissions on the Ro-Pax Vessels,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 5, p. 794, May 2022, doi: 10.3390/atmos13050794.
- [134] J. Wang, “An Intuitive Tutorial to Gaussian Process Regression,” *Comput. Sci. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 4–11, Jul. 2023, doi: 10.1109/MCSE.2023.3342149.

- [135] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, *Gaussian processes for machine learning*. in Adaptive computation and machine learning. Cambridge, Mass: MIT Press, 2006.
- [136] “Gaussian processes (3/3) - exploring kernels.” Accessed: Mar. 12, 2024. [Online]. Available: <https://peterroelants.github.io/posts/gaussian-process-kernels/>
- [137] S. Asante-Okyere, C. Shen, Y. Yevenyo Ziggah, M. Moses Rulegeya, and X. Zhu, “Investigating the Predictive Performance of Gaussian Process Regression in Evaluating Reservoir Porosity and Permeability,” *Energies*, vol. 11, no. 12, p. 3261, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11123261.
- [138] M. Zhang, N. Tsoulakos, P. Kujala, and S. Hirdaris, “A deep learning method for the prediction of ship fuel consumption in real operational conditions,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 130, p. 107425, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2023.107425.
- [139] G. P. Towler and R. K. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.
- [140] “Çengel, Y.A.; Boles, M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th ed.; Tata McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2006.” Accessed: Mar. 13, 2024. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5464110/mod_book/chapter/23393/Thermodynamics%20an%20Engineering%20Approach.pdf
- [141] T. S, “How much Air is Required for Complete Combustion? | Thermodynamics,” Engineering Notes India. Accessed: Mar. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.engineeringenotes.com/thermal-engineering/fuels-and-combustion/how-much-air-is-required-for-complete-combustion-thermodynamics/51415>

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Procjene emisija stakleničkih plinova između dva različita scenarija [71] | 16 |
| Slika 2. IMO plan za unaprjeđenje učinkovitosti broda od 2011. do 2050. godine [73] | 18 |
| Slika 3. Zahtijevani CII i razine ugljikovog intenziteta [80]..... | 21 |
| Slika 4. Razvojni plan EU ETS Sustava [86]..... | 24 |
| Slika 5. Promjene srednje globalne temperature od 1850. do 2020. godine [90] | 26 |
| Slika 6. Pregled sastava ispušnih emisija kod dvotaktnog dizel motora [94] | 27 |
| Slika 7. Prosječne CO ₂ emisije pomorskog prometa po vrsti broda [96]..... | 29 |
| Slika 8. IMO kronološko uvođenje propisa za sadržaj sumpora u gorivu [104]..... | 35 |
| Slika 9. Metodologija 'bottom-up' procjene emisija..... | 44 |
| Slika 10. Odnos instalirane snage glavnih motora (ME) i bruto tonaže (GT) u slučaju RO-RO brodova [1]..... | 47 |
| Slika 11. Testo 350 Maritime V2 uređaj za analizu ispušnih plinova [125]..... | 68 |
| Slika 12. Sučelje za odabir vrste pogona i korištenog goriva [125]..... | 70 |
| Slika 13. Kontrolna jedinica uređaja | 71 |
| Slika 14. Jedinica za analizu ispušnih plinova | 71 |
| Slika 15. Instalacija sonde prilikom mjerenja [125] | 72 |
| Slika 16. Mjerna sonda uređaja Testo 350 Maritime [125]..... | 72 |
| Slika 17. Testo 610 - uređaj za mjerenje vlage i temperature | 73 |
| Slika 18. Mogućnosti prijenosa izmjerenih podataka [125]..... | 73 |
| Slika 19. M/T Marko Polo [130]..... | 75 |
| Slika 20. M/T Zadar [131]..... | 75 |
| Slika 21. M/T Dubrovnik [132]..... | 75 |
| Slika 22. Shema postrojenja Ro-Pax brodova [133] | 77 |
| Slika 23. Primjer odnosa uspona vijka, telegrafске ručke i brzine motora [133] | 78 |
| Slika 24. Dijagram opterećenja motora i radno područje s CPP vijkom [133]..... | 79 |
| Slika 25. M/T Marko Polo na ruti Split – Ancona | 81 |
| Slika 26. M/T Marko Polo na ruti Split -Ancona -Split -Dubrovnik-Bari | 81 |
| Slika 27. Manevriranje broda u luci Split | 82 |
| Slika 28. Manevriranje broda u luci Ancona..... | 82 |
| Slika 29. M/T Zadar na ruti Zadar - Ancona..... | 83 |
| Slika 30. Manevriranje broda u trajektnoj luci Zadar (Gaženica)..... | 83 |
| Slika 31. Manevriranje broda pri izlasku iz trajektne luke Zadar (Gaženica)..... | 83 |
| Slika 32. M/T Dubrovnik na ruti Dubrovnik - Bari - Bar | 84 |
| Slika 33. Manevriranje broda u putničkoj luci Gruž (Dubrovnik)..... | 84 |
| Slika 34. Manevriranje broda u luci Bari | 84 |
| Slika 35. Shema postavljanja mjerne opreme i prijenosa podataka | 85 |
| Slika 36. Lokacija mjerenja i priključak sonde | 86 |
| Slika 37. Prikaz mjerenja i priključka sonde..... | 86 |
| Slika 38. Kuglični ventil za priključak sonde | 86 |
| Slika 39. Kuglični ventil za priključak sonde 2 | 86 |
| Slika 40. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Marko Polo..... | 90 |
| Slika 41. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Dubrovnik | 92 |

| | |
|--|-----|
| Slika 42. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme plovidbe na brodu M/T Zadar | 93 |
| Slika 43. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme manevriranja na brodu M/T Marko Polo..... | 95 |
| Slika 44. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka za vrijeme manevriranja na M/T Zadar i M/T Dubrovniku | 96 |
| Slika 45. Grafički prikaz Gaussovog modeliranja [135]..... | 98 |
| Slika 46. Teorijski proces Gaussove regresije [134]..... | 99 |
| Slika 47. Kvadratna eksponencijalna jezgra i utjecaj promjene parametara na oblik funkcije [136] | 101 |
| Slika 48. Primjer periodične jezgre s promjenom parametra periodičnosti [136]..... | 101 |
| Slika 49. Usporedba izmjerenih i procijenjenih CO ₂ vrijednosti u fazi manevriranja | 104 |
| Slika 50. Rezidualne vrijednosti izmjerenih i procijenjenih CO ₂ podataka..... | 104 |
| Slika 51. Procijenjeni i izmjereni CO ₂ podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova ... | 105 |
| Slika 52. Procijenjeni i izmjereni CO ₂ podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika..... | 106 |
| Slika 53. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih CO ₂ vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu manevriranja | 107 |
| Slika 54. Izmjerene i procijenjene NO _x vrijednosti u fazi manevriranja te njihova rezidualna odstupanja..... | 108 |
| Slika 55. Procijenjeni i izmjereni NO _x podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi manevriranja..... | 109 |
| Slika 56. Procijenjeni i izmjereni NO _x podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi manevriranja..... | 110 |
| Slika 57. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih NO _x vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu manevriranja | 110 |
| Slika 58. Usporedba izmjerenih i procijenjenih CO ₂ vrijednosti u fazi plovidbe | 111 |
| Slika 59. Rezidualna odstupanja CO ₂ vrijednosti za fazu plovidbe | 112 |
| Slika 60. Procijenjeni i izmjereni CO ₂ podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi plovidbe..... | 112 |
| Slika 61. Procijenjeni i izmjereni CO ₂ podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi plovidbe | 113 |
| Slika 62. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih CO ₂ vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu plovidbe | 114 |
| Slika 63. Izmjerene i procijenjene NO _x vrijednosti te njihova rezidualna odstupanja u fazi plovidbe..... | 115 |
| Slika 64. Procijenjeni i izmjereni NO _x podaci u ovisnosti o temperaturi ispušnih plinova u fazi plovidbe..... | 116 |
| Slika 65. Procijenjeni i izmjereni NO _x podaci u ovisnosti o koncentraciji kisika u fazi plovidbe..... | 116 |
| Slika 66. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija izmjerenih i procijenjenih NO _x vrijednosti u ovisnosti o postotku MCR-a za fazu plovidbe | 117 |
| Slika 67. Prikaz izvođenja unakrsne validacije [138] | 118 |
| Slika 68. Modeliranje CO ₂ varijable u fazi manevriranja s metodom regresijskog stabla (R=0,75, RMSE=54,046) | 120 |
| Slika 69. Modeliranje NO _x -a u fazi plovidbe s metodom slučajnog regresijskog stabla (R=0,75, RMSE=68,891) | 121 |
| Slika 70. Usporedba NO _x emisijskih faktora (g/kWh) u fazama plovidbe i manevriranja.... | 127 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Procjena odnosa razine poreza i cijene poreza na emisije [75]..... | 19 |
| Tablica 2. MARPOL Prilog VI - Ograničenje NO _x sadržaja u ispušnim plinovima [101]..... | 32 |
| Tablica 3. Emisijski faktori u ovisnosti o vrsti goriva | 41 |
| Tablica 4. Procijenjeno opterećenje (postotak maksimalne trajne snage MCR) za glavne i pomoćne motore u različitim aktivnostima [1] | 47 |
| Tablica 5. Emisijski faktori (g/kWh) za glavni motor u plovidbi [1] | 48 |
| Tablica 6. Emisijski faktori (g/kWh) za glavni motor u manevriranju i u luci [1] | 48 |
| Tablica 7. Emisijski faktori (g/kWh) za pomoćne motor u plovidbi, manevriranju i u luci [1] | 49 |
| Tablica 8. Procijenjeni intervali odstupanja emisijskih faktora [1] | 51 |
| Tablica 9. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste RO gorivo [3]..... | 53 |
| Tablica 10. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste MDO/MGO gorivo [3] | 54 |
| Tablica 11. Razina 1. Emisijski faktori za brodove koji koriste LNG gorivo [3]..... | 54 |
| Tablica 12. Razina 2. Emisijski faktori (kg/tgoriva) i specifična potrošnja goriva (g/kWh) za različite tipove pogona/goriva [3] | 55 |
| Tablica 13. Razina 2. Emisijski faktori (kg/tona) za plinsku i parnu turbinu u ovisnosti o vrsti goriva [3]..... | 55 |
| Tablica 14. NO _x redukcijски faktori (%) za NO _x Razred 0 [3] | 56 |
| Tablica 15. Razina 3. Emisijski faktori (g/kWh) i specifična potrošnja goriva (g/kWh) za različite aktivnosti broda i tipove pogona/goriva [3] | 57 |
| Tablica 16. Razina 3. Emisijski faktori (kg/tona) za različite aktivnosti broda i tipove pogona/goriva [3] | 58 |
| Tablica 17. Emisijski faktori (g/kWh) pri upotrebi HFO i MGO goriva za dizelske motore, parnu i plinsku propulziju [4]..... | 60 |
| Tablica 18. Emisijski faktori (g/kWh) stakleničkih plinova pri upotrebi HFO i MGO goriva za dizelske motore, parnu i plinsku propulziju [4] | 61 |
| Tablica 19. Emisijski faktori za pomoćne dizelske motore pri upotrebi HFO i MGO goriva [4] | 62 |
| Tablica 20. Emisijski faktori stakleničkih plinova za pomoćne dizelske motore pri upotrebi HFO i MGO goriva [4]..... | 62 |
| Tablica 21. Emisijski faktori (g/kWh) za pomoćne generatore pare [4]..... | 63 |
| Tablica 22. Emisijski faktori (g/kWh) stakleničkih plinova za pomoćne brodske generatore pare [4] | 63 |
| Tablica 23. Koeficijenti podešavanja emisijskih faktora za niska opterećenja rada dizelskih motora [4]..... | 64 |
| Tablica 24. Emisijski faktori u ovisnosti o utrošku goriva [2]..... | 65 |
| Tablica 25. Specifične potrošnje goriva (g/kWh) za različite vrste pogona, goriva i godine ugradnje [2] | 66 |
| Tablica 26. SO _x emisijski faktori (g SO _x /g goriva) za goriva HFO i MDO | 66 |
| Tablica 27. NO _x emisijski faktori (g/kWh) za različite kategorije goriva, motora i IMO Razreda..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| Tablica 28. PM ₁₀ emisijski faktori (g/kWh) za različite kategorije pogona i goriva [2]..... | 67 |
| Tablica 29. NMVOC emisijski faktori (g/kWh) za različite vrste pogona i goriva [2] | 67 |
| Tablica 30. Raspon mjerenja i preciznost mjerenja za određene plinove [125]..... | 69 |
| Tablica 31. Vrste goriva s pripadajućim specifikacijama [125] | 70 |
| Tablica 32. Specifikacije Ro-Pax brodova: Marko Polo, Zadar, Dubrovnik..... | 76 |
| Tablica 33. Deklaracije kvalitete INA Marine Eurodizel goriva..... | 80 |
| Tablica 34. Izvod iz izmjerenih podataka (M/T Dubrovnik) s programom pohrane postavljenim na 5 sekundi | 87 |
| Tablica 35. Izvod iz izmjerenih podataka (M/T Marko Polo) s programom pohrane postavljenim na 3 sekunde | 87 |
| Tablica 36. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka u fazi plovidbe za sve brodove i motore s pripadajućim izračunatim prosječnim vrijednostima | 89 |
| Tablica 37. Srednje vrijednosti (μ) i standardne devijacije (σ) izmjerenih podataka u fazi manevriranja za sve brodove i motore s pripadajućim izračunatim prosječnim vrijednostima | 94 |
| Tablica 38. Procijenjeni emisijski faktori za fazu plovidbe | 126 |
| Tablica 39. Procijenjeni emisijski faktori za fazu manevriranja..... | 126 |

POPIS KRATICA, OZNAKA I SIMBOLA

Kratice

| | |
|----------|--|
| ABS | - American Bureau of Shipping |
| AE | - Auxiliary engine |
| AIS | - Automatic Identification System |
| AMSA | - Australian Maritime Safety Authority |
| BC | - Black carbon |
| BDN | - Bunker Delivery Note |
| BFO | - Bunker fuel oil |
| CII | - Carbon Intensity Indicator |
| CMCC | - The Euro-Mediterranean Centre for Climate Change |
| CONCAWE | - Conservation of Clean Air and Water in Europe |
| CPP | - Controllable pitch propeller |
| D | - desno |
| DNV | - klasifikacijsko društvo Det Norske Veritas |
| DWT | - nosivost broda deadweight tonnage |
| ECA | - Emission Control Area |
| EEDI | - Energy Efficiency Design Index |
| EEXI | - Efficiency existing ship index |
| EF | - emisijski faktor |
| EGR | - Exhaust Gas Recirculation |
| EIAPP | - Međunarodne svjedodžbe za motor o sprječavanju onečišćenja zraka |
| EMEP/EEA | - European Environment Agency/ European monitoring and evaluation program |
| EMSA | - European Maritime Safety Agency |
| EU ETS | - European Union Emission Trading System |
| GT | - gas turbine, plinska turbina |
| GUTTA | - saving fuel and emissions from maritime transport in the Adriatic region |
| HFO | - heavy fuel oil, teško brodsko gorivo |
| HSD | - high speed diesel |
| IMO | - International Maritime Organization |

| | |
|--------|---|
| IPCC | - Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISO | - Međunarodna organizacija za standardizaciju |
| L | - lijevo |
| LF | - load factor, faktor opterećenja |
| LNG | - ukapljeni prirodni plin |
| LPG | - ukapljeni naftni plin |
| LSHFO | - low sulphur heavy fuel oil |
| M/T | - motorni trajekt |
| MARPOL | - Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova |
| MBM | - Market based measures |
| MCR | - Maximum continuous rating |
| MDO | - Marine diesel oil |
| ME | - main engine |
| MEET | - Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport |
| MEPC | - Odbora za zaštitu morskog okoliša |
| MGO | - Marine gas oil |
| MRV | - Monitoring, Reporting and Verification |
| MSD | - Medium speed diesel |
| RMSE | - Root Mean Square Error, srednja kvadratna pogreška |
| RO | - ostatno gorivo |
| RO-Pax | - roll-on/roll-off putnički brod |
| RO-RO | - roll-on/roll-off brod |
| SCR | - Selektivna katalitička redukcija |
| SECA | - Sulphur Emission Control Area |
| SEEMP | - Brodski plan upravljanja energetske učinkovitosti |
| SSD | - Slow speed diesel |
| UN | - Ujedinjeni narodi |
| UNFCCC | - Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime |
| US EPA | - Američka agencija za zaštitu okoliša |

Oznake i simboli


| | |
|--------------------------------|--|
| α | - parameter odstupanja |
| C_f | - udio ugljika u gorivu |
| C_j | - koncentracija u ispušnih plinovima, (ppm ili %) |
| CH | - ugljikovodici |
| CH ₄ | - metan |
| $f_{(xi)}$ | - izlazna funkcija |
| $f_{(xj)}$ | - procijenjena izlazna funkcija |
| f_c | - potrošnja goriva, fuel consumption |
| H ₂ O | - molekula vode |
| H ₂ SO ₄ | - sumporna kiselina |
| HCB | - heksaklorbenzeni |
| k | - jezgra kovarijance |
| K_{no} | - koeficijent niskog opteećenja |
| l | - lengerscale, glatkoća funkcije |
| λ | - pretičak zraka |
| μ | - srednja vrijednost |
| M_i | - relativna molekularna masa plina, (kmol/kg) |
| M_{isp} | - molekularna masa ispušnih plinova (kmol/kg) |
| m_{isp} | - protok ispušnih plinova (kg/h) |
| m_{N_2} | - maseni udio dušika, (kg N ₂ /kg goriva) |
| m_{CO_2} | - maseni udio ugljikova dioksida, (kg CO ₂ /kg goriva) |
| m_{SO_2} | - maseni udio sumporovog dioksida, (kg SO ₂ /kg goriva) |
| m_{O_2} | - maseni udio kisika, (kg O ₂ /kg goriva) |
| n | - broj okretaja (o/min) |
| N ₂ | - molekula dušika |
| N ₂ O | - dušikov oksid |
| NH ₃ | - amonijak |

| | |
|-----------------|---|
| Nm | - nautička milja |
| NMVOOC | - Non-Methane Volatile Organic Compounds |
| NO | - dušikov monoksid |
| NO ₂ | - dušikov dioksid |
| NO _x | - dušikovi oksidi |
| O ₃ | - molekula ozona |
| O ₂ | - molekula kisika |
| OH | - hidroksid |
| σ | - standardna devijacija |
| σ^2 | - varijanca |
| P | - snaga, (kW) |
| P_X | - Gaussova distribucija |
| p | - periodičnost |
| PAH | - polycyclic aromatic hydrocarbon |
| PCB | - poliklorirani bifenili |
| PM | - particulate matter |
| R ² | - koeficijent determinacije |
| R_{adj}^2 | - korigirani koeficijent determinacije |
| R_f | - redukcijski faktor |
| Rpm | - broj okretaja, Revolutions per minute |
| SO ₂ | - sumporov dioksid |
| SO _x | - sumporni oksidi |
| <i>sfoc</i> | - specifična potrošnja goriva, (g/kWh) |
| SS _E | - suma kvadrata odstupanja promatranih vrijednosti |
| SS _T | - suma kvadrata zavisne varijable |
| $T_{isp.}$ | - temperatura ispušnih plinova, (°C) |
| V_{CO_2} | - volumni udio ugljikovog dioksida, (kmol CO ₂ /kg goriva) |
| V_{isp} | - volumen ispušnih plinova, (kmol/kg goriva) |
| V_{N_2} | - volumni udio dušika, (kmol N ₂ /kg goriva) |

| | |
|-------------|---|
| $V_{O,min}$ | - minimalna potrebna količina kisika za izgaranje, (kmol O ₂ /kg goriva) |
| V_{O_2} | - volumni udio kisika, (kmol O ₂ /kg goriva) |
| V_{SO_2} | - volumni udio sumporovog dioksida, (kmol SO ₂ /kg goriva) |
| VOC | - Volatile Organic Compounds |
| V_{ref} | - brzina broda, (čv) |
| V_{SO_2} | - volumni sumporovog dioksida, (kmol SO ₂ /kg goriva) |
| V_{zrak} | - količina zraka za izgaranje, (kmol zrak/kg goriva) |
| W_i | - trenutna snaga motora u ovisnosti o opterećenju rada [kW] |
| x | - nezavisna varijabla |
| y | - zavisna varijabla |
| \hat{y} | - procijenjen podatak |
| y_i | - izmjeren podatak |

PRILOG 1

INA Deklaracija kvalitete goriva, Otpremnica goriva

| | | |
|---|--|-----------------------------------|
|  INA <small>INDUSTRIJA NAFTE, d.d.</small> Rafinerija i marketing Logistika Terminal Solin | DEKLARACIJA KVALITETE DECLARATION OF QUALITY | Oznaka / Report No: D112-50/23 |
| | | Datum / Date: 2.5.2023. |

Proizvod / Product : **INA MARINE EURODIESEL**
 Norme / Norm : **INA MARINE EURODIESEL**
 Laboratorij / Laboratory : **INA N 02-009**
 Broj ispitnog izvješća / Test report No : **INA RNR Kontrola kvalitete / INA RNR Quality Control**
 223043010C00005
 Oznaka spremnika / Tank No : **R-3** Zemlja proizvodnje / Origin: **Italija**

| Značajka Property | Jedinica Unit | Metoda ispitivanja Test method | Granična vrijednost Limits | Rezultat Result |
|---|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Kinematička viskoznost pri 40°C / Kinematic viscosity at 40°C | mm ² /s | HRN EN ISO 3104 | 2,000 - 6,000 | 2,823 |
| Gustoća pri 15°C / Density at 15°C | kg/m ³ | HRN EN ISO 12185 | najviše / max 890,0 | 833,1 |
| Cetanski indeks / Cetane Index | | HRN EN ISO 4264 | najniže / min 46,0 | 52,9 |
| Količina ukupnog sumpora / Sulphur content | mg/kg | HRN EN ISO 20846 | najviše / max 10,0 | <u>6,2</u> |
| Točka paljenja / Flash point | °C | HRN EN ISO 2719 | najniže / min 60,0 | 65,0 |
| Vodikov sulfid (H ₂ S) / H ₂ S content | mg/kg | IP 570 | najviše / max 2,0 | <0,400 |
| Kiselinski broj / Acid number | mg KOH/g | ASTM D 664 | najviše / max 0,50 | 0,06 |
| Oksidacijska stabilnost / Oxidation stability | g/m ³ | HRN EN ISO 12205 | najviše / max 25 | <25 |
| Količina koksnog ostatka (od 10%-tnog ostatka destilata) / Carbon residue (on 10% distillation residue) | % (m/m) | HRN EN ISO 10370 | najviše / max 0,30 | <0,010 |
| Točka zamućenja / Cloud point | °C | HRN ISO 3015 | iskazuje se/report | - 4 |
| Točka filtrabilnosti / CFPP | °C | HRN EN 116 | | - 9 |
| Točka tečenja / Pour point | °C | HRN ISO 3016 | | -15 |
| Izgled / Appearance | | Vizualno/Visual | bistar i proziran / bright and clear | bistar i proziran / bright and clear |
| Količina pepela / Ash content | % (m/m) | HRN EN ISO 6245 | najviše / max 0,010 | <0,001 |
| Mazivost (wscd) / Lubricity (wscd) | µm | HRN EN ISO 12156-1 | najviše / max 460 | 440 |
| Količina ukupnog sumpora / Sulphur content | mg/kg | HRN EN ISO 20846 | najviše / max 10,0 | 6,2 |

Opaska / Note:

*zimski kvaliteta / winter quality: -6°C, **ljetna kvaliteta / summer quality: 0°C

Deklaracija kvalitete izrađena je na osnovi ispitnog izvješća po rezultatima analize uzorka u laboratoriju akreditiranom prema normi HRN ISO/IEC 17025. / Declaration of quality prepared according to the Test report based on the results of sample analysis in a laboratory accredited according to the standard HRN ISO / IEC 17025.

Deklaraciju kreirao / Declaration created : Jakov Lisica

Otpremnik / Shipping officer Marin Boban



PRILOG 2

Svjedodžba Testo 350 Maritime v2 uređaja



NIPPON KAIJI KYOKAI

TYPE APPROVAL CERTIFICATE FOR EXHAUST GAS MEASUREMENT DEVICE

Certificate No. TA14061M

This is to certify that the undernoted product has been found to comply with the requirements specified in Chapter 1, Part7 of "Guidance for the Approval and Type Approval of Materials and Equipment for Marine Use" and the relevant Society's Rules.

This certificate is issued to

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| Manufacturer: | Testo SE & Co. KGaA |
| Product description: | Exhaust Gas Measurement Device |
| Model: | testo 350 MARITIME_V2 |

| | |
|---------------|-----------------|
| Approval No.: | 14DD001B |
| Valid until: | 22 January 2019 |

This certificate is subject to the conditions specified in the attached sheets.

Issued at Tokyo on 28 December 2017



F. Taguchi
General Manager
Machinery Department