# Analiza ugljičnog otiska putničkog broda za unutarnju plovidbu

**Gungadin, Peevesh Sharma**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:652665

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Peevesh Sharma Gungadin**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Peevesh Sharma Gungadin

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru, dipl. ing. na stručnoj pomoći i podršci kod savladavanja jezične barijere tijekom pisanja ovog rada. Jako cijenim profesionalne savjete i dostupnost profesora u svakom koraku izrade. Htio bih se zahvaliti i Maji Perčić, mag. ing. koja me je uputila u provedbu analiza i olakšala rad stručnom literaturom i primijenjenim znanjem.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, kolegama i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom dosadašnjeg studiranja.

Peevesh Sharma Gungadin

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3 | |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 - | |

# DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Peevesh Sharma Gungadin** Mat. br.: 0035185744

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza ugljičnog otiska putničkog broda za unutarnju plovidbu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of carbon footprint of an inland waterway passenger ship**

Opis zadatka:

Ekološki kriteriji postaju sve važniji čimbenik u osnivanju, gradnji i eksploataciji svih brodova, pri čemu je njihov utjecaj na okoliš osobito važno razmatrati u slučajevima plovidbe u gusto naseljenim područjima, kao primjerice u priobalnoj i unutarnjoj plovidbi. Stoga se sve više istražuju alternativna rješenja energetskih sustava brodova više razine energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti. Takva rješenja nerijetko imaju kontradiktorne zahtjeve u smislu istovremenog povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja ukupnih troškova. U diplomskom radu potrebno je analizirati ugljični otisak putničkog broda namijenjenog za unutarnju plovidbu. Uz osnovnu konfiguraciju energetskog sustava koja uključuje brodski dizelski motor, u cilju smanjenja navedenih emisija, potrebno je predložiti i alternativne konfiguracije brodskog energetskog sustava (podrazumijevajući mogućnost uporabe alternativnih goriva), te analizirati njihovu isplativost, vodeći računa o raspoloživosti odgovarajuće infrastrukture u Republici Hrvatskoj.
Rad treba sadržavati:

1. Opis problematike utjecaja broda na okoliš s osvrtom na brodove u unutarnjoj plovidbi,
2. Analizu hrvatske flote unutarnje plovidbe s naglaskom na izvedbe brodskih energetskih sustava,
3. Opis proračunske metodologije i korištene programske podrške,
4. Tehnički opis analiziranog broda,
5. Proračun cjeloživotnih emisija različitih energetskih konfiguracija broda i s njima povezanih troškova,
6. Analizu rezultata s osvrtom na tehničke i operativne mjere za smanjenje utjecaja broda na okoliš, te prijedlog alternativnih rješenja energetskog sustava broda.

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

| Zadatak zadan: | Datum predaje rada: | Predviđeni datum obrane: |
|---|---|---|
| 30. travnja 2020. | 2. srpnja 2020. | 6. – 10.7.2020. |

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I

POPIS SLIKA ..... IV

POPIS TABLICA ..... V

POPIS OZNAKA ..... VI

SAŽETAK ..... VII

SUMMARY ..... VIII

1. UVOD ..... 1

2. PROBLEMATIKA UTJECAJA BRODA NA OKOLIŠ ..... 3

2.1 Razvoj Hrvatskih unutarnjih plovnih putova ..... 3

2.2 Prijevoz unutarnjim vodama u EU i Hrvatskoj ..... 4

2.3 IMO regulativa ..... 7

2.4 Emisije stakleničkih plinova ..... 8

2.5 Glavni uzrok emisija tijekom životnog ciklusa broda ..... 10

3. ANALIZA HRVATSKE FLOTE UNUTARNJE PLOVIDBE ..... 12

3.1 Analiza tehničkih značajki brodova ..... 12

3.1.1 Plutajuća postrojenja (jaružala) ..... 12

3.1.2 Remorkeri (tegljači i gurači) ..... 12

3.1.3 Teretni brodovi ..... 13

3.1.4 Putnički brodovi ..... 13

3.1.5 Tehnička (radna) plovila ..... 14

3.2 Analiza izvedbi brodskih energetskih sustava ..... 14

4. METODOLOGIJA ..... 16

5. ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA PUTNIČKOG BRODA TROŠENJ ..... 18

5.1 Tehnički opis analiziranog broda ..... 18

5.2 Simulacija WTP faze dizelskog goriva ..... 19

5.2.1 Model proizvodnje i prijevoza sirove nafte ..... 19
5.2.2 Proces prijevoza sirove nafte iz Saudijske Arabije do Rijeke ..... 19
5.2.3 Model proizvodnje i prijevoza dizelskog goriva ..... 20
5.2.4 Proces prijevoza dizelskog goriva iz rafinerije do NP Krka ..... 21
5.2.5 Rezultati WTP faze dizelskog goriva ..... 21
5.2.6 Usporedba emisija procesa WTP faze ..... 22
5.3 Simulacija PTW faze dizelskog goriva ..... 23
5.3.1 Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi ..... 23
5.4 Rezultati WTW faze dizelskog goriva ..... 24
6. ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA PRI PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE ..25
6.1 Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj ..... 25
6.2 Simulacija WTP faze električne energije ..... 26
6.2.1 Model proizvodnje električne energije ..... 26
6.2.2 Rezultati WTP faze električne energije ..... 26
6.2.3 Ugljični otisak zbog Litij-ionskih baterija ..... 27
7. USPOREDBA EMISIJA ELEKTRIČNOG I DIZELSKOG POGONA ..... 29
8. ANALIZA TROŠKOVA BRODA ..... 30
8.1 Analiza troškova dizelskog pogona ..... 30
8.2 Analiza troškova električnog pogona ..... 32
8.3 Usporedba LCCA analiza dizelskog i električnog pogona baterijom 880 kWh ..... 32
8.4 Proračun LCA i LCCA za električni pogon baterijom 300 kWh ..... 33
8.4.1 Usporedba LCCA analiza dizelskog i električnog pogona baterijom 300 kWh 33
8.4.2 Ugljični otisak zbog Litij-ionskih baterija 300 kWh ..... 34
8.4.3 Usporedba emisija dizelskog pogona i električnog poriva s baterijom 300kWh 34
9. TEHNIČKE I OPERATIVNE MJERE ZA SMANJENJE NEŽELJENIH EMISIJA ..... 36
10. ALTERNATIVNA GORIVA ..... 38

10.1 Metanol i biometanol ..... 38
10.2 Biodizel ..... 38
10.3 Ukapljeni Naftni Plin (LPG) ..... 39
10.4 Ukapljeni prirodni plin (LNG) ..... 39
10.5 Električna energija ..... 39
11. ZAKLJUČAK ..... 40
LITERATURA ..... 41
PRILOZI ..... 45

# POPIS SLIKA

Slika 1. Unutarnji plovni putovi u Republici Hrvatskoj [12] ..... 3
Slika 2. Usporedba puta po toni prevezene robe koristeći isti iznos energije [13] ..... 4
Slika 3. Usporedba eksternih troškova prijevoza [13] ..... 5
Slika 4. Podjela prijevoza robe u Europskoj Uniji u 2018. god. [14] ..... 5
Slika 5. Podjela prijevoza robe u Hrvatskoj u 2018. god [14] ..... 5
Slika 6. Trend udjela prijevoza robe unutarnjim vodama uspoređeno s cestovnim i željezničkim prijevozom [14] ..... 6
Slika 7. Ukupna količina prevezene robe u Hrvatskoj [15] ..... 6
Slika 8. Smanjenje $CO_2$ emisija prema uvođenju EEDI-a ..... 8
Slika 9. Emisija stakleničkih plinova prema vrsti plina [2] ..... 8
Slika 10. $CO_2$ emisije tijekom životnog ciklusa broda [20] ..... 10
Slika 11. CO emisije tijekom životnog ciklusa Panamax tankera [20] ..... 10
Slika 12. Motorni tanker Cibalia ..... 13
Slika 13. Putnički brodovi Miljevci i Miljačka iz NP Krka [22] ..... 13
Slika 14. Plutajuće postrojenje Bosut ..... 14
Slika 15. Korisničko sučelje programskog paketa GREET 2019 ..... 17
Slika 16. Putnički brod Trošenj u nacionalnom parku Krka [24] ..... 18
Slika 17. Model proizvodnje sirove nafte u GREET-u ..... 19
Slika 18. Proces prijevoza sirove nafte iz Saudijske Arabije u Rafineriju Rijeka ..... 20
Slika 19. Model proizvodnje dizelskog goriva u GREET-u ..... 20
Slika 20. Proces prijevoza dizelskog goriva iz Rijeke do NP Krka ..... 21
Slika 21. Prikaz emisija procesa WTP faze ..... 22
Slika 22. Proračun ugljičnog otiska PTW faze u programskom paketu GREET 2019 ..... 23
Slika 23. Usporedba doprinosa ugljičnog otiska pojedinačnih faza ..... 24
Slika 24. Udio pojedinih izvora energije za proizvodnju električne energije u 2018. god. ..... 25
Slika 25. Podjela fosilnih goriva ..... 25
Slika 26. Podjela obnovljivih izvora energije ..... 25
Slika 27. Model proizvodnje električne energije u GREET-u ..... 26
Slika 28. WTW emisije stakleničkih plinova električnog broda ..... 28
Slika 29. WTW emisije stakleničkih plinova dizelskog i električnog poriva ..... 29
Slika 30. Metode obračuna karbonske takse ..... 30
Slika 31. Troškovi karbonske takse tijekom životnog vijeka broda ..... 31
Slika 32. LCCA usporedba za dizelski poriv i elektro-poriv baterijom od 880 kWh ..... 33
Slika 33. LCCA usporedba za dizelski poriv i elektro-poriv baterijom od 300 kWh ..... 33
Slika 34. WTW emisije stakleničkih plinova električnog broda baterijom 300 kWh ..... 34
Slika 35. WTW emisije dizelskog i električnog poriva baterijom 300 kWh ..... 35

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Propisane vrijednosti smanjenja CO2 emisija ..... 7
Tablica 2. Potencijal globalnog zatopljenja stakleničkih plinova [19] ..... 9
Tablica 3. Podjela brodova unutarnje plovidbe prema tipu broda [21] ..... 12
Tablica 4. Popis brodova električnim porivom [21] ..... 15
Tablica 5. Tehnički podaci o brodu [21] ..... 18
Tablica 6. Podaci o prijevozu sirove nafte iz Saudijske Arabije do NP Krka ..... 19
Tablica 7. Podaci o prijevozu dizelskog goriva iz Rijeke do NP Krka ..... 21
Tablica 8. Količina stakleničkih plinova u WTP fazi dizelskog goriva ..... 21
Tablica 9. Ugljični otisak WTP faze (kg $CO_2$-eq/km) ..... 22
Tablica 10. Količina stakleničkih plinova po procesima WTP faze (g $CO_2$-eq/MJ) ..... 22
Tablica 11. Količina stakleničkih plinova u PTW fazi ..... 23
Tablica 12. Ugljični otisak PTW faze (kg $CO_2$-eq/km) ..... 24
Tablica 13. Ugljični otisak WTW faze dizelskog goriva (kg $CO_2$-eq/km) ..... 24
Tablica 14. Udjeli pojedinih izvora električne energije za Hrvatski Mix ..... 26
Tablica 15. Količina stakleničkih plinova u WTP fazi električne energije ..... 27
Tablica 16. Ugljični otisak WTP faze električne energije (kg $CO_2$-eq/km) ..... 27
Tablica 17. Količina stakleničkih plinova zbog proizvodnje Litijskih baterija ..... 28
Tablica 18. Ugljični otisak zbog proizvodnje Litijskih baterija (kg $CO_2$-eq/km) ..... 28
Tablica 19. Predviđene cijene $CO_2$ za Europsku Uniju [31] ..... 30
Tablica 20. Troškovi karbonske takse tijekom životnog ciklusa prema 4 modela ..... 31
Tablica 21. Procjene cijena Litij-ionske baterija do 2040. god. ..... 32
Tablica 22. Rezultati LCCA analize ..... 32
Tablica 23. Smanjenje $CO_2$ emisija pomoću postojećih tehnologija i mjera [33] ..... 36

# POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| *SFOC* | g/kWh | Specifična potrošnja goriva |
| GWP | | Potencijal globalnog zatopljenja |
| $P_{MRC}$ | kW | Maksimalna trajna snaga |
| $P_{SRC}$ | kW | Trajna eksploatacijska snaga |
| WTP | - | Od izvora do pumpne stanice |
| PTW | - | Od pumpne stanice do kotača (propulzora) |
| WTW | - | Od izvora do kotača (propulzora) |

# SAŽETAK

Zbog usvajanja novih strategija smanjenja stakleničkih plinova sa strane Međunarodne pomorske organizacije, razmatranje načina smanjenja brodskih emisija postaje važan projektni kriterij te je stoga razine emisija postojećih i novih brodova potrebno analizirati prema budućim granicama.

U ovom diplomskom radu analizira se životni ciklus dizelskog goriva i električnog pogona kako bi se usporedile cjeloživotne emisije svakog izvora energije. Razmatra se utjecaj broda unutarnje plovidbe na okoliš, pri čemu je najprije provedeno istraživanje brodova unutarnje plovidbe Republike Hrvatske i njihovih porivnih sustava. Za postojeći energetski sustav putničkog broda Trošenj napravljena je analiza životnog ciklusa. Prema rezultatima analize životnog ciklusa, donesen je zaključak o načinima smanjenja ugljičnog otiska broda korištenjem alternativnih izvora energije i dani su prijedlozi kako to postići u skladu s pravilima Međunarodne pomorske organizacije.

Ključne riječi: brodovi unutarnje plovidbe, dizelsko gorivo, alternativno gorivo, analiza životnog ciklusa

# SUMMARY

Due to the recent implementation of greenhouse gas emissions reduction strategies by the International Maritime Organization, ship emissions have become very important criteria in marine design and thus need to be analysed for existing and new ships with respect to pre-set future limits.

This thesis presents an analysis of the life cycle of diesel and electricity as ship energy sources in order to compare the lifetime emissions of each of them. The environmental effects of inland waterway vessels are considered, where at first a research into Croatian inland waterway vessels and their propulsion systems is performed. In order to demonstrate the application of alternative fuels, the life cycle analysis of an inland passenger vessel, Trošenj, is performed. Methods of reducing the carbon footprint, mainly through the use of alternative fuels, and thereby abiding by IMO regulations are suggested based on the results of the life cycle analysis.

Key words: inland waterway vessel, diesel fuel, alternative fuel, life cycle analysis

# 1. UVOD

Onečišćenje zraka postalo je danas jedan od najznačajnijih problema na lokalnoj, europskoj i globalnoj razini. Onečišćenje zraka nanosi štetu ljudskom zdravlju i ekosustavima. Postoje brojni izvori onečišćenja zraka, antropogenog kao i prirodnog podrijetla [1]:

- izgaranje fosilnih goriva za proizvodnju električne energije, promet, industrija i kućanstva;
- industrijski procesi i uporaba otapala, na primjer u kemijskoj i mineralnoj industriji;
- poljoprivreda;
- obrada otpada;
- erupcije vulkana, prašina nanesena vjetrom, raspršena morska sol i emisija hlapivih organskih spojeva iz biljaka primjeri su prirodnih izvora emisija.

Izgaranje fosilnih goriva za namjene unutarnje plovidbe proizvodi emisije različitih stakleničkih plinova, uglavnom ugljikov dioksid ($CO_2$), metan ($CH_4$), dušikov suboksid ($N_2O$) i fluroririrane plinove. Proces izgaranja fosilnih goriva isto proizvodi druge zagađivače poput ugljičnog monoksida (CO), dušikovih oksida ($NO_x$) i sumporovog dioksida ($SO_2$) koji se uglavnom ne smatraju kao plinovi s direktnim utjecajem na staklenički efekt. Glavni staklenički plin koji nastaje tijekom plovidbe je ugljični dioksid [2].

S ciljem smanjivanja emisija stakleničkih plinova, globalna zajednica treba smanjivati direktne stakleničke plinove koje uzrokuju ljudske aktivnosti. Njihova povećana koncentracija u atmosferi uzrokuje staklenički efekt što ima za posljedicu globalno zatopljenje i klimatske promjene [3]. Kako je izgaranje fosilnih goriva glavni izvor stakleničkih plinova, sektori prijevoza i energije najviše sudjelovaju u stvaranju stakleničkog efekta [4].

Kao i kod većine ostalih država, domaći i međunarodni prijevoz brodom zauzima veliki dio sektora prometa u Hrvatskoj. Brodovi koji plove unutarnjim vodama, jezerima i kanalima u Hrvatskoj se uglavnom razvrstavaju prema namjeni na tegljače, putničke brodove, teretne brodove i plutajuća postrojenja. U protekla 3 desetljeća, velika industrijska postrojenja i cestovna vozila su bili smatrani kao glavni uzrok onečišćenja zraka. Brodovima se nije davala značajna pažnja u problematici onečišćavanja zraka. Pošto nisu stacionarni i razmjerno su udaljeni od kopna, smatralo se da njihov doprinos onečišćenju zraka nije značajan. Kroz godine povećavao se promet brodovima i trenutno zauzima 90 % u svjetskoj trgovini. Iz tog razloga štetne emisije na kopnu su bile postupno regulirane i smanjene, a brodovi su postali veći zagađivači zraka. To je rezultiralo da se obrati pažnja na negativan utjecaj brodova na okoliš.

Industrija prijevoza brodovima je bila prisiljena smanjiti emisije u svrhu očuvanja mora, okoliša u cjelini i zdravlja svih živih bića [5].

Prema Trećoj Studiji IMO-a (International Maritime Organization) međunarodna plovidba je uzrok 2,1% globalnih stakleničkih plinova. Trenutne prognoze prikazuju da udio stakleničkih plinova iz plovidbe može rasti za 50%-250% do kraja 2050. god., ovisno o ekonomskom razvoju i razvoj energetskog sektora [6]. Kako bi se kontrolirala razina emisija, IMO je postavio regije ograničenih emisija (eng. Emission Control Areas, ECA) gdje su dopuštene razine emisija manje nego kod ostalih [7]. Isto tako je IMO postavio regulative koje zahtijevaju od brodovlasnika da smanjuju potrošnju goriva kako bi se smanjile emisije iz međunarodne plovidbe. IMO-ova strategija trenutno ima cilj da se smanje emisije $CO_2$ za 40 % do 2030. god. te najmanje 70 % do 2050. u odnosu na 2008. god. gdje su emisije $CO_2$ izražene po obavljenom radu u prometu. Ova strategija je u skladu s Pariškim sporazumom. Također, uveden je i pojam ugljičnog otiska koji se odnosi na količinu emisija $CO_2$ nastalih izravno ili neizravno nekom radnjom ili je akumulirana tijekom cjeloživotnog vijeka proizvoda. Važno je uočiti da regulativa IMO-a nije direktno primjenjiva na brodove unutarnje plovidbe, već su oni podvrgnuti regulativama pojedinih država, koje su neujednačeno razvijene. Neovisno o tome, trendovi za dekarbonizacijom su zajednički za sve industrije, a mnoge tehničke zakonitosti zajedničke su za brodove unutarnje i priobalne plovidbe.

Osim što imaju štetan utjecaj na okoliš, emisije brodova negativno utječu i na ljudsko zdravlje. Ovaj utjecaj je veći za brodove koji provede više vremena u lukama i blizu naseljenih područja, što se uglavnom odnosi na priobalne brodove s kratkim relacijama i brodove unutarnje plovidbe. Istraživanje emisija brodova i njihov utjecaj na okoliš je uglavnom fokusiran na pomorske (osobito velike trgovačke) brodove a manje na brodove unutarnje plovidbe. Razlog tome je da se općenito smatra da emisije brodova unutarnje plovidbe imaju slab utjecaj na okoliš jer su relativno mali dio sveukupnih emisija u prijevozu.

Kako bi se postigli ciljevi $CO_2$ emisija iz međunarodnog prijevoza, uveden je niz tehničkih i operacijskih mjera. Da bi se dobio uvid o isplativosti i održivosti mjera smanjenja $CO_2$ emisija za određeni brod, bitno je proračunati emisije koristeći metodu ugljičnog otiska (eng. *Carbon Footprint*). Ugljični otisak je mjera za određivanje ukupne emisije $CO_2$ pojedine aktivnosti ili akumuliranih tijekom životnog ciklusa broda [8]. Procjena ugljičnog otiska broda tijekom njegovog životnog vijeka se može dobiti provođenjem analize životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Assessment*) [9].

# 2. PROBLEMATIKA UTJECAJA BRODA NA OKOLIŠ

## *2.1 Razvoj Hrvatskih unutarnjih plovnih putova*

Hrvatska je smještena na dunavskom koridoru s tri glavne rijeke: Sava (hrvatska dionica 562 km), Drava (305 km) i Dunav (188 km), Slika 1. Prema Europskom sporazumu o glavnim plovnim putovima od međunarodnog značaja [10] koji je Republika Hrvatska potpisala i ratificirala, plovni putovi rijeka Save, Drave, Dunava i budućeg kanala Dunav-Sava uvrštavaju se u mrežu europskih plovnih putova, a luke u Osijeku, Vukovaru, Slavonskom Brodu i Sisku u mrežu luka otvorenih za međunarodni promet. Istim se ugovorom Republika Hrvatska obvezala da će plovne putove otvorene za međunarodnu plovidbu graditi i uređivati u skladu s propisanim standardima. Od postojećih plovnih putova u Hrvatskoj Dunav ima najbolje uvjete za plovidbu, dok Drava nema tako povoljne uvjete zbog sezonskih varijacija vodostaja. Iako je najdulja rijeka u Hrvatskoj Sava, ona je također u najlošijem stanju zbog višegodišnjeg zanemarivanja. Najveća riječna luka u Hrvatskoj je Vukovar, smještena na Dunavu sa godišnjim pretovarom od oko 900 000 tona. Ostale riječne luke su Osijek (na Dravi) te Sisak i Slavonski Brod. Teret koji se većinom prevozi hrvatskim rijekama je šećer, umjetno gnojivo, žitarice, željezna ruda te sirova nafta. [11]



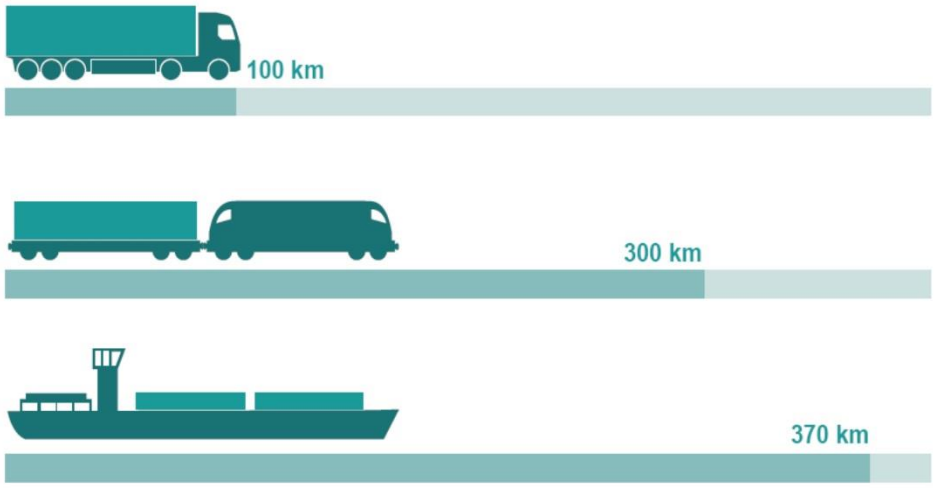

**Slika 1. Unutarnji plovni putovi u Republici Hrvatskoj [12]**

### *2.2 Prijevoz unutarnjim vodama u EU i Hrvatskoj*

Prijevoz unutarnjim vodama je, zajedno s cestovnim i željezničkim prijevozom, jedan od glavna tri modela prijevoza na kopnu. Prijevoz robe se odvija brodovima preko unutarnjih plovnih puteva poput kanala, rijeka i jezera.

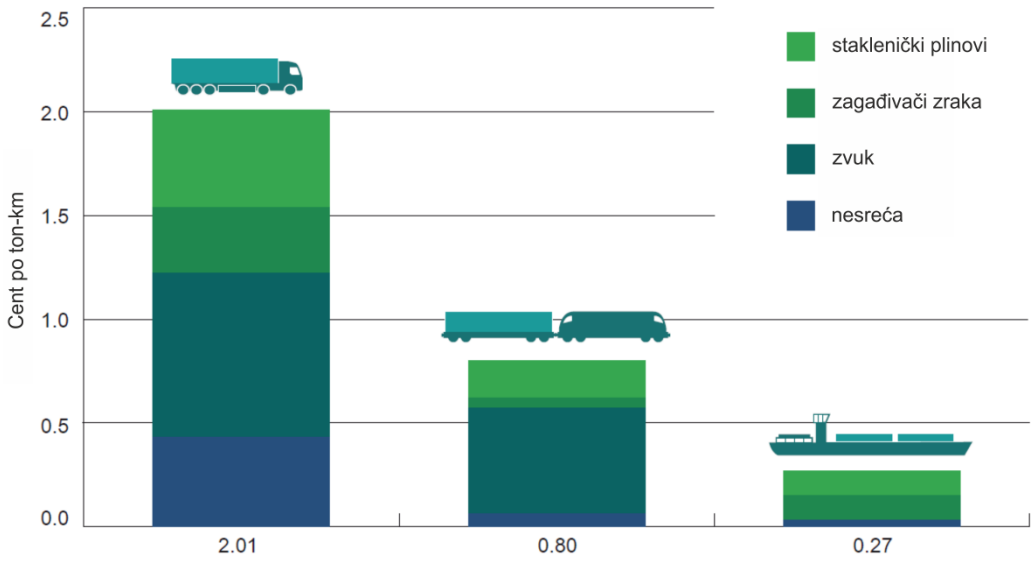
Europska Unija nastoji prebaciti promet s cesta na ekološka prihvatljivija prijevozna sredstva. Istraživanja su pokazala da je prijevoz unutarnjim vodama puno učinkovitiji što se tiče ekonomske uštede, smanjenja zagađenja i povećane sigurnosti kod prijevoza [13].

Prijevoz roba brodovima unutarnje plovidbe je daleko najučinkovitiji način prijevoza zbog veće postignute prevezene udaljenosti po toni prevezene robe za istu količinu goriva, Slika 2.



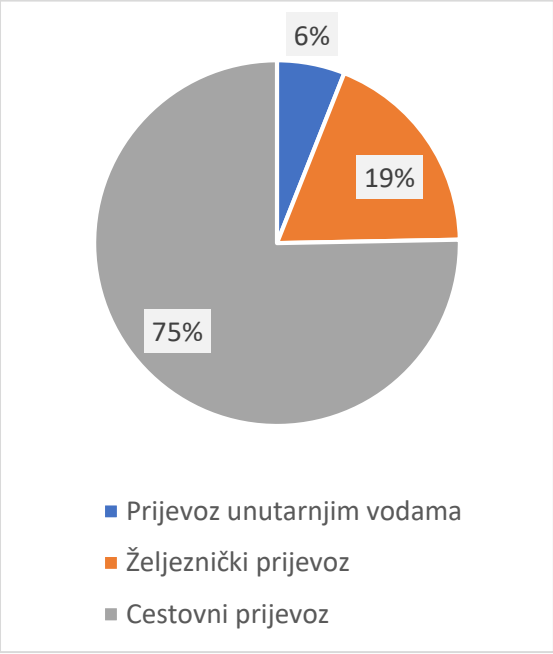

**Slika 2. Usporedba puta po toni prevezene robe koristeći isti iznos energije [13]**

Isto tako s ekološkog aspekta je prijevoz unutarnjim vodama manje štetan za prirodu kad se uzima u obzir količina prevezenog tereta i prijeđeni put, Slika 3.

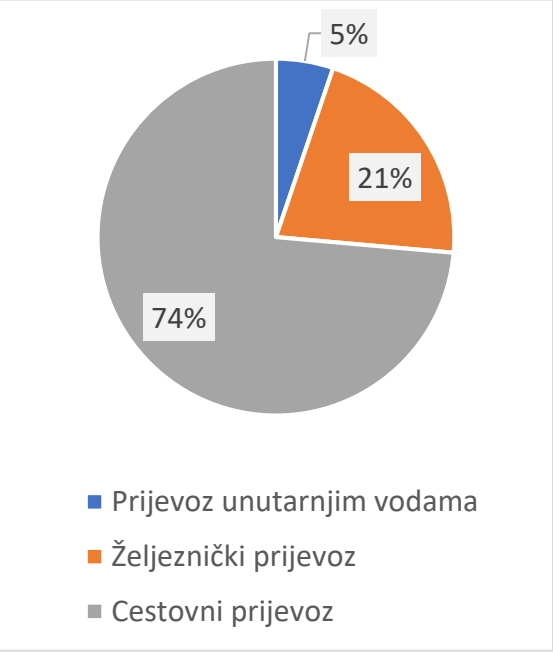



**Slika 3. Usporedba eksternih troškova prijevoza [13]**

Prema statističkim podacima Europske Komisije, prijevoz robe unutarnjim vodama trenutno iznosi samo 6% sveukupnog prometa u EU, Slika 4, i 5,2% u Hrvatskoj, Slika 5 [14].



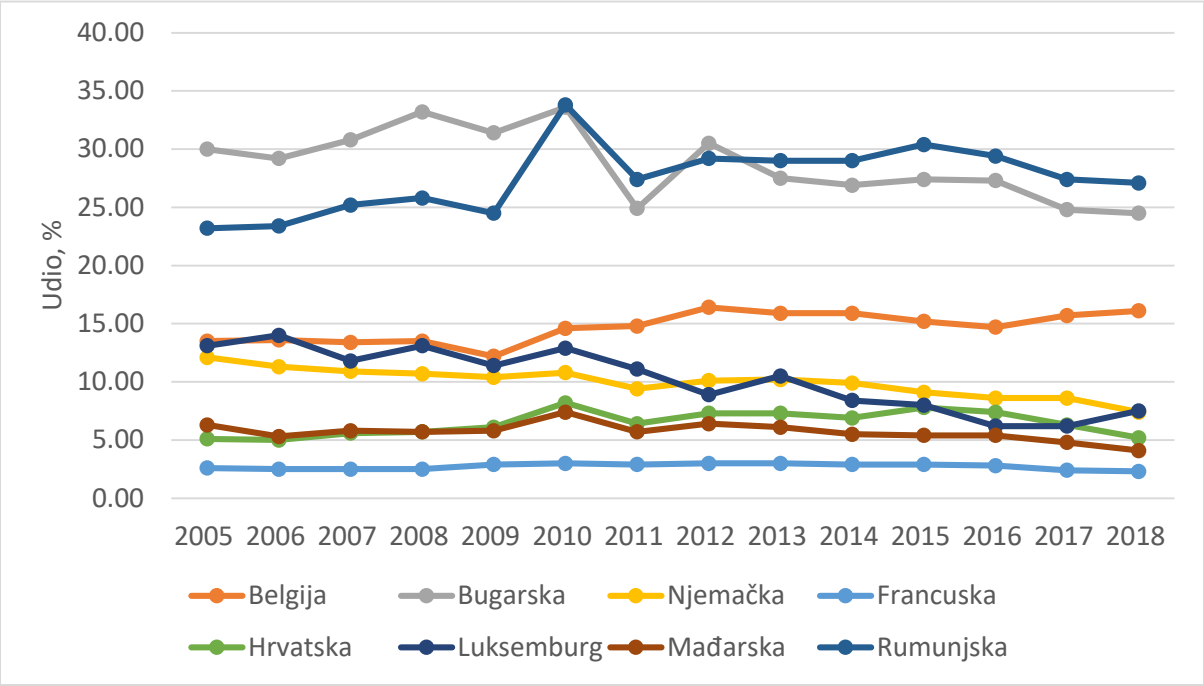

**Slika 4. Podjela prijevoza robe u Europskoj Uniji u 2018. god. [14]**



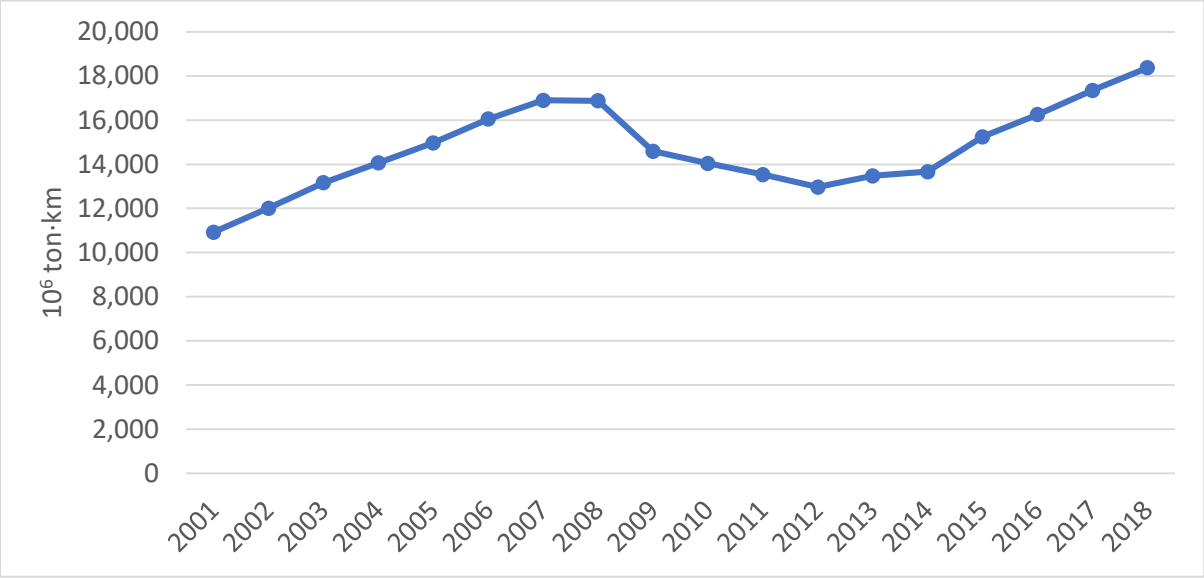

**Slika 5. Podjela prijevoza robe u Hrvatskoj u 2018. god [14]**

Ne postoji značajna promjena udjela prijevoza robe brodovima unutarnje plovidbe, Slika 6, ali ako se uzima u obzir trend povećanja sveukupne količine robe prevezene u Hrvatskoj, Slika 7,

može se zaključiti da je bio blagi porast u količini prevezene robe unutarnjim vodama u Hrvatskoj.




**Slika 6. Trend udjela prijevoza robe unutarnjim vodama uspoređeno s cestovnim i željezničkim prijevozom [14]**




**Slika 7. Ukupna količina prevezene robe u Hrvatskoj [15]**

Uzimajući u obzir težnju Europske Unije prema prebacivanju prometa s cesta [13] i porast sveukupne količine robe, Slika 7, može se očekivati trend povećanja udjela prijevoza brodovima unutarnje plovidbe i na taj način veći značaj njihovih emisija.

### *2.3 IMO regulativa*

Glavni tehnički zahtjev kod regulacije onečišćenja u pomorskom prometu je projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Indeks*, EEDI). To je veličina koja se primjenjuje za nove brodove ili brodove koji su bili podvrgnuti velikim modifikacijama i zadovoljavaju minimalne zahtjeve energetske učinkovitosti koja je izračunata preko formule zadane od IMO-a. EEDI je način kvantifikacije energetske učinkovitosti brodskog energetskog sustava [16].

U travnju 2018., IMO je usvojio novu strategiju smanjenja stakleničkih plinova iz brodskih emisija, s ciljem da se smanjuju sveukupne godišnje emisije stakleničkih plinova za 50% do 2050. god. u odnosu na one iz 2008. god. Ta strategija zahtijeva postroženje EEDI kriterija i brojnih drugih mjera poput mjera operativne učinkovitosti, smanjenja brzina plovidbe, mjera smanjenja $CH_4$ i isparljivih organskih spojeva (eng. Volatile organic compounds, VOC) emisija, alternativnih niskougljičnih i bezugljičnih goriva kako bi se smanjile emisije [17].

Trenutne odrednice Članka VI kontroliraju i ograničavaju sljedeća glavna područja [16]:

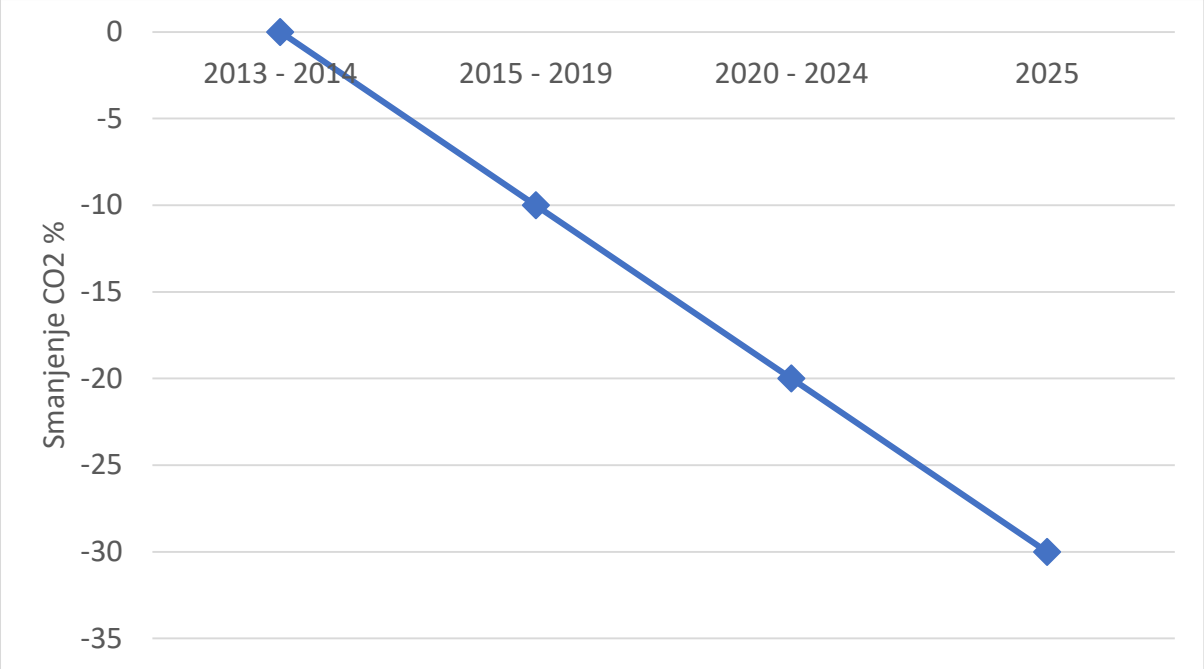
- Emisije tvari iz rashladnih uređaja i uređaja za gašenje požara koje oštećuju ozonski sloj (TOOS) (pravilo 12)
- $NO_x$ emisije brodskih dizelskih motora (pravilo 13)
- $SO_x$ emisije brodova (pravilo 14)
- VOC emisije iz tankova naftnih tankera (pravilo 15)
- Emisije incineratora na brodovima (pravilo 16)
- Kvaliteta brodskih goriva (pravilo 18)
- Energetska učinkovitost brodova (pravilo 4)

IMO pravila su stroža u tzv. ECA regijama (eng. *Emission Control Areas*). To su specifična područja plovidbe koja su definirana prema Prilogu III, Članak VI.

Tablica 1 i Slika 8 prikazuju propisane vrijednosti smanjenja $CO_2$ emisija prema referentnoj godini 2013.

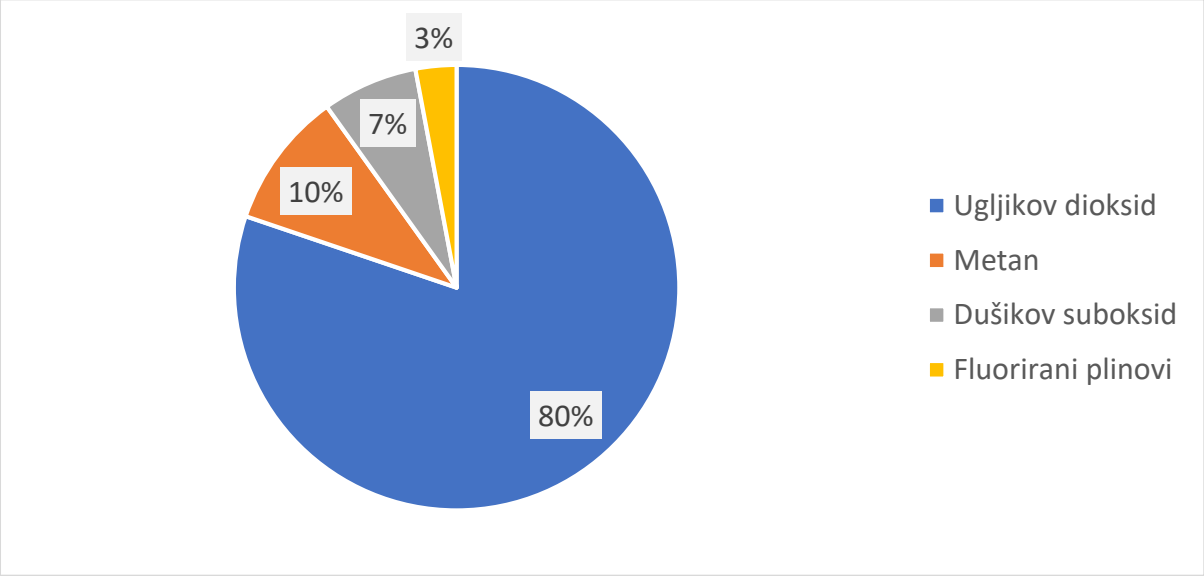
**Tablica 1. Propisane vrijednosti smanjenja $CO_2$ emisija**

| Projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI), usporedba kvota smanjenja $CO_2$ s referentnom godinom 2013. [16] | | | |
|---|---|---|---|
| 2013, Faza 0 | 2015, Faza 1 | 2020, Faza 2 | 2025, Faza 3 |
| Referentna godina | - 10% | - 20% | - 30% |




**Slika 8. Smanjenje $CO_2$ emisija prema uvođenju EEDI-a**

## *2.4 Emisije stakleničkih plinova*




**Slika 9. Emisija stakleničkih plinova prema vrsti plina [2]**

Plinovi koji otežavaju izlazak dugovalnog toplinskog zračenja iz atmosfere planeta su poznati kao staklenički plinovi [18].

**Ugljikov dioksid, $CO_2$**: glavni stakleнički plin koji se proizvodi ljudskim aktivnostima. Tijekom 2015. godine $CO_2$ emisije su činile čak 80% svih emisija stakleničkih plinova prouzročenih ljudskim aktivnostima, Slika 9. Glavni izvor tih emisija je izgaranje fosilnih goriva za prijevoz i proizvodnju energije, iako industrijski procesi i deforestacija također uzrokuju značajne promjene $CO_2$ emisija.

**Metan ($CH_4$):** metan se emitira tijekom proizvodnje i prijevoza ugljena, prirodnog plina i nafte. Do emisija metana dolazi od uzgoja stoke i drugih poljoprivrednih djelatnosti. Tijekom 2015. godine $CH_4$ emisije su činile 3% svih emisija, Slika 9.

**Dušikov suboksid ($N_2O$):** $N_2O$ se emitira tijekom poljoprivrednih i industrijskih procesa, izgaranjem fosilnih goriva kao i kod tretiranja otpadnih voda. Tijekom 2015. godine $N_20$ emisije su činile 7% svih emisija, Slika 9.

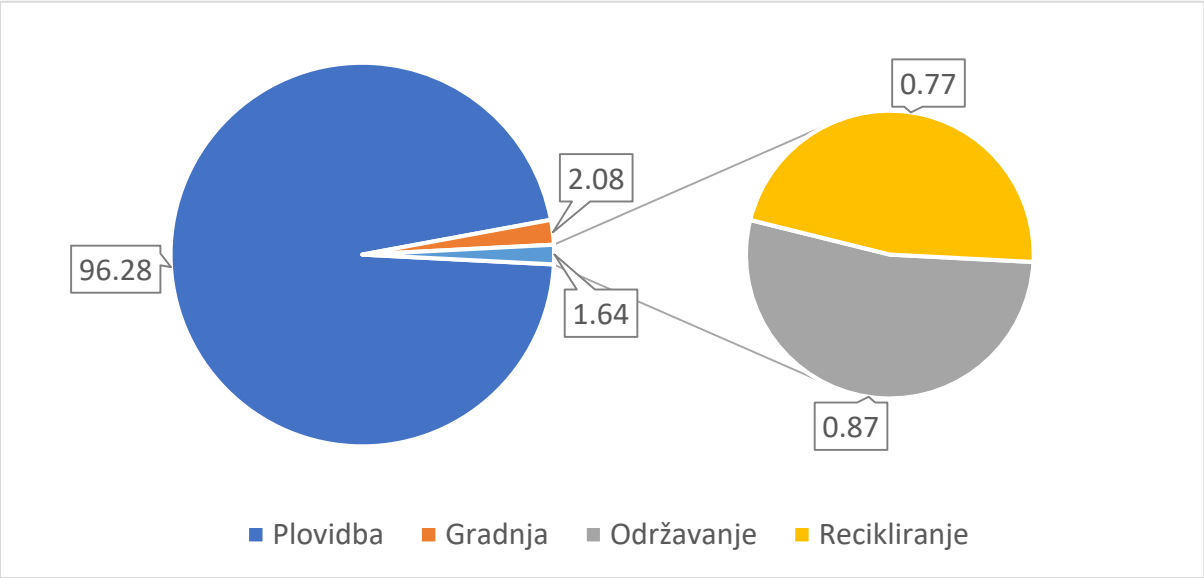
**Fluorirani plinovi**: za razliku od ostalih stakleničkih plinova, fluoridni plinovi nastaju isključivo ljudskim djelatnostima. Poznati su kao tvari koje oštećuju ozonski sloj (TOOS) i emitiraju se iz rashladnih tekućina i kod raznih industrijskih procesa poput proizvodnje aluminija i poluvodiča. Fluorirani plinovi imaju veliki potencijal globalnog zatopljenje (GWP) u odnosu na ostale stakleničke plinove, Tablica 2. Njihove male koncentracije u atmosferi uzrokuju mogu uzrokovati nerazmjerno velike promjene u globalnim temperaturama.

**Tablica 2. Potencijal globalnog zatopljenja stakleničkih plinova [19]**

| | Potencijal globalnog zatopljivanja (GWP) na 100 god. |
|---|---|
| $CO_2$ | 1 |
| $CH_4$ | 25 |
| $N_2O$ | 298 |
| HFC-134a | 1430 |
| R-404A (HFC blend) | 3922 |
| R-410A (HFC blend) | 2088 |
| HFC-125 | 3500 |
| PFC-14 | 7390 |
| SF6 | 22800 |

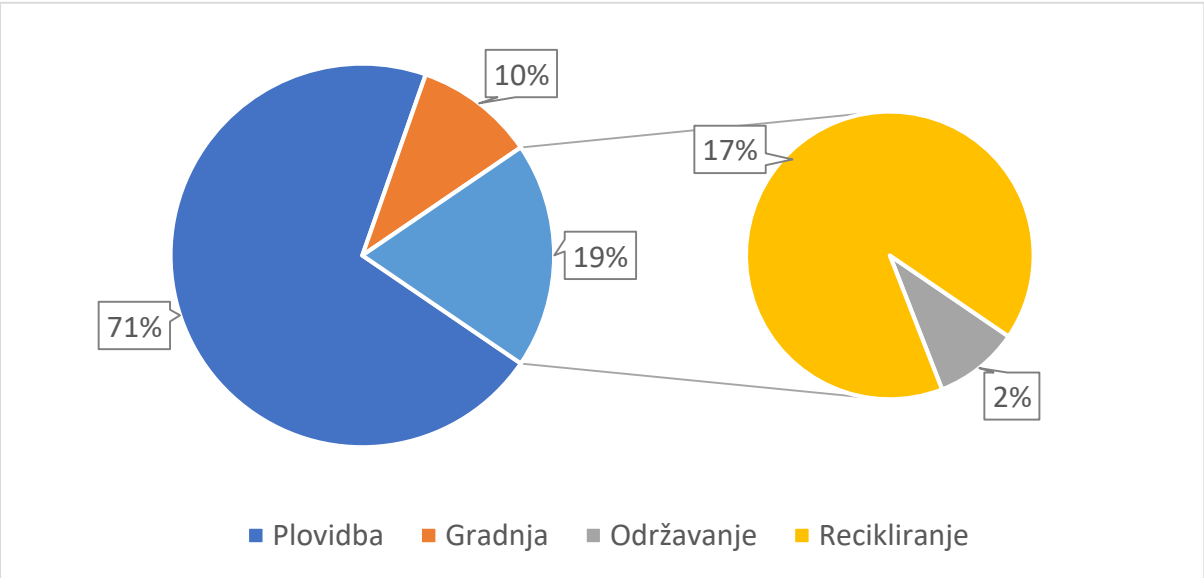
### *2.5 Glavni uzrok emisija tijekom životnog ciklusa broda*

Rezultati analize emisija tijekom životnog ciklusa Panamax tankera [20] pokazuju da izgaranje dizelskog goriva tijekom plovidbe uzrokuje daleko najviše $CO_2$ emisija u životnom vijeku broda, Slika 10.




**Slika 10. $CO_2$ emisije tijekom životnog ciklusa broda [20]**

Prema analizi životnog ciklusa tankera [20] emisije $CO_2$ su uglavnom iznad 90% ukupnih emisija tijekom plovidbe broda, Slika 10, tako da bi se analiza $CO_2$ emisija mogla ograničiti na fazu plovidbe.




**Slika 11. CO emisije tijekom životnog ciklusa Panamax tankera [20]**

Za razliku od $CO_2$ emisija, CO emisije su značajne u svim fazama, Slika 11. Dakle, analiza CO emisija se ne bi mogla ograničiti samo na plovidbu. Veće koncentracije CO emisija tijekom brodogradnje i recikliranja rezultiraju uglavnom od proizvodnih procesa čelika.

Pošto se u ovom radu razmatraju samo direktne emisije stakleničkih plinova, promatrat će se njihove emisije isključivo vezane uz plovidbu kako bi se pojednostavio proračun cjeloživotnih emisija. Općenito, cjeloživotne emisije $CO_2$ se promatraju za sve faze od dobivanja nafte do izgaranja dizelskog goriva.

# 3. ANALIZA HRVATSKE FLOTE UNUTARNJE PLOVIDBE

Hrvatska flota unutarnje plovidbe broji 62 broda, te uglavnom ukuljučuje plutajuća postrojenja, remorkere, putničke brodove i teretne brodove, Tablica 3. Podaci koji su ovdje korišteni za analizu preuzeti su iz Hrvatskog registra brodova unutarnje plovidbe [21].

## *3.1 Analiza tehničkih značajki brodova*

U principu postoje tri različita sredstva prijevoza na unutarnjim plovnim putovima: brod s vlastitim porivom, barže koje guraju brod s vlastitim porivom (potisni brod ili potisni teretni brod) i barže vučene riječnim tegljačima. Zadnja opcija je danas skoro potpuno napuštena na europskim plovnim putovima i ne može se više smatrati tipičnom [11].

Brodovi unutarnje plovidbe se uglavnom klasificiraju prema namjeni i veličini. Dijele se na 2 skupine [21]:

- Putnička plovila
- Tehnička i teretna plovila

**Tablica 3. Podjela brodova unutarnje plovidbe prema tipu broda [21]**

| Tip broda | Broj brodova |
|---|---|
| Plutajuće postrojenje | 19 |
| Remorker | 8 |
| Putnički brod | 8 |
| Teretni brod | 3 |
| Nepoznato | 24 |

### *3.1.1 Plutajuća postrojenja (jaružala)*

Najviše brodova unutarnje plovidbe su plutajuća postrojenja. To su radni brodovi čiji je primarni zadatak uređenje korita rijeke, a mogu biti korišteni i za druge namjene.

### *3.1.2 Remorkeri (tegljači i gurači)*

Remorkeri su brodovi čiji je zadatak gurati i/ili tegliti plovne objekte, bilo teglenice ili druge brodove. Remorkeri se ponekad dijele na gurače i tegljače ovisno o načinu korištenja tijekom eksploatacije.

### *3.1.3 Teretni brodovi*

Teretni brodovi služe za prijevoz tereta, Slika 12.



**Slika 12. Motorni tanker Cibalia**

### *3.1.4 Putnički brodovi*

Putnički brodovi služe za prijevoz putnika. Većina ih plovi nacionalnim parkom Krka, Slika 13, dok se ostali koriste u različite turističke svrhe i plovidbu u pojedinim lučkim kapetanijama.




**Slika 13. Putnički brodovi Miljevci i Miljačka iz NP Krka [22]**

### *3.1.5 Tehnička (radna) plovila*

Tehnička (radna) plovila imaju primarni zadatak obaviti određenu komercijalnu djelatnost vezanu za manipulaciju nekim teretom, Slika 14.




**Slika 14. Plutajuće postrojenje Bosut**

### *3.2 Analiza izvedbi brodskih energetskih sustava*

Većina brodova za pogon koristi brzokretne četverotaktne dizelske motore spojene preko reduktora na propulzor. Prednost takve izvedbe je mala masa, relativno niska cijena i dobra korisnost (mala specifična potrošnja goriva) u projektnim uvjetima. Izražen nedostatak im je povećana specifična potrošnja goriva pri malim opterećenjima, te pri naglim promjenama opterećenja. To je posebice izraženo kod putničkih brodova koji imaju veliku zalihost snage, a većinu vremena provode na vezu i u manevriranju [21]. Što se tiče inovativnih energetski učinkovitih tehnologija, 14 brodova primjenjuju elektro-poriv, Tablica 4. Svi se brodovi s električnom propulzijom koriste u turističke svrhe. Osim broda „Vukovar Waterbus Bajadera“ svi se električni brodovi nalaze u nacionalnim parkovima.

**Tablica 4. Popis brodova električnim porivom [21]**

| | Vrsta | Duljina, m | Širina, m | Vlasnik | Sjedište | Kapetanija |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Buk | PB | 9,7 | 4,08 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Danguba | PB | 15 | 5,65 | PP Vranjsko Jezero | Biograd na moru | SISAK |
| Kozjak | PB | 12,56 | 5,57 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Labud | PB | 15,01 | 5,02 | PP Kopački Rit | Bilje | OSIJEK |
| Lija | PB | 12,35 | 5,4 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Medo | PB | 12,35 | 5,4 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Miljevci | PB | 14 | 4,71 | NP Krka | Šibenik | SISAK |
| Sedra | PB | 12,56 | 5,57 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Slap | PB | 9,7 | 4,08 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Srna | PB | 15 | 5,85 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Vidra | PB | 14,97 | 4,5 | PP Kopački Rit | Bilje | OSIJEK |
| Vidra II | PB | 12,56 | 5,56 | NP Plitvička jezera | Plitvička jezera | SISAK |
| Visovac | PB | 14 | 4,71 | NP Krka | Šibenik | SISAK |
| Vukovar Waterbus Bajadera | PB | 15,06 | 5,81 | Panonsko More d.o.o | Vukovar | VUKOVAR |

Poznate su snage porivnih strojeva samo 3 broda:

- Buk i Lija koji imaju 2 elektromotora nominalne snage 570 kW
- Danguba koji ima 2 elektromotora nominalne snage 30 kW.

Trenutni brodovi s električnim porivom imaju raspon duljina od 9,7 m do 15,06 m.

# 4. METODOLOGIJA

Prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju [23], cjeloživotna analiza (eng. Life-Cycle Assessment, LCA) se definira kao tehnika za procjenjivanje ekološkog utjecaja proizvoda tijekom njegovog životnog ciklusa (tj. „od kolijevke do groba“), što obuhvaća 5 faza:

- Eksploataciju sirovine,
- Proizvodnju ili izradu proizvoda,
- Upotrebu proizvoda,
- Tretiranje proizvoda na kraju životnog vijeka,
- Recikliranje i konačno uklanjanje.

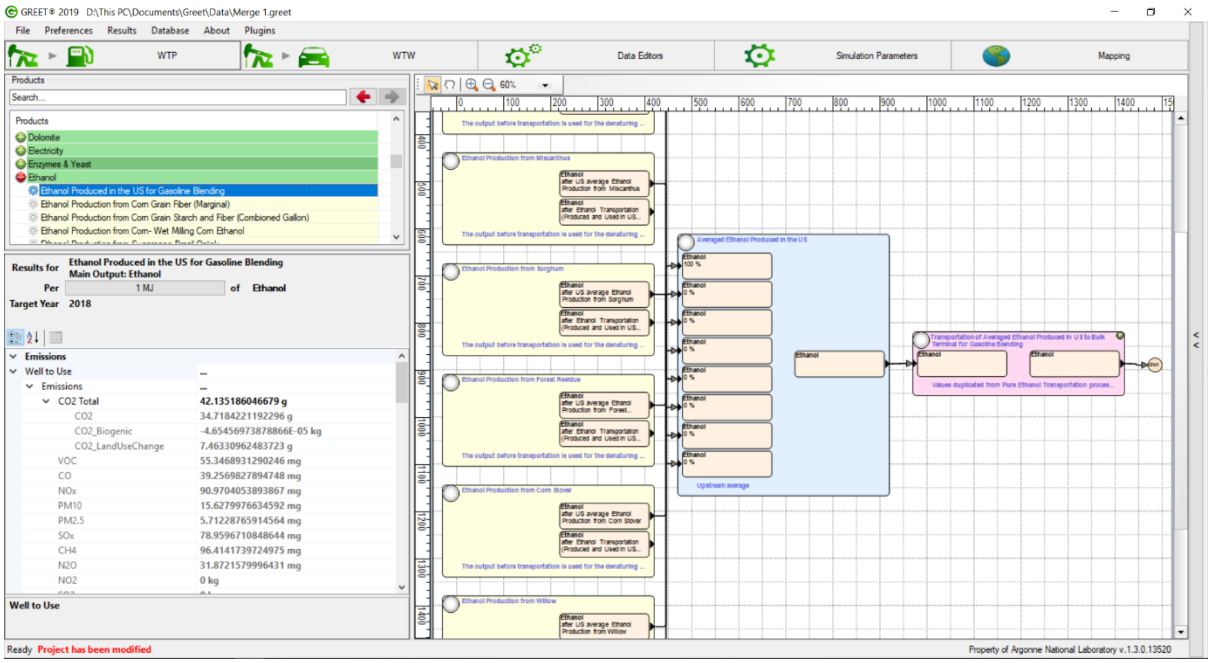
Kako bi vidjeli utjecaj broda na okoliš, potrebno je napraviti LCA usporedbu između konvencionalnog goriva upotrijebljenog na brodu Trošenj i mogućih alternativnih izvora energije. U tu svrhu se u ovom radu koristi programski paket GREET koji uključuje baze podataka postojećih ciklusa proizvodnje goriva (eng. *fuel production pathways*) od raznih izvora energija.

GREET se može koristiti za analizu eksploatacije, obrade i prijevoza konvencionalnih goriva kao i alternativnih goriva prilagođavanjem postojećih gorivnih ciklusa.

Da bi se moglo pristupiti proračunu u GREET-u potrebno je definirati sljedeće pojmove:

- Ciklus goriva: niz procesa koji sadrži životni ciklus goriva. To ovisi o resursima, tehnologijama i procesima upotrijebljenim radi njegove proizvodnje.
- Proces: razlikujemo stacionarne i transportne procese. Proces je faza u ciklusu koja često troši energiju.
- Resurs: materijal ili ulazna energija (ili izlazna)
- Tehnologija: uređaj s definiranim energijskim i emisijskim svojstvima
- Kombinirani ciklus: kombinacija više proizvodnih ciklusa u raznim proporcijama

Slika 15 prikazuje primjer procesa u korisničkom sučelju programskog paketa GREET.




**Slika 15. Korisničko sučelje programskog paketa GREET 2019**

Proračun u GREET-u podijeljen je u dvije osnovne faze:

- WTP (Well-to-Pump) - faza uzima u obzir emisije nastale tijekom životnog ciklusa goriva od eksploatacije sirovina za proizvodnju goriva, prijevoza sirovina, prerade sirovina u konačni željeni oblik goriva, te prijevoza dobivenog goriva do crpke za konačnu uporabu.

- WTW (Well-to-Wheel) – faza uzima u obzir emisije ispuštene tijekom cijelog životnog ciklusa goriva, od eksploatacije do sagorijevanja u motoru tijekom kojih se ispuštaju ispušni plinovi i ta se faza označava kao PTW (Pump-to-Wheel). WTW faza se sastoji od WTP i PTW.

# 5. ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA PUTNIČKOG BRODA TROŠENJ

## *5.1 Tehnički opis analiziranog broda*

Primjer putničkog broda koji se u ovom radu analizira je brod Trošenj iz nacionalnog parka Krka, Slika 16. Brod obično plovi između Skradina i Skradinskog Buka. Radi jednostavnosti, brzina rijeke se ne uzima u obzir pošto je ona vrlo mala na ovom putu od 5 km, što znači da su uzvodne i nizvodne brzine jednake. Put u jednom smjeru traje 20 minuta s prosječnom brzinom od 15 km/h [24]. Na godišnjoj razini, brod izvrši 2190 povratnih putovanja, ovisno o vremenskim prilikama. Tablica 5 prikazuje osnovne tehničke podatke o brodu.

Pretpostavlja se da brod plovi s 70% maksimalne trajne snage i da je životni vijek broda 20 godina.

**Tablica 5. Tehnički podaci o brodu [21]**

| **Putnički brod Trošenj** | |
|---|---|
| Dužina (m) | 13,2 |
| Širina (m) | 4,12 |
| Istisnina (t) | 15,72 |
| Maksimalna trajna snaga glavnog porivnog stroja (kW) | 236 |
| Maksimalna trajna snaga pomoćnih strojeva (kW) | - |
| Sveukupna instalirana snaga (kW) | 236 |




**Slika 16. Putnički brod Trošenj u nacionalnom parku Krka [24]**

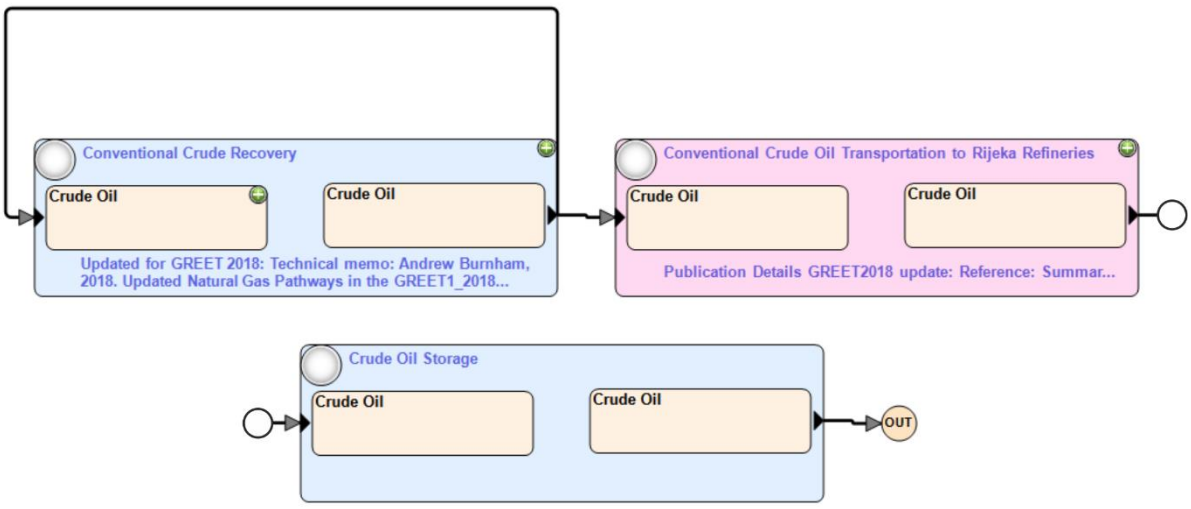
Brodovi unutar nacionalnog parka Krka plove na utvrđenim rutama u vremenskim intervalima koji ovise o broju posjetitelja. Budući da je broj posjetitelja nacionalnog parka veći tijekom ljeta, u tom su razdoblju godine i više korišteni.

## *5.2 Simulacija WTP faze dizelskog goriva*

WTP faza goriva dizelskog motora se sastoji od dobivanja nafte, njenog prijevoza do rafinerije, pretvorbe u dizelsko gorivo i konačnog prijevoza do pumpne stanice.

### *5.2.1 Model proizvodnje i prijevoza sirove nafte*

Sirova nafta je sirovina koja je potrebna za proizvodnju dizelskog goriva. Slika 17 prikazuje simulaciju proizvodnje sirove nafte u GREET-u.




**Slika 17. Model proizvodnje sirove nafte u GREET-u**

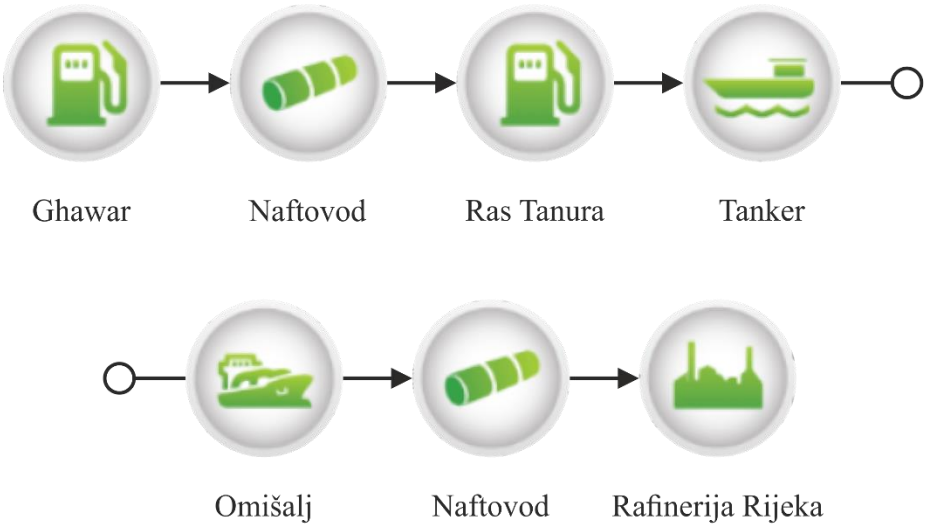
### *5.2.2 Proces prijevoza sirove nafte iz Saudijske Arabije do Rijeke*

Za ovu se analizu pretpostavlja da se sirova nafta uvozi iz Saudijske Arabije i prevozi tankerima u Hrvatsku. Sirova nafta se mora prvo iscrpjeti iz ležišta u Ghawar-u i naftovodom prevoziti do terminala u Ras Tanuri [25]. Tankerom se prevozi do Omišlja gdje se ponovno naftovodom šalje u rafineriju da bi se proizvelo dizelsko gorivo. Tablica 6 prikazuje glavne podatke o prijevozu sirove nafte do NP Krka.

**Tablica 6. Podaci o prijevozu sirove nafte iz Saudijske Arabije do NP Krka**

| | Prijevoz | Opis | Udaljenost |
|---|---|---|---|
| 1 | Naftovod | Polaz: Ghawar<br>Dest: Ras Tanura | 230 km [26] |
| 2 | Tanker | Polaz: Ras Tanura, SARTA<br>Dest: Omišalj, HROMI | 8235 km [27] |
| 3 | Naftovod | Polaz: Omišalj<br>Dest: Rafinerija Rijeka | 7 km [28] |

Cijeli prijevoz sirove nafte simuliran je u programskom paketu GREET 2019, Slika 18.

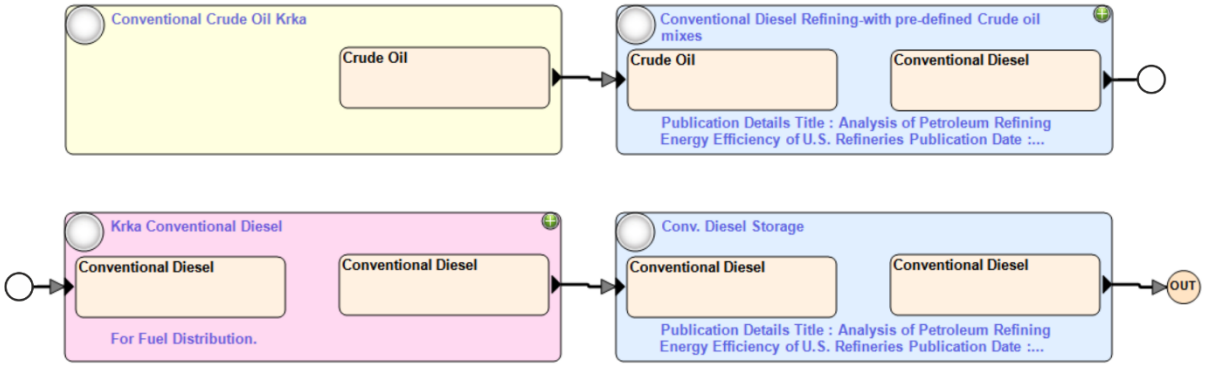



**Slika 18. Proces prijevoza sirove nafte iz Saudijske Arabije u Rafineriju Rijeka**

### *5.2.3 Model proizvodnje i prijevoza dizelskog goriva*

Dobivena sirova nafta se rafinira u stacionarnom procesu u rafineriji. Rafinerije nafte su velika procesna industrijska postrojenja u kojima se iz sirove nafte različitim procesima izdvajaju naftni derivati (kao što su npr. tekući plin, dizelsko gorivo, benzin, mlazno gorivo, motorna ulja...) potrebni krajnjim korisnicima [26]. Dizelsko gorivo se dobiva rafiniranjem sirove nafte nakon čega se prevozi krajnjem potrošaču, Slika 19.

Dizelsko gorivo koje se koristi u Hrvatskoj floti brodova unutarnje plovidbe kao pogonsko gorivo odgovara konvencionalnom dizelu iz baze podataka GREET 2019, pa se time parametri procesa dobivaju iz zadanih postupaka rafiniranja konvencionalnog dizela iz baze GREET 2019. („Conventional Diesel Refining“).



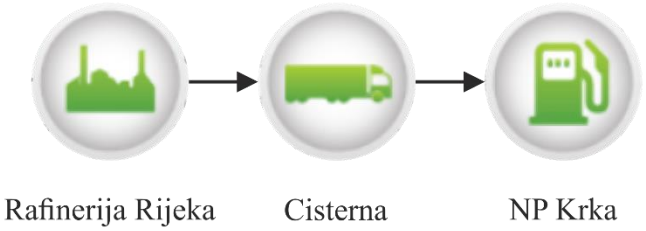

**Slika 19. Model proizvodnje dizelskog goriva u GREET-u**

### *5.2.4 Proces prijevoza dizelskog goriva iz rafinerije do NP Krka*

Nakon proizvodnje, dizelsko gorivo se distribuira cisternama na udaljenosti od 276 km do pumpne stanice u NP Krka, Slika 20. Tablica 7 prikazuje detaljne informacije o putu.

**Tablica 7. Podaci o prijevozu dizelskog goriva iz Rijeke do NP Krka**

| | Prijevoz | Opis | Udaljenost |
|---|---|---|---|
| 1 | Cisterna | Polaz: Rijeka<br>Dest: NP Krka | 276 km [28] |




**Slika 20. Proces prijevoza dizelskog goriva iz Rijeke do NP Krka**

### *5.2.5 Rezultati WTP faze dizelskog goriva*

Tablica 8 prikazuje rezultate emisija pojedinačnih stakleničkih plinova u WTP fazi.

**Tablica 8. Količina stakleničkih plinova u WTP fazi dizelskog goriva**

| | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|
| $CO_2$ | 1,169 kg $CO_2$/km |
| $CH_4$ | 10,5 g $CH_4$/km |
| $N_2O$ | 0,0190 g $N_20$/km |

Međutim, kako pojedini plinovi podjednako ne doprinose globalnom zagrijavanju, uveden je pojam Potencijala globalnog zagrijavanja (eng. Global Warming Potential, GWP), Tablica 2. To je mjera koja pokazuje koliko će energije apsorbirati 1 tona ispuštenog stakleničkog plina tijekom određenog vremena, najčešće tijekom 100 godina, u usporedbi s 1 tonom $CO_2$ [19] . Što je veći GWP, to plin više doprinosi globalnom zagrijavanju. Množenjem dobivenih rezultata, Tablica 8, s GWP-om za pojedini staklenički plin dobiven je iznos ugljičnog otiska koji se izražava u jedinici $CO_2$ ekvivalenta ($CO_2$-eq) što omogućuje procjenu utjecaja različitih stakleničkih plinova na globalno zagrijavanje. Tablica 9 prikazuje GWP-e za navedene stakleničke plinove te ukupni ugljični otisak WTP faze.

**Tablica 9. Ugljični otisak WTP faze (kg $CO_2$-eq/km)**

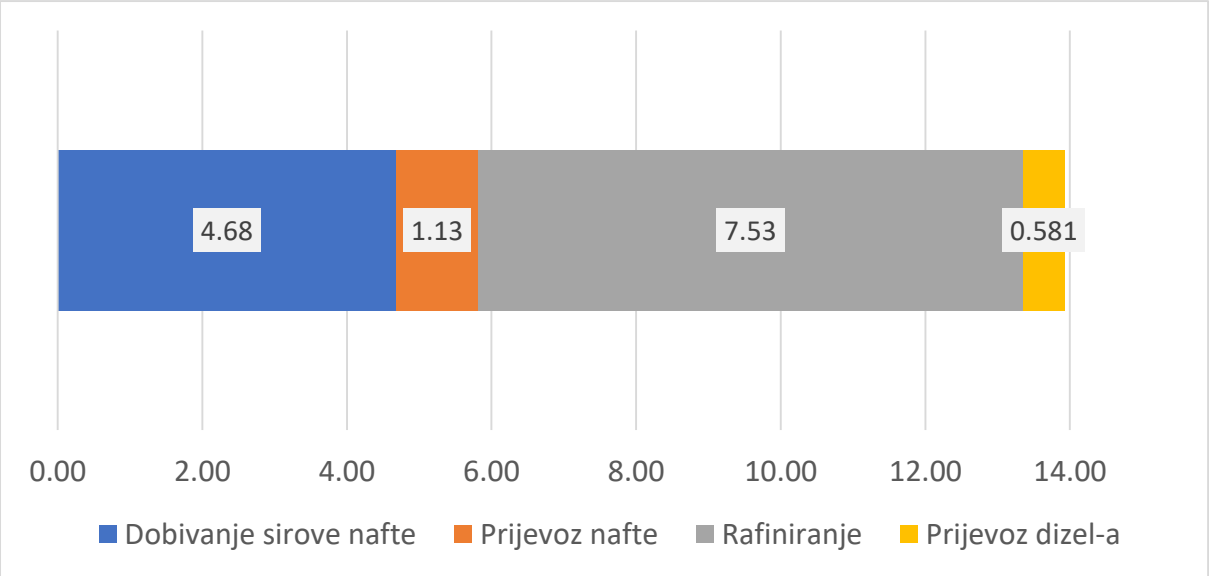
| | GWP | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|---|
| $CO_2$ | 1 | 1,169 |
| $CH_4$ | 25 | 0,263 |
| $N_2O$ | 298 | 0,0057 |
| Ugljični otisak | | 1,44 |

### *5.2.6 Usporedba emisija procesa WTP faze*

Preko programskog alata GREET se mogu analizirati emisije pojedinačnog procesa u svakoj fazi WTP-a. To nam daje detaljni uvid o najznačajnijim procesima glede emisija stakleničkih plinova. Ovdje se vidi da transportni procesi zapravo imaju najmanje $CO_{2\text{-eq}}$ emisije u WTP fazi, Slika 21. Tablica 10 prikazuje rezultate pojedinih WTP faza.

**Tablica 10. Količina stakleničkih plinova po procesima WTP faze (g $CO_2$-eq/MJ)**

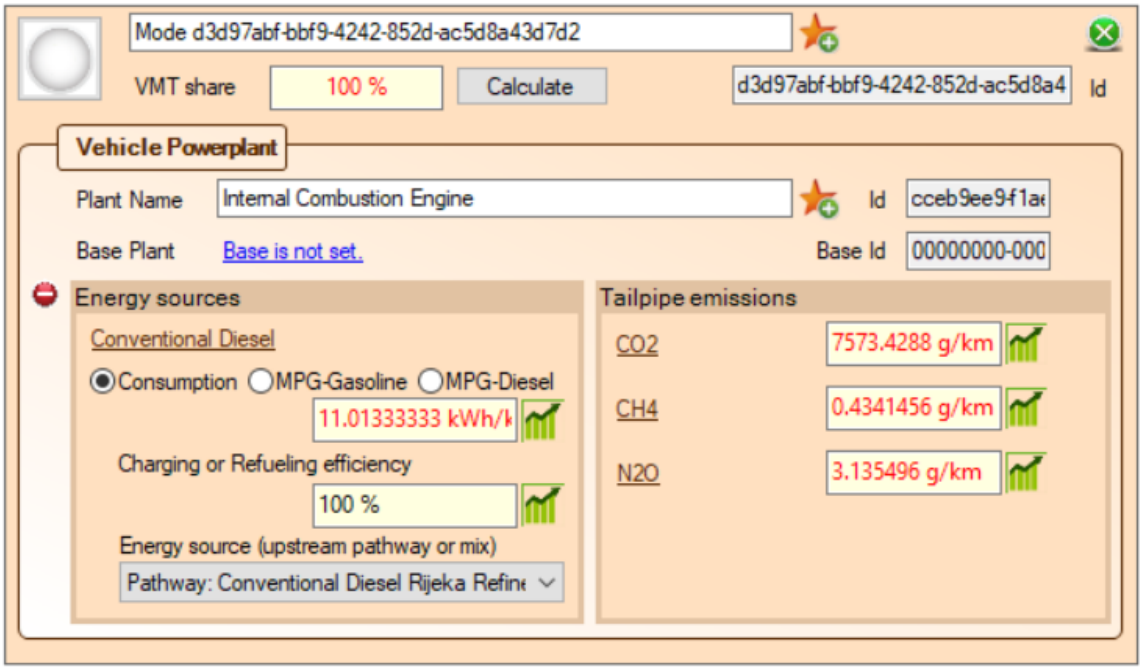
| | Dobivanje sirove nafte | | Prijevoz nafte | | Rafiniranje | | Prijevoz dizelskog goriva | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 2,62 | g | 1,09 | g | 7,06 | g | 0,560 | g |
| $CH_4$ | 2054,75 | mg | 35,25 | mg | 433,83 | mg | 20,243 | mg |
| $N_2O$ | 9,27376 | mg | 6,96426 | mg | 37,94 | mg | 0,638 | mg |
| Ukupno | 4,684 | g | 1,132 | g | 7,53 | g | 0,581 | g |




**Slika 21. Prikaz emisija procesa WTP faze**

### *5.3 Simulacija PTW faze dizelskog goriva*

Ugljični otisak PTW faze odnosi se na izgaranje goriva u brodskom motoru. To je brzohodni četverotaktni dizelski motor s maksimalnom trajnom snagom (eng. Maximum Continuous Rating, MCR) od 236 kW. Međutim, za proračun je korištena trajna eksploatacijska snaga (eng. Continuous Service Rating, CSR) koja je pretpostavljena da iznosi 70 % MCR-a, tj. 165,2 kW. Specifična potrošnja goriva (eng. Specific Fuel Oil Consumption, SFOC) iznosi 219 g/kWh [27]. Množenjem potrošnje energije po km sa specifičnom potrošnjom goriva dobivamo potrošnju goriva koja iznosi 2,412 kg/km. Slika 22 prikazuje unos podataka radi simulacije u GREET-u za PTW fazu.




**Slika 22. Proračun ugljičnog otiska PTW faze u programskom paketu GREET 2019**

#### *5.3.1 Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi*

Kako bi se dobile količine ispušnih plinova nastalih izgaranjem goriva korišteni su emisijski faktori za pojedine plinove. Tablica 11 prikazuje emisijske faktore zajedno s dobivenim rezultatima proračuna PTW faze [28].

**Tablica 11. Količina stakleničkih plinova u PTW fazi**

| | Emisijski faktori (g emisija/kg goriva) | Emisije stakleničkih plinova (g/km) |
|---|---|---|
| $CO_2$ | 3140 | 7573,4 |
| $CH_4$ | 0,18 | 0,434 |
| $N_2O$ | 1,3 | 3,14 |

Množenjem dobivenih rezultata s GWP-om za pojedine plinove dobivamo ukupni ugljični otisak u PTW fazi, Tablica 12.

**Tablica 12. Ugljični otisak PTW faze (kg $CO_2$-eq/km)**

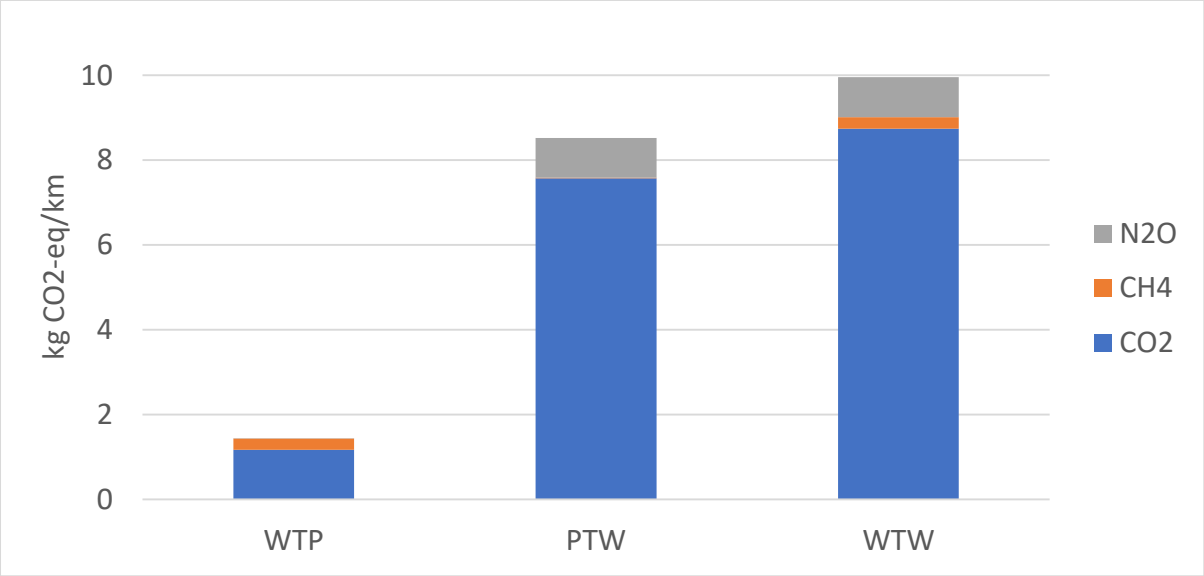
| | GWP | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|---|
| $CO_2$ | 1 | 7,57 |
| $CH_4$ | 25 | 0,011 |
| $N_2O$ | 298 | 0,934 |
| Ugljični otisak | | 8,52 |

### *5.4 Rezultati WTW faze dizelskog goriva*

Tablica 13 prikazuje ugljični otisak WTW faze koji se dobiva zbrajanjem ugljičnih otisaka WTP i PTW faze. To predstavlja ukupni ugljični otisak broda Trošenj. Slika 23 prikazuje usporedbu pojedinih faza.

**Tablica 13. Ugljični otisak WTW faze dizelskog goriva (kg $CO_2$-eq/km)**

| | WTP | PTW | WTW |
|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 1,169 | 7,57 | 8,742 |
| $CH_4$ | 0,263 | 0,011 | 0,273 |
| $N_2O$ | 0,0057 | 0,934 | 0,940 |
| Ukupno | 1,44 | 8,52 | 9,96 |

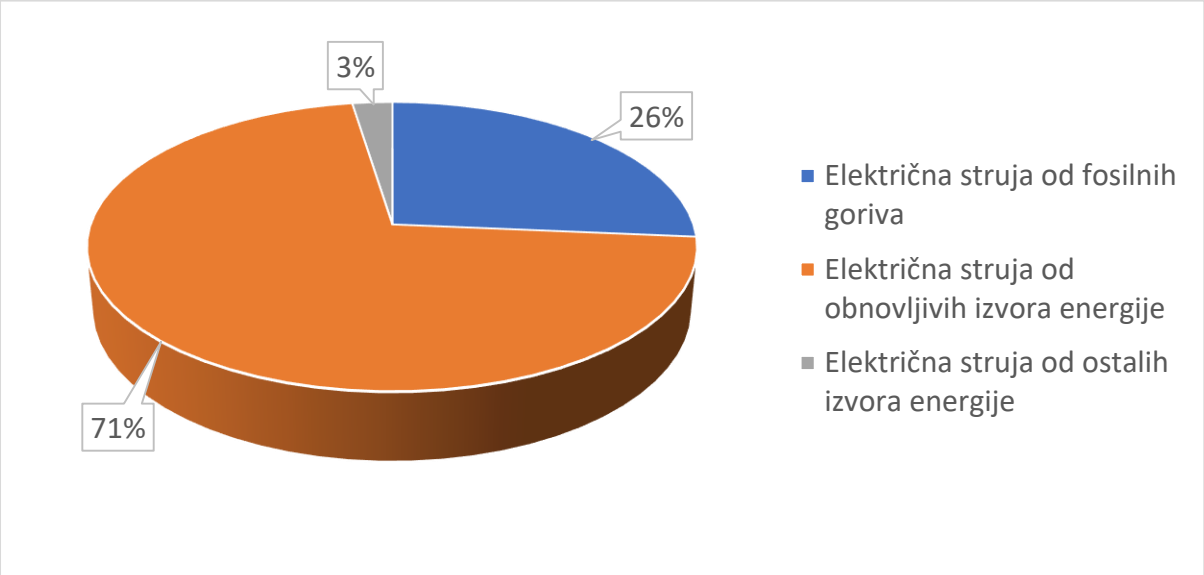



**Slika 23. Usporedba doprinosa ugljičnog otiska pojedinačnih faza**

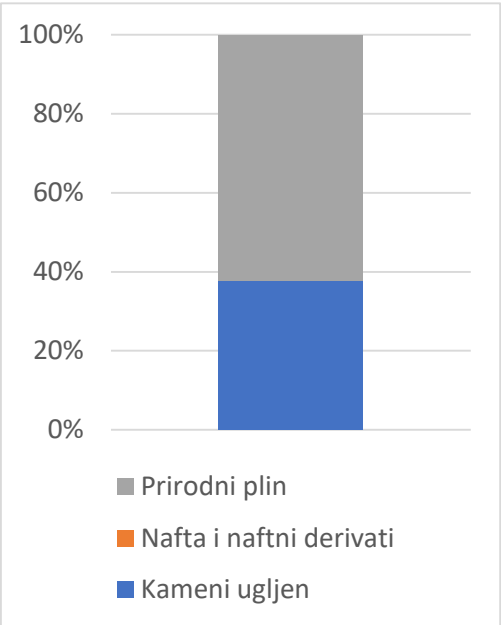
# 6. ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA PRI PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Promatramo slučaj gdje bi brod Trošenj bio pogonjen električnom energijom. Proizvodnja električne energije je proces pretvaranja energije iz drugih primarnih izvora u električni oblik. Slika 24 prikazuje glavne vrste primarnih izvora energije i tako strukturu električne energije proizvedene na teritoriju Republike Hrvatske u 2018. god. [29].

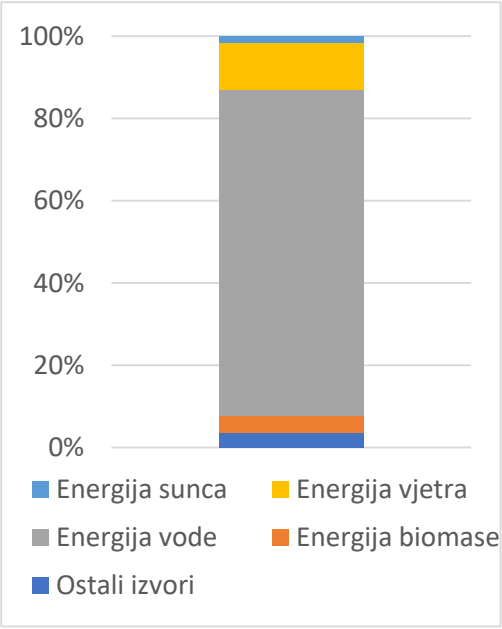
## *6.1 Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj*




**Slika 24. Udio pojedinih izvora energije za proizvodnju električne energije u 2018. god.**




**Slika 25. Podjela fosilnih goriva**




**Slika 26. Podjela obnovljivih izvora energije**

Slika 25 i Slika 26 prikazuju detaljniju podjelu pojedinih izvora energije za fosilna goriva i obnovljive izvore.

### *6.2 Simulacija WTP faze električne energije*

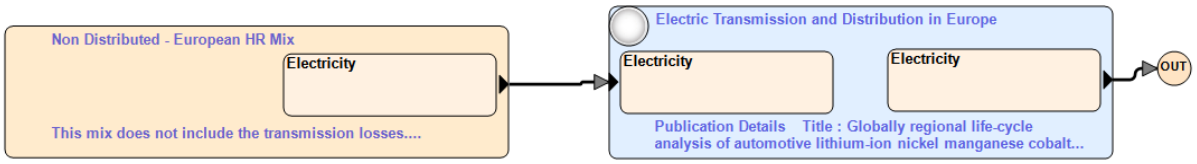
Podaci vezano uz proizvodnju električne energije se uzimaju iz baze GREET-a za model „Non-distributed European Mix“. Taj se model prilagođava hrvatskim podacima pojedinih izvora energije. Tablica 14 prikazuje konačne omjere izvora energije za proizvodnju električne energije.

**Tablica 14. Udjeli pojedinih izvora električne energije za Hrvatski Mix**

| Izvor | Udio pojedinog izvora (%) |
|---|---|
| Kameni ugljen | 9,93 |
| Nafta i naftni derivati | 0,03 |
| Prirodni plin | 16,40 |
| Energija biomase | 2,98 |
| Energija vode | 56,27 |
| Energija vjetra | 8,23 |
| Energija sunca | 1,08 |
| Ostali izvori | 2,63 |

#### *6.2.1 Model proizvodnje električne energije*

Proizvodnja električne energije se izvršava prema podjeli izvora energije „HR Mix“, Tablica 14. Nakon proizvodnje, ona se prenosi i distribuira prema europskom modelu u GREET-u, Slika 27.




**Slika 27. Model proizvodnje električne energije u GREET-u**

#### *6.2.2 Rezultati WTP faze električne energije*

Tablica 15 prikazuje rezultate emisija pojedinačnih stakleničkih plinova u WTP fazi.

**Tablica 15. Količina stakleničkih plinova u WTP fazi električne energije**

| | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|
| $CO_2$ | 3301,5 g $CO_2$/km |
| $CH_4$ | 6,31 g $CH_4$/km |
| $N_2O$ | 0,063 g $N_20$/km |

Množenjem dobivenih rezultata, Tablica 15, s GWP-om za pojedini staklenički plin dobiven je iznos ugljičnog otiska, Tablica 16, koji se izražava u jedinici $CO_2$ ekvivalenta ($CO_2$-eq) što omogućuje procjenu utjecaja različitih stakleničkih plinova na globalno zagrijavanje.

**Tablica 16. Ugljični otisak WTP faze električne energije (kg $CO_2$-eq/km)**

| | GWP | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|---|
| $CO_2$ | 1 | 3,301 |
| $CH_4$ | 25 | 0,158 |
| $N_2O$ | 298 | 0,0189 |
| Ugljični otisak | | 3,48 |

### *6.2.3 Ugljični otisak zbog Litij-ionskih baterija*

Kod elektro-poriva, PTW faza nema nikakvih emisija tijekom pretvaranja energije iz kemijskog oblika u mehanički. Ali, zbog velike težine baterija, moramo uzeti ugljični otisak proizvodnje same baterije.

Unatoč visokoj cijeni odabrane su Litij-ionske (eng. *Li-ion*) baterije jer imaju najveću gustoću energije [30]. Promatrani brod plovi 5 km u jednom smjeru tijekom svakog izleta. Pretpostavlja se da će se brod puniti samo 2 puta dnevno. Prema podacima o brodu Trošenj [24] određeno je da kapacitet baterije mora pokrivati energijske potrebe za 6 povratnih putovanja od 10 km. Ako se uzima u obzir prosječna gustoća Litij-ionske baterije od 0,254 kWh/kg, potreban kapacitet baterije za brod koji plovi trajnom eksploatacijskom snagom od 165,2 kW i potrošnjom energije od 11,01 kWh/km iznosi 878,9 kWh. Najmanji kapacitet baterije se uvećava za faktor sigurnosti 1,33 tako da se dobije proračunska težina baterije od 3460 kg. Emisije vezane uz proizvodnju baterije se izračunavaju u GREET-u, Tablica 17. Bitno je uzeti u obzir promjene baterije tijekom životnog ciklusa. Kako baterija može trajati 10 godina i životni vijek broda oko 20 godina, razmatrat će se ugljični otisak zbog promjene baterija jednom u ciklusu. Tablica 18 daje rezultate sveukupnog ugljičnog otiska zbog proizvodnje baterija.

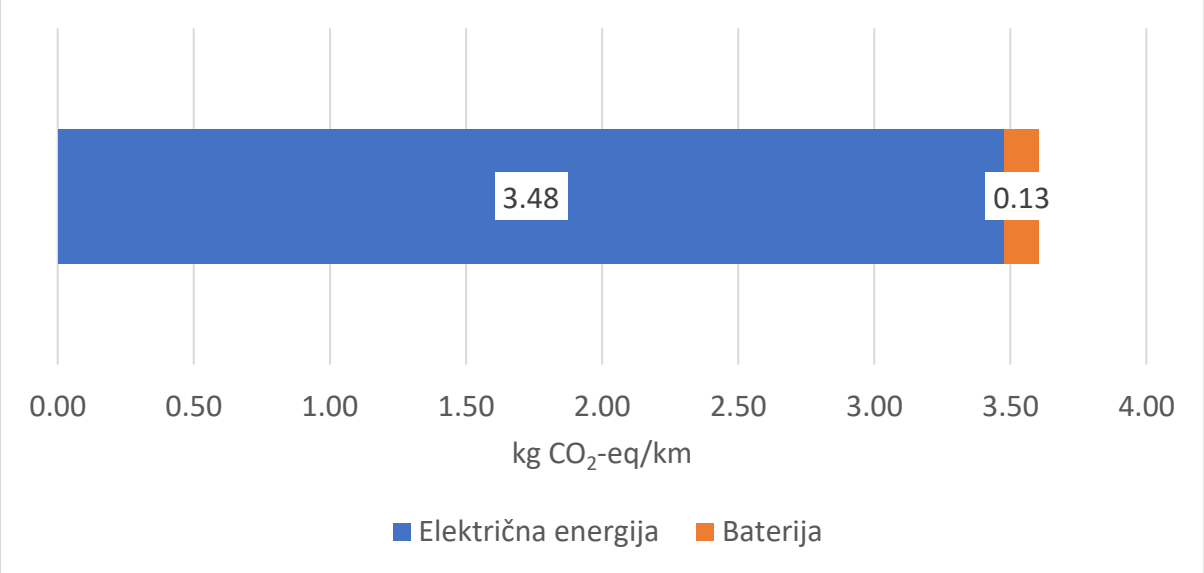
**Tablica 17. Količina stakleničkih plinova zbog proizvodnje Litijskih baterija**

| | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|
| $CO_2$ | 121,1 g $CO_2$/km |
| $CH_4$ | 0,268 g $CH_4$/km |
| $N_2O$ | 0,0023 g $N_20$/km |

**Tablica 18. Ugljični otisak zbog proizvodnje Litijskih baterija (kg $CO_2$-eq/km)**

| | GWP | Emisije stakleničkih plinova |
|---|---|---|
| $CO_2$ | 1 | 0,1211 |
| $CH_4$ | 25 | 0,00671 |
| $N_2O$ | 298 | 0,000686 |
| Ugljični otisak | | 0,129 |

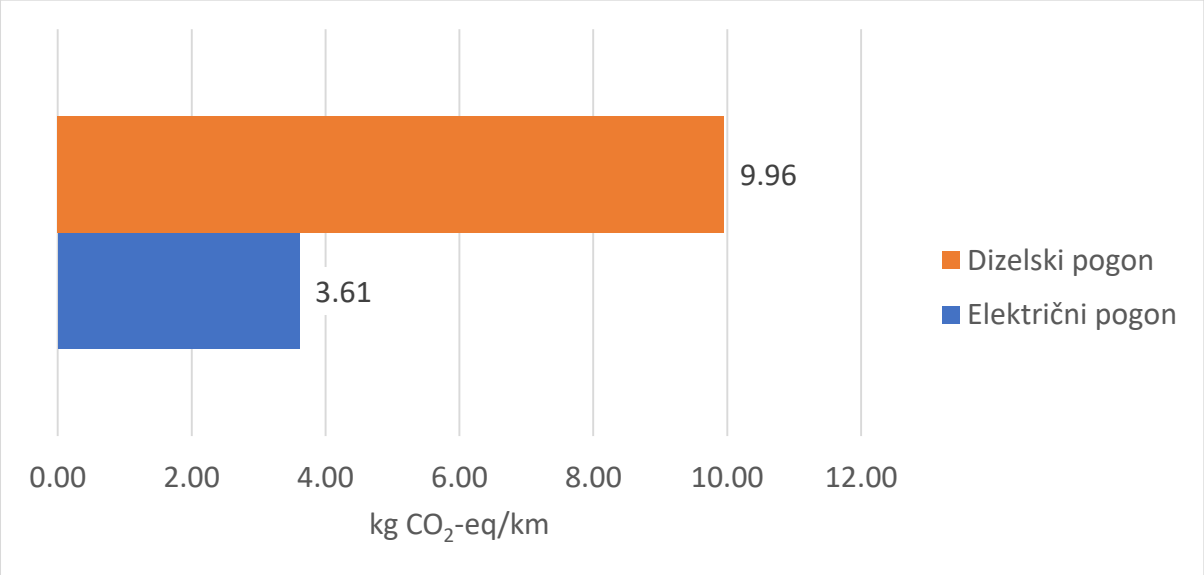
WTP emisije stakleničkih plinova iz proizvodnje električne struje iznose 3,48 kg $CO_2$-eq/km. Ugljični otisak tijekom proizvodnje baterija iznosi 0,129 kg $CO_2$-eq/km. WTW emisije koje su zbroj WTP i baterijskih emisija, Slika 28. Sveukupne emisije elektro-poriva za brod Trošenj iznose 3,61 kg $CO_2$-eq/km.




**Slika 28. WTW emisije stakleničkih plinova električnog broda**

# 7. USPOREDBA EMISIJA ELEKTRIČNOG I DIZELSKOG POGONA

Slika 29 prikazuje usporedbu LCA rezultata električnog i dizelskog poriva. Može se uočiti da pogon na dizelsko gorivo ima znatno više emisija tijekom životnog ciklusa nego električni pogon kod slučaja broda Trošenj. Tijekom životnog ciklusa, postojeći brod na dizelski poriv emitira 9,96 kg $CO_2$-eq/km dok bi prema proračunu, brod na električni pogon emitirao 3,61 kg $CO_2$-eq/km tijekom svog životnog ciklusa. Ova usporedba pokazuje da bi elektrifikacija rezultirala u brodu manjim ugljičnim otiskom. Ali, to dolazi uz visoke investicijske troškove.




**Slika 29. WTW emisije stakleničkih plinova dizelskog i električnog poriva**

# 8. ANALIZA TROŠKOVA BRODA

Analiza cjeloživotnih troškova (eng. *Life-Cycle Cost Analysis*, LCCA) se provodi za brod Trošenj u slučaju da je pogonjen dizelskim motorom i za slučaj kada je pogonjen električnom energijom. Rezultati sveukupne LCCA analize se odnose na životni vijek broda koji iznosi 20 godina. Ukupni troškovi porivnog sustava se sastoje od investicijskih troškova, eksploatacijskih troškova, troškova održavanja, troškova goriva i troškova karbonske takse.

U obzir su uzete mogućnosti uvođenja karbonske takse, pri čemu su razmatrani sljedeći modeli:

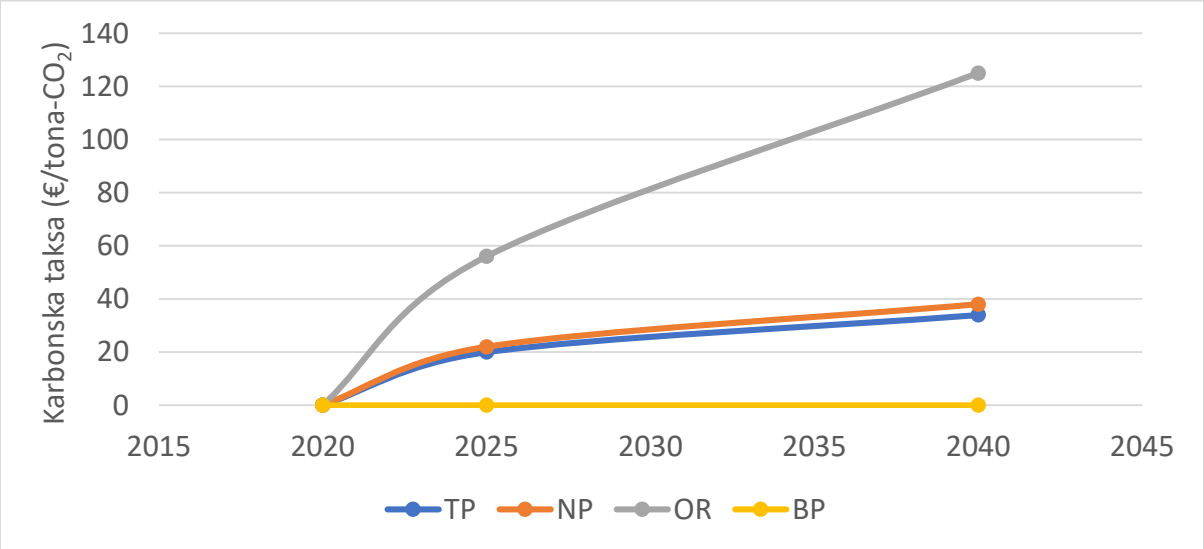
1. Model bez poreza (BP): karbonska taksa se neće primijeniti i nema troškova vezano uz emisije
2. Model trenutne politike (TP): uzimaju se trenutne vrijednosti
3. Model novih politika (NP): sastoji se novih promjena u energetskom sektoru
4. Model održivog razvoja (OR): u ovom modelu prema planovima UN-a za 2030. god. cijena $CO_2$ raste do 125 €/ton.

## *8.1 Analiza troškova dizelskog pogona*

**Tablica 19. Predviđene cijene $CO_2$ za Europsku Uniju [31]**

| Model | Cijena od 1 ton $CO_2$ (€) | |
|---|---|---|
| | 2025 | 2040 |
| Trenutne politike (TP) | 20 | 34 |
| Nove politike (NP) | 22 | 38 |
| Održivog razvoja (OR) | 56 | 125 |

Slika 30 prikazuje promjenu cijena karbonske takse za sljedećih 20 godina.

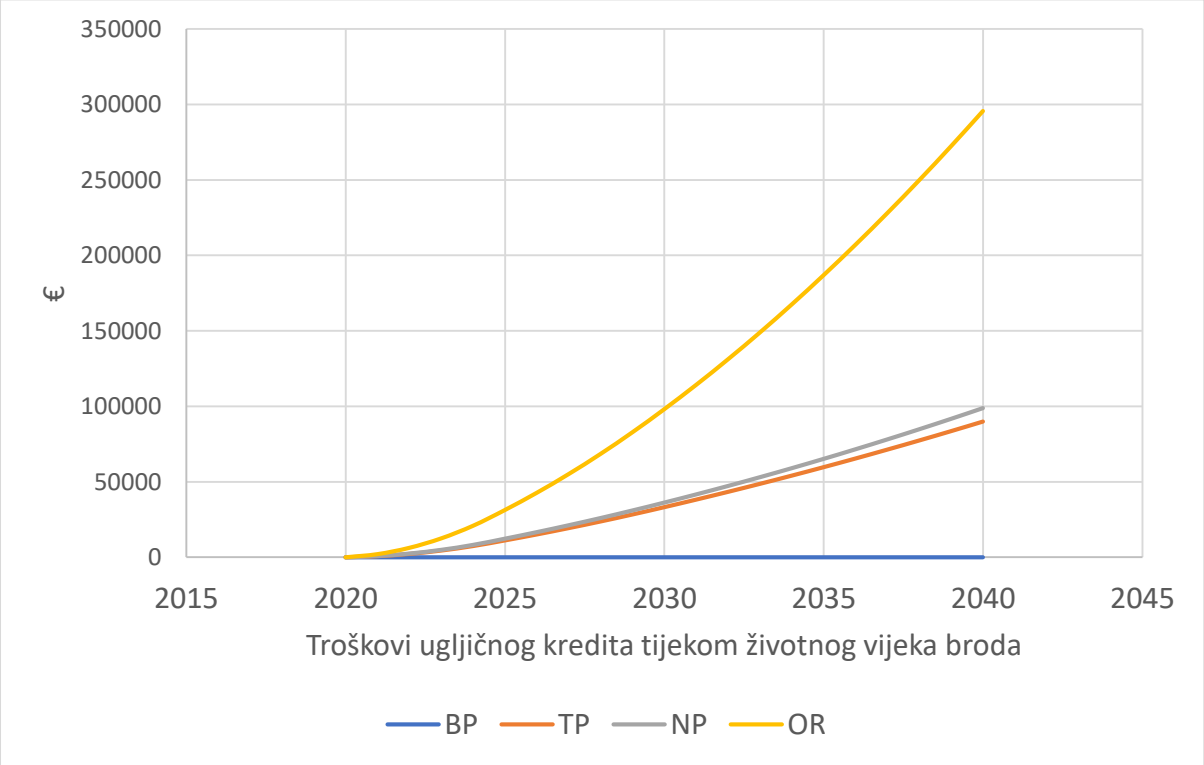



**Slika 30. Metode obračuna karbonske takse**

Dodatni troškovi se ne uzimaju u obzir pošto brod već postoji. Cijena dizelskog goriva se uzima kao 0,66 €/L [32]. Uzimajući u obzir gustoću dizelskog goriva, potrošnju goriva, duljina povratnog putovanja i broj putovanja godišnje, godišnji troškovi goriva iznose 41900 €. Godišnji troškovi održavanja za brodski dizelski motor snage 24 MW iznose 1195600 $ [31]. Pošto analizirani brod ima instaliranu snagu od 236 kW, procijenjeni godišnji troškovi održavanja iznose 11760 $, tj. 10400 €. Troškovi karbonske takse se zbrajaju ukupnim troškovima. Prema modelima obračuna plaćanja karbonskih taksa, Tablica 19, i koristeći podatak o godišnjem ugljičnom otisku u PTW fazi od 186,6 tona $CO_2$-eq, izračunavaju se troškovi karbonske takse, Tablica 20. Treba uzeti u obzir da je ovaj proračun okviran te može odstupati od realne situacije zbog interpolacija kako bi se dobile okvirne vrijednosti godišnjih cijena karbonske takse. Troškovi karbonske takse tijekom životnog ciklusa su prikazani na Slika 31.

**Tablica 20. Troškovi karbonske takse tijekom životnog ciklusa prema 4 modela**

| BP | TP | NP | OR |
|---|---|---|---|
| 0 | 89940 € | 98710 € | 295760 € |




**Slika 31. Troškovi karbonske takse tijekom životnog vijeka broda**

### *8.2 Analiza troškova električnog pogona*

Cijena struje za industrijski sektor u Hrvatskoj iznosi 78 €/MWh [32]. Prema podacima potrošnje energije broda, godišnji troškovi električne energije iznose 18810 €. Uzima se cijena baterije od 200 €/kWh [31] za ovu analizu. Dobiva se cijena baterije od 175800 € za kapacitet od 880 kWh. Pošto baterija kod brodova općenito iznosi 45% investicijskih troškova (elektromotor, regulatori, itd.) sveukupni investicijski troškovi iznose 390700 €. Baterija nema troškova održavanja ali se očekuje da će se baterija morati zamijeniti nakon životnog vijeka od 10 godina. Tablica 21 daje procjenu cijena Litij-ionske baterija do 2040. god. Uzima se cijena baterije od 169 €/kWh i dobiva se cijena zamjenske baterije od 148500 €.

**Tablica 21. Procjene cijena Litij-ionske baterija do 2040. god.**

| Godina | Cijena Litij-ionske baterije (€/kWh) |
|---|---|
| 2020 | 244 |
| 2025 | 184 |
| 2030 | 169 |
| 2035 | 129 |
| 2040 | 109 |

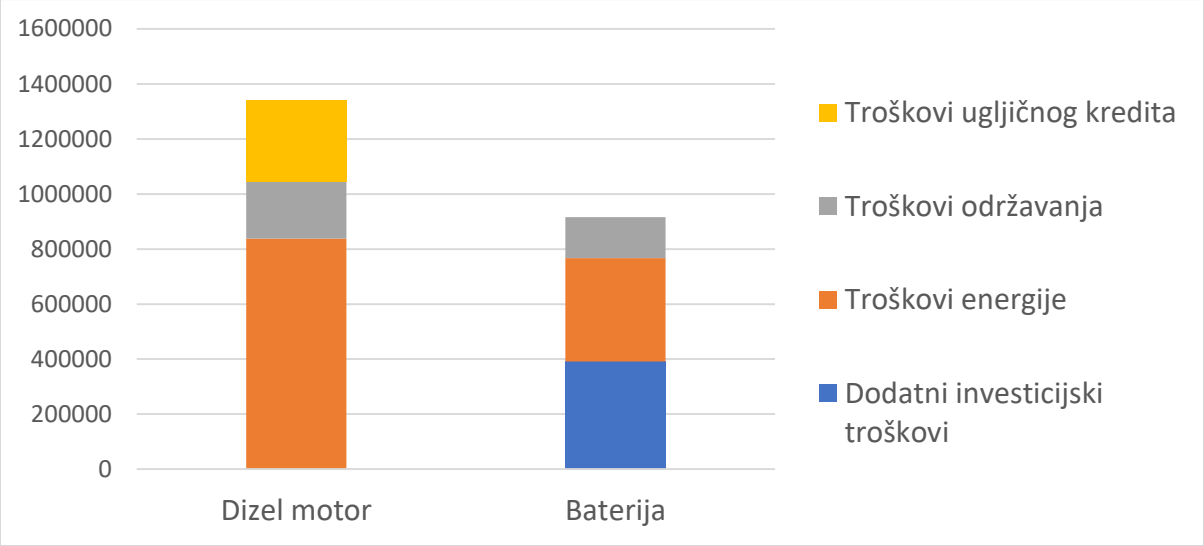
### *8.3 Usporedba LCCA analiza dizelskog i električnog pogona baterijom 880 kWh*

Tablica 22 prikazuje rezultate LCCA analize koji se odnosi na životni vijek broda od 20 godina.

**Tablica 22. Rezultati LCCA analize**

| Vrsta porivnog sustava | Dizelski motor (€) | Baterija (€) |
|---|---|---|
| Dodatni investicijski troškovi | 0 | 390700 |
| Troškovi energije | 838000 | 376200 |
| Troškovi održavanja | 208000 | 148500 |
| Ukupni troškovi (BP) | 1046000 | 915400 |
| Ukupni troškovi (OR) | 1341760 | 915400 |

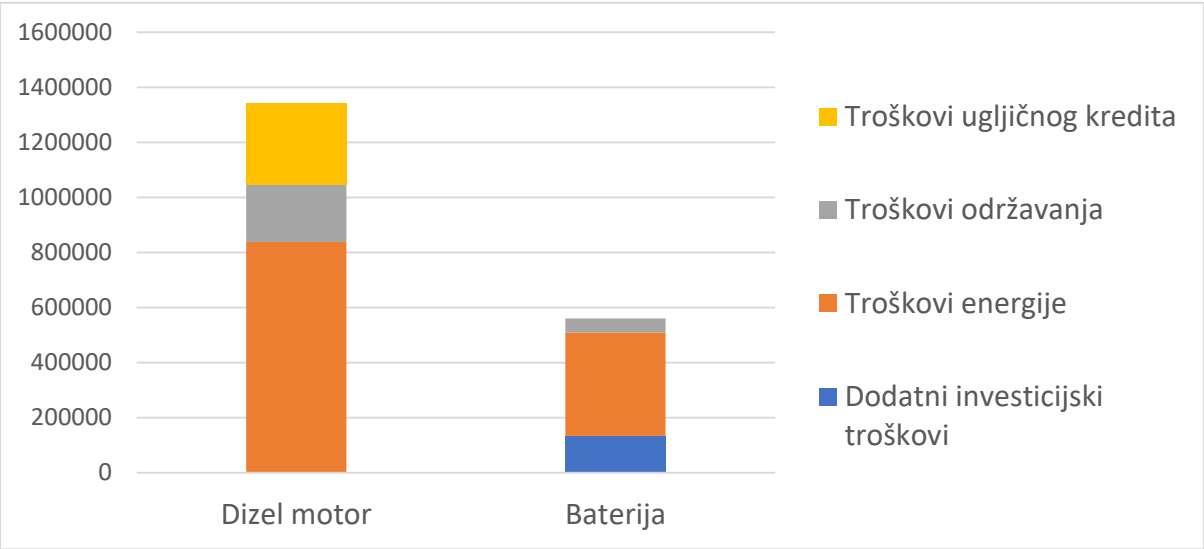
Slika 32 jasno pokazuje da su investicijski troškovi i troškovi održavanja za bateriju preveliki. Razlog je u tome što je uzeta baterija koja traje 6 kružnih putovanja. Kad se uzimaju troškovi karbonske takse u obzir onda su ukupni troškovi razmjerni. Zgodno je imati bateriju koja bi se punila samo dva put dnevno, ali s ekonomskog aspekta, trebala bi se uzeti baterija dovoljnog kapaciteta za dva kružna putovanja.




**Slika 32. LCCA usporedba za dizelski poriv i elektro-poriv baterijom od 880 kWh**

## *8.4 Proračun LCA i LCCA za električni pogon baterijom 300 kWh*

### *8.4.1 Usporedba LCCA analiza dizelskog i električnog pogona baterijom 300 kWh*



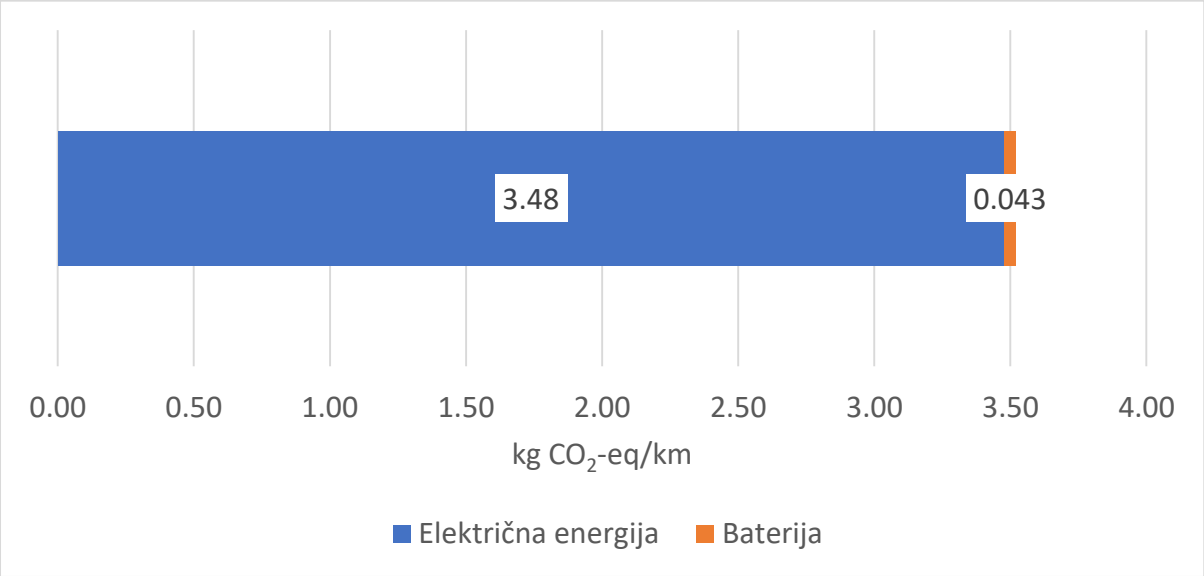

**Slika 33. LCCA usporedba za dizelski poriv i elektro-poriv baterijom od 300 kWh**

Kako bi se optimirao proračun baterija, razmatra se mogućnost smanjenja kapaciteta baterije. Prema točki 8.3 su investicijski troškovi dosta veliki, pa se zbog toga smanjuje kapacitet baterija. Umjesto da se uzima baterija od 880 kWh koja bi se punila nakon 6 kružnih putovanja i teži 3500 kg, uzima se baterija od 300 kWh koja bi se punila nakon 2 kružna putovanja i teži 1200 kg. Godišnji troškovi električne energije ostaju 18810 € ali se cijena baterije smanjuje s

175800 € na 60000 €. Pošto cijena baterije iznosi 45% ukupnih investicijskih troškova, dobijemo da su ovi troškovi 133000 €. Cijena baterije se uzima kao 169 €/kWh, Tablica 21, i dobiva se cijena zamjenske baterije od 50700 € što čini troškove održavanja. Slika 33 prikazuje usporedbu troškova između dizel motora i baterije od 330 kWh.

### *8.4.2 Ugljični otisak zbog Litij-ionskih baterija 300 kWh*

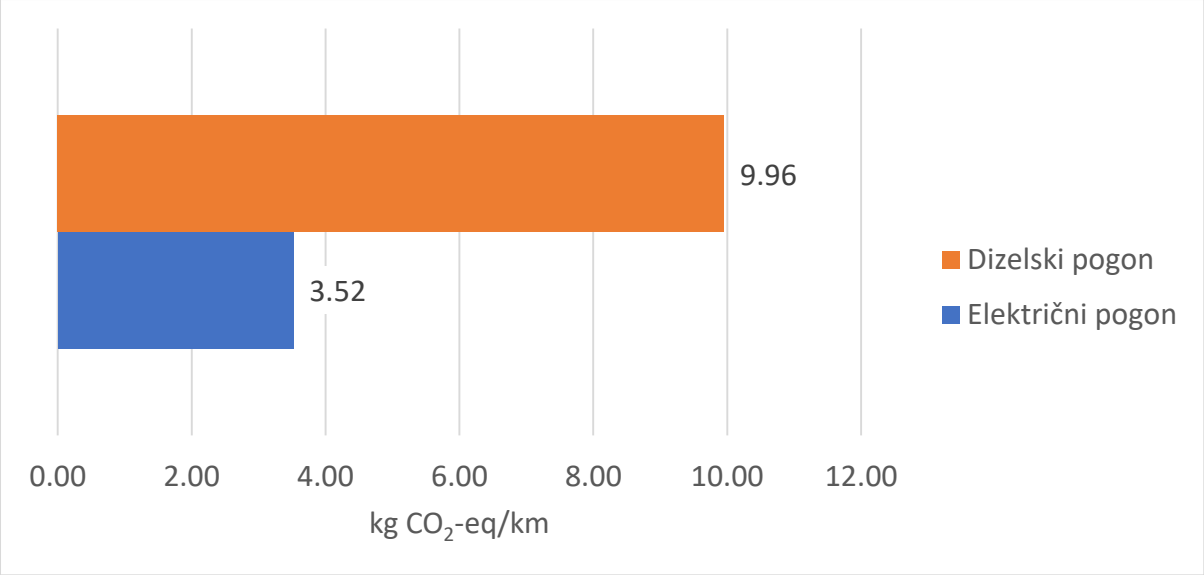
Proračun WTW emisija se ponavlja za manji kapacitet baterije od 300 kWh. Kao što je očekivano, emisije zbog manje baterije su manje, Slika 34. Baterija kapaciteta 880 kWh ima ugljični otisak od 0,13 kg $CO_2$-eq/km dok baterija kapaciteta 300 kWh ima ugljični otisak od 0,043 kg $CO_2$-eq/km. WTP emisije stakleničkih plinova iz proizvodnje električne struje iznose dalje 3,48 kg $CO_2$-eq/km. Ugljični otisak tijekom proizvodnje baterija manje baterije 300 kWh iznosi 0,043 kg $CO_2$-eq/km. Slika 34 prikazuje WTW emisije koje su zbroj WTP i baterijskih emisija. Sveukupne emisije elektro-poriva za brod Trošenj s manjom baterijom 300 kWh iznose 3,52 kg $CO_2$-eq/km.




**Slika 34. WTW emisije stakleničkih plinova električnog broda baterijom 300 kWh**

### *8.4.3 Usporedba emisija dizelskog pogona i električnog poriva s baterijom 300kWh*

Slika 35 prikazuje usporedbu LCA rezultata dizelskog poriva i električnog pogona s baterijom 300 kWh. Omjer emisija dizelskog i električnog poriva ostaje isto jer ugljični otisak baterija nema puno utjecaja na sveukupne WTW emisije baterija.




**Slika 35. WTW emisije dizelskog i električnog poriva baterijom 300 kWh**

# 9. TEHNIČKE I OPERATIVNE MJERE ZA SMANJENJE NEŽELJENIH EMISIJA

Najveći izvor atmosferskog onečišćenja tijekom životnog ciklusa broda je proces izgaranja goriva [20]. Glavne mjere za smanjenje neželjenih emisija se uglavnom odnose na smanjenje potrošnje goriva što rezultira direktnim smanjenjem emisija stakleničkih plinova. To se može postići na način da se analizirani brod učini energetski učinkovitijim koristeći se prvenstveno već postojećim tehnologijama i na taj način smanjiti potrošnju goriva. S tom svrhom je u Drugoj IMO studiji o stakleničkim plinovima 2009. god. utvrđeno da dodatnim poboljšanjima na trupu broda, glavnom (porivnom) motoru i konstrukciji brodskog vijka zajedno sa smanjenjem eksploatacijske brzine moguće postići znatna smanjenja, Tablica 23 [33].

**Tablica 23. Smanjenje $CO_2$ emisija pomoću postojećih tehnologija i mjera [33]**

| **Konstrukcija (Novi brod)** | **Ušteda $CO_2$/tona*milja** | **Zajedno** | **Sveukupno** |
|---|---|---|---|
| Poboljšanja konceptualnog dizajna, redukcija brzine plovidbe | 2-50 %$^{+}$ | 10-50 %$^{+}$ | 25-75 %$^{+}$ |
| Trup i nadgrađe | 2-20 % | | |
| Snaga i propulzijski sustav | 5-15 % | | |
| Niskougljična goriva | 5-15 %$^{*}$ | | |
| Energija iz obnovljivih izvora | 1-10 % | | |
| Smanjenje $CO_2$ u ispušnim plinovima | 0 % | | |
| **Operativni režim (Svi brodovi)** | | | |
| Upravljanje flotom, logistikom i poticaji | 5-50 %$^{+}$ | 10-50 %$^{+}$ | |
| Optimiranje plovidbe | 1-10 % | | |
| Upravljanje energijom | 1-10 % | | |

Najveća smanjenja $CO_2$ emisija označenih s (+) postignuta su ukoliko se primjeni smanjenje eksploatacijske brzine, dok je maksimalno postignuto smanjenje označeno s (*) određeno korištenjem ukapljenog zemnog plina (LNG). Međutim, za putničke brodove u nacionalnim parkovima nisu pogodne sve tehnologije i operativni režimi. Gledajući sa stajališta emisije štetnih plinova, smanjenje brzine plovidbe putničkog broda značilo bi i smanjenje potrošnje goriva, a time i štetnih emisija. Međutim, time bi se povećalo vrijeme plovidbe što bi direktno rezultiralo u smanjenju mogućih broja dnevnih putovanja. To bi značilo da bi nacionalni park trebao povećati broj brodova za isti broj dnevnih putnika što nije ekonomski opravdano. Isto

tako, operativni režimi kod turističkih brodova ovise o raznim faktorima poput rasporeda putovanja, definiranih trasa puteva, stajališta i ugodnosti putnika. Na osnovi ovih ograničenja se može zaključiti da bi najpogodniji način smanjenja $CO_2$ emisija na putničkim brodovima vezano uz gorivo bilo primjena alternativnih goriva.

# 10. ALTERNATIVNA GORIVA

Alternativna goriva se uglavnom mogu primijeniti na brodu na dva načina [34]:

Konvencionalni motor s unutrašnjim izgaranjem: zamjenjujući dizelski motor otto motorom dok se primjenjuje stlačeni prirodni plin (eng. Compressed Natural Gas, CNG), ukapljeni prirodni plin, etanol ili vodik, uštede kod emisija $CO_2$ su manje od očekivanih. To je uglavnom zato što su dizelski motori 30% učinkovitiji od Otto motora.

Motor na dvojno gorivo: Kada prirodni plin i dizelsko gorivo istodobno izgaraju u dizelskom motoru, emisije $CO_2$ su manje. Ova tehnologija zahtjeva dvojni sustav goriva na brodu.

Alternativna goriva koja se danas najviše upotrebljavaju su LNG, električna energija, biodizel i metanol. Isto tako, goriva poput niskosumpornog dizela se mogu upotrijebiti za zadovoljavanje kriterija regulative tijekom tranzicije u alternativna goriva.

## *10.1 Metanol i biometanol*

Na industrijskoj razini, metanol se uglavnom proizvodi iz prirodnog plina. Zbog toga što se koristi fosilno gorivo za proizvodnju metanola, sveukupne emisije su u iznosu od 92,8 kg $CO_2$/GJ goriva koje su slične kao za dizelsko gorivo. Metanol se isto može proizvoditi od ugljena ali su tada emisije u iznosu od 182-190 kg $CO_2$/GJ goriva što je gotovo dvostruko više u odnosu na prirodni plin [35]. Međutim, biometanol se može proizvoditi i iz raznih prirodnih izvora kao biogorivo što donosi niski ugljični otisak. Na primjer, kod broda Stena Germanica koristi se dvojno gorivo s metanolom kao glavno gorivo da bi se postigle niske vrijednosti ugljičnog otiska [35].

## *10.2 Biodizel*

Iz tehničke perspektive, mješavine biodizela (do 20%) su proglašena kao najobečavajuća bio bazirana alternativna goriva za svrhe poriva broda [34]. Standard EN 14214:2008 propisuje da se biodizel može koristiti u brodskim dizelskim motorima i može se miješati s distiliranim gorivima. IMO 2007 čak tvrdi da se mješavine biodizela do 20% (B20) mogu koristiti bez negativnih utjecaja na sustav goriva [34]. Mnogi proizvođači brodskih motora su osposobili svoje brodske motore za rad na biodizel ili mješavinu biodizela i dizelskog goriva.

### *10.3 Ukapljeni Naftni Plin (LPG)*

Ukapljeni Naftni Plin (eng. *Liquefied petroleum gas*, LPG) se najviše koristi u kućanstvu i automobilnoj industriji i ne smatra se trenutno kao opcija za brodove zbog visoke cijene goriva. Isto tako, propan je teži od zraka i predstavlja opasnost eksplozije u slučaju da se akumulira u donjim dijelovima broda kod propuštanja cijevi [36]**.**

### *10.4 Ukapljeni prirodni plin (LNG)*

LNG se koristio kao gorivo za dizelski poriv već od 2006. god. i danas je dokazana i dostupna tehnologija. Motori na prirodni plin se danas rade za veliku ponudu brodskih snaga [37]. Najprije je bilo korišteno kao gorivo na LNG brodovima 1960. god. primjenjujući već dostupno gorivo na brodu u obliku ishlapljenog plina što je omogućilo tim brodovima da plove bez posebnih troškova goriva kada su brodovi bili natovareni.

Većina današnjih motora na LNG gorivo se nalaze u rasponu od 5 MW do 50 MW. Motori na bazi prirodnog plina su već dostupni za sve potrebne snage motora. To su četverotaktni motori koji rade na principu otto ciklusa [38].

### *10.5 Električna energija*

Electrifikacija je postala dosta popularna među brodovima koji puno mijenjaju režime plovidbe [37]. Glavni problem kod korištenja električne energije za pogon brodova je gustoća energije koji limitira doplov broda. Elektrifikacija se može provesti na dva načina: kao hibridni sustav poriva ili 100% električni porivni sustav [35].

Zbog razmjerno male gustoće energije, baterije koje se koriste za poriv mogu koštati i do 1000 $/kWh. Ovi veliki investicijski troškovi se moraju pokriti smanjenjem operacijskih troškova i troškova održavanja.

# 11. ZAKLJUČAK

Pošto se očekuje povećanje prijevoza unutarnjim vodama kao i sve rigidnija regulativa vezana za plovidbu unutarnjim plovnim putovima, emisije stakleničkih plinova unutarnje plovidbe postaju sve ozbiljniji problem za brodovlasnike, ljude koji borave u zonama plovidbe i za okoliš. U ovom radu provedena je LCA analiza emisija za brod Trošenj koji je pogonjen dizelskim motorom. Cilj ovakve analize je odrediti ugljični otisak broda u standardnim jedinicama kako bi ga se moglo usporediti s emisijama drugih tehnologija. Za usporedbu je napravljena procjena ugljičnog otiska broda koji je pogonjen elektromorom. Korišten je programski paket GREET kako bi se odredio ugljični otisak za različite konfiguracije energetskog sustava broda. Proračun ugljičnog otiska dizelskog goriva je podijeljen u dvije faze: od izvora do pumpne stanice (WTP) i od pumpne stanice do propulzora (PTW). Kod električne energije se dodatno razmatra emisija zbog proizvodnje baterije kao i sam proces pretvorbe kemijske energije u mehaničku energiju nema emisija stakleničkih plinova. Ugljični otisak sveukupne faze od izvora do propulzora (WTW) dizelskog goriva iznosi 9,96 kg $CO_2$-eq/km dok za elektromotorni pogon iznosi 3,61 kg $CO_2$-eq/km. Direktna usporedba ovih vrijednosti jasno pokazuje da pogon na električnu energiju ima znatno manje emisije stakleničkih plinova nego dizelski porivni sustav pa bi se takav pogon preporučio glede smanjenja emisija. Električne baterije imaju veliki potencijal u zamjeni dizelskih pogona ali problem kod primjene elektrifikacije na postojećem brodu je razmjerno velika investicija. To se vidi iz provedene analize troškova. Baterija koja bi bila potrebna da se brod puni samo 2 puta dnevno ima investicijske troškove od 390700 € i težinu od 3500 kg dok baterija koja bi bila potrebna ako se brod puni 6 puta dnevno ima investicijske troškove od 133000 € i težinu od 1200 kg.

Nadalje, brodograđevna industrija bi trebala primijeniti tehničke i operativne mjere Druge IMO studije kako bi se dodatno mogle smanjiti emisije poboljšanjem konstrukcije i unapređenjem operativnih režima. Uz primjenu nove strategije IMO-a i drugih ekoloških politika direktno vezanih za unutarnju plovidbu, očekuje se puno veći interes za primjenu niskougljičnih i bezugljičnih alternativnih goriva jer se razmatra mogućnost postavljanja naknada kako bi se penalizirali brodovi visokog ugljičnog otiska, s ciljem da plovidba niskougljičnim gorivima postane povoljnija.

# LITERATURA

[1] https://www.eea.europa.eu/themes/air/. [pristup: 17.05.2020].

[2] https://www.c2es.org/content/international-emissions/. [pristup: 26.05.2020].

[3] United Nations Framework Convention Climate Change (UNFCCC). Climate Change Information kit. UNEP and UNFCCC. 2001.

[4] Odeh NA, Cockerill TT. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. Energy Policy. 2008; 36(1): 367-380.

[5] http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx. [pristup: 17.05.2020].

[6] IMO. Third IMO GHG Study: Executive Summary and Final Report. 2014. International Maritime Organization.

[7] Chen L, Yip TL, Mou J. Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. 2018; 58: 280-291.

[8] Wiedmann T, Minx JC. A Definition of Carbon Footprint. Economic Systems Research. 2009; 21(3):187-216

[9] Ling-Chin J, Heidrich O, Roskilly AP. Life cycle assessment (LCA) - from analysing methodology development to introducing an LCA framework for marine photovoltaic (PV) systems. 2016; 59: 352-378.

[10] United Nations. European Agreement on Main Inland Waterways of International Importance – AGN. 1996. Dostupno na: https://treaties.un.org/doc/Treaties/1996/01/19960119%2009-07%20AM/Ch_XI_D_5.pdf. [pristup: 04.05.2020].

[11] CRUP. Priručnik unutarnje plovidbe u Republici Hrvatskoj. 2006.

[12] https://mmpi.gov.hr/more-86/unutarnja-plovidba-110/110. [pristup: 14.05.2020].

[13] European Court of Auditors. Inland Waterway Transport in Europe. Publications Office of the European Union. 2015.

[14] Eurostat. No significant improvements in modal share and navigability conditions since 2001. European Comission. 2015. Dostupno na:

https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR15_01/SR15_01_EN.pdf. [pristup: 15.05.2020].

[15] OECD. Freight transport - Organisation for Economic Co-operation and Development. 2018. Dostupno na: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF_GOODS_TRANSPORT. [pristup: 24.06.2020].

[16] International Maritime Organisation. Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. 2016; Module 2. Dostupno na: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf. [pristup: 20.05.2020].

[17] MARPOL. Annex VI - International Convention on the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78). 2018.

[18] https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases. [pristup: 17.05.2020].

[19] https://www.netregs.org.uk/environmental-topics/air-pollution/fluorinated-gases-f-gases/calculating-the-equipment-charge-as-co2-equivalent/. [pristup: 12.06.2020].

[20] Chatzinikolaou SD, Ventikos NP. Applications of Life Cycle Assessment in Shipping. 2014.

[21] HRB. Registar brodova unutarnje plovidbe. 2019. Dostupno na: http://www.crs.hr/Portals/0/Register%20of%20Inland%20Navigation%20Vessels.pdf. [pristup: 24.05.2020].

[22] https://www.croatiaweek.com/krka-national-park-presents-new-electric-catamarans/. [pristup: 20.06.2020].

[23] ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 1997. Dostupno na: https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf. [pristup: 27.05.2020].

[24] http://www.np-krka.hr/hr/. [pristup: 12.06.2020].

[25] https://www.hydrocarbons-technology.com/projects/haradh/. [pristup: 15.06.2020]

[26] https://www.hydrocarbons-technology.com/. [pristup: 02.06.2020].

[27] https://www.searoutes.com. [pristup: 02.06.2020]

[28] http://maps.google.com. [pristup: 02.06.2020]

[29] https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/. [pristup: 17.06.2020].

[30] Entec. Quantification of ship emissions. Dostupno na: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf. [pristup: 17.06.2020].

[31] Jun P, Gillenwater M and Barbour W. $CO_2$ , $CH_4$ , and $N_2O$ emissions from transportation-water-borne navigation. Dostupno na: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_4_Water-borne_Navigation.pdf. [pristup: 17.06.2020].

[32] HEP. Izvori električne energije. 2018. Dostupno na: http://www.hep.hr/elektra/trziste-elektricne-energije/izvori-elektricne-energije/1553. [pristup: 18.06.2020].

[33] Dedes E, Hudson DA, Turnock SR. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. Energy Policy. 2012; 40(1). doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.046

[34] Perčić M, Ančić I, Vladimir N. Life-cycle cost assessments of different power system confgurations to reduce the carbon footprint in the Croatian short-sea shipping sector. 2020; 3: 343-357.

[35] European Commission. Energy prices and costs in europe, Annex 3. 2018. Dostupno na: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/annex_3_-_country_sheets_-part_4_of_4_post_isc-v2.pdf. [pristup: 24.06.2020].

[36] IMO. Emissions from fuel used for international aviation and maritime transport. 2011; Agenda item 9(a). Dostupno na: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/COP%2017/Submissions/Final%20SBSTA%20EEDI%20SEEMP%20COP17.pdf. [pristup: 20.06.2020].

[37] Florentinus A, Hamelinck C, Bos AVD, Winkel R, Cuijpers M. Potential of biofuels for shipping - Final Report. European Maritime Safety Agency. 2012. Dostupno na:

http://www.emsa.europa.eu/main/air-pollution/download/1626/1376/23.html. [pristup: 17.06.2020].

[38] DNV GL. The Fuel Trilemma: Next generation of marine fuels. 2015. Dostupno na: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/06/DNV-GL-Position-Paper-on-Fuel-Trilemma.pdf. [pristup: 22.05.2020].

[39] McGill R, Remley WB, Winther K. Alternative Fuels for Marine Applications. A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement. 2013; Annex 41.

[40] DNV GL. Alternative Fuels for Shipping. 2014; Position Paper 17. Dostupno na: https://transportemaritimoglobal.files.wordpress.com/2014/01/dnv-gl-alternative-fuel-2014-positionpaper.pdf. [pristup: 20.06.2020].

[41] DNV GL. LNG as Ship Fuel. 2015. Dostupno na: https://www.dnvgl.com/Images/LNG_report_2015-01_web_tcm8-13833.pdf. [pristup: 20.06.2020].

[42] EMSA European Maritime Safety Agency. Study on the Use of Fuel Cells in Shipping. 2017. DNV GL. Dostupno na: http://www.emsa.europa.eu/component/flexicontent/download/4545/2921/23.html. [pristup: 20.06.2020].

[43] European Court of Auditors. Inland Waterway. 2015. Dostupno na: https://www.eca.europa.eu/en/Pages/DocItem.aspx?did=31393. [pristup: 12.05.2020].

# PRILOZI

I. CD-R disc