Vodik kao alternativno gorivo u brodskim energetskim sustavima

Piljić, Davor

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:235:593716

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Davor Piljić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir

Student:

Davor Piljić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru i asistentici Maji Perčić, mag. ing., na potpori, stručnoj pomoći i savjetima pruženim tijekom izrade ovoga rada.

Davor Piljić

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 Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Davor Piljić** Mat. br.: 0035200047

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vodik kao alternativno gorivo u brodskim energetskim sustavima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hydrogen as an alternative fuel in ship power systems**

Opis zadatka:

Zakonska regulativa u pomorskom sektoru potiče razvoj brodskih energetskih sustava visoke energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti, pri čemu se posljednjih godina uvelike istražuju alternative konvencionalnim energetskim sustavima s dizelskim motorima. Istovremeno, primjena vodika kao alternativnog goriva u svim oblicima prijevoza vrlo je aktualna istraživačka tema, pri čemu je zastupljenost vodika u pomorskom sektoru relativno mala. U diplomskom radu potrebno je analizirati potencijal vodika kao energenta u priobalnom prometu na primjeru Republike Hrvatske, prema ekološkim i ekonomskim kriterijima, te uzimajući u obzir tehnička ograničenja koja propisuju klasifikacijska društva. Za odabrani brod iz hrvatske priobalne flote potrebno je analizirati njegove energetske potrebe i eksploatacijski profil, te za alternativni energetski sustav temeljen na vodiku kao energentu provesti cjeloživotnu analizu emisija i s njima povezanih troškova. Cjeloživotnu analizu potrebno je provesti programskim paketom GREET.
Zadatak treba sadržavati:

- opis važeće zakonske regulative u pomorskom prometu, s naglaskom na priobalnu plovidbu,
- analizu hrvatske flote priobalne plovidbe i odabir referentnog broda,
- analizu vodika kao alternativnog goriva s osvrtom na postupke njegova dobivanja i primjene u brodskim energetskim sustavima,
- opis postupka cjeloživotne analize,
- kratak opis korištene programske podrške,
- tehnički opis analiziranog broda s naglaskom na brodski energetski sustav i način njegove eksploatacije,
- analizu rezultata proračuna.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
24. rujna 2020.	26. studenoga 2020.	30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA V

POPIS OZNAKA VIII

SAŽETAK IX

SUMMARY X

1. UVOD 1

2. IMO ZAKONSKA REGULATIVA 3

2.1. Izmjena MARPOL-a 3

2.2. Pravno-administrativni okvir 4

2.3. SEEMP 5

2.4. EEDI 6

2.5. Područja kontrole emisija 6

2.6. NO_X emisije 7

2.7. SO_X emisije 10

3. VODIK 12

3.1. Vodikova ekonomija 13

3.2. Skladištenje vodika 14

3.2.1. Sustav skladištenja vodika u plinovitom stanju 15

3.2.2. Sustav skladištenje vodika u tekućem stanju 15

3.2.3. Sustav skladištenja vodika u krutom stanju 16

3.3. Proizvodnja vodika 16

3.3.1. Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva 17

3.3.1.1. Rasplinjavanje ugljena 17

3.3.1.2. Reformiranje pare 17

3.3.1.2.1. Reformiranje pare prirodnog plina (metana) 18

3.3.1.2.2. Reformiranje ukapljenog naftnog plina 18

3.3.1.2.3. Reformiranje metanola 18

3.3.1.2.4. Reformiranje benzina 18

3.3.1.2.5. Reformiranje etanola 19
3.3.1.3. Fischer-Tropschova sinteza (FT) 19
3.3.1.4. Autotermalno reformiranje 19
3.3.1.5. Termičko pucanje 19
3.3.2. Proizvodnja vodika iz vode 19
3.3.3. Proizvodnja vodika na bazi biomase 20
3.3.3.1. Termokemijska proizvodnja vodika iz biomase 21
3.3.3.2. Proizvodnja vodika pirolizom biomase 21
3.3.3.3. Proizvodnja vodika rasplinjavanjem biomase 21
3.3.4. Biološka proizvodnja vodika 21
3.3.4.2. Neizravna biofotoliza 22
3.3.4.3. Foto-fermentacija 22
3.3.4.4. Tamna fermentacija 22
3.3.5. Proizvodnja vodika iz otpadnih plinova 22
3.3.5.1. Kriogena destilacija 22
3.3.5.2. Proces apsorpcije 22
3.3.5.3. Proces adsorpcije 23
3.3.5.4. Membranska separacija 23
3.3.5.5. Postupak membranskog kontaktora 24
3.3.6. Troškovi proizvodnje vodika 24
4. OSNOVNA KONFIGURACIJA BRODSKOG ENERGETSKOG SUSTAVA POGONJENOG VODIKOM 26
4.1. Gorivni članci 26
4.1.1. PEMFC gorivni članak 28
4.1.2. AFC gorivni članak 29
4.1.3. PAFC gorivni članak 30
4.1.4. MCFC gorivni članak 31
4.1.5. SOFC gorivni članak 32
4.1.6. Trošak 33
4.1.7. Učinkovitost 34
4.1.8. Sigurnost 35
4.1.9. Vijek trajanja 35
4.2. Baterije 35

4.3. Elektromotor 35
4.4. Spremnici vodika 36
5. ANALIZA HRVATSKE NACIONALNE FLOTE 38
5.1. Kategorije plovidbe 38
5.2. Plovna područja 39
5.3. Brodske kompanije 46
5.4. Brodovi u nacionalnoj plovidbi 47
5.5. Vrste brodova u hrvatskoj nacionalnoj floti 47
5.5.1. Klasični putnički brod 48
5.5.2. Ro-Ro putnički brod (trajekt) 49
5.5.3. Putnički katamaran 50
6. ZNAČAJKE ANALIZIRANOG BRODA 52
7. OPIS POSTUPKA CJELOŽIVOTNE ANALIZE 55
7.1. Opis proračuna u programskom paketu GREET 55
7.2. Analiza životnog ciklusa 55
7.3. LCA broda pogonjenog dizelskim motorom. 56
7.3.1. Proračun ugljičnog otiska u WTP fazi 57
7.3.2. Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi 59
7.3.3. Rezultati WTW faze 63
7.3.4. Utjecaj proizvodnje dizelskog motora 63
7.3.5. Ukupni ugljični otisak za brod pogonjenim dizelskim gorivom 64
7.4. Ugljični otisak broda pogonjenim vodikom 65
7.4.1. Proračun ugljičnog otiska u WTP fazi 66
7.4.2. Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi 68
7.4.3. Utjecaj PEM gorivnog članla, baterije i elektromotora 68
7.4.4. Ukupni ugljični otisak broda pogonjenim vodikovim gorivom 71
7.5. Usporedba rezultata 72
8. TEHNIČKE I OPERATIVNE MJERE ZA SMANJENJE NEŽELJENIH EMISIJA 74
9. ANALIZA CJELOŽIVOTNIH TROŠKOVA 76
9.1. Troškovi brodskog energetskog sustava pogonjenog dizelskim gorivom 77
9.2. Troškovi brodskog energetskog pogonjenog vodikovim gorivom 78
9.3. Usporedba cjeloživotnih troškova 79

10. ZAKLJUČAK 81

11. LITERATURA 83

PRILOZI 88

POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz emisija CO_2 raznih industrija na globalnoj razini. 1
Slika 2: Referentna krivulja za pojedinu fazu redukcije. 6
Slika 3: Područja kontrolirane emisije. 7
Slika 4: Grafički prikaz smanjenja NO_X emisija. 8
Slika 5: Grafički prikaz ograničenja sumpora u gorivu. 10
Slika 6: Životni ciklus vodika. 13
Slika 7: Vodikova ekonomija. 14
Slika 8: Načini skladištenja vodika. 15
Slika 9: Skladištenje vodika pomoću metalnih hidrida. 16
Slika 10: Različite sirovine za proizvodnju vodika. 17
Slika 11: Elektroliza vode. 20
Slika 12: Brod pogonjen vodikom i njegovi osnovni dijelovi. 26
Slika 13: Shematski prikaz gorivnog članka. 27
Slika 14: PEMFC gorivni članak. 28
Slika 15: AFC gorivni članak. 29
Slika 16: PAFC gorivni članak. 30
Slika 17: MCFC gorivni članak. 31
Slika 18: SOFC gorivni članak. 32
Slika 19: Projicirane cijene gorivnih članaka. 33
Slika 20: Dijagram učinkovitosti. 34
Slika 21: Elektromotor. 36
Slika 22: Spremnik ukapljenog vodika. 37
Slika 23: Plovna područja Republike Hrvatske. 39
Slika 24: Plovno područje Pule. 40
Slika 25: Plovno područje Rijeke. 41
Slika 26: Plovno područje Zadra. 42
Slika 27: Plovno područje Šibenika. 43
Slika 28: Plovno područje Splita. 44
Slika 29: Plovno područje Korčule. 45
Slika 30: Plovno područje Dubrovnika. 46
Slika 31: Putnički brod Burja. 48
Slika 32: Putnički brod Luka. 48

Slika 33: Trajekt Kornati. 49
Slika 34: Rute hrvatskih lokalnih trajekata. 50
Slika 35: Putnički katamaran Silba. 51
Slika 36: Ro-Ro putnički brod Prizna. 52
Slika 37: Prikaz rute plovidbe trajekta na relaciji Prizna-Žigljen. 54
Slika 38: Životni ciklus proizvoda i njegove faze. 56
Slika 39: LCA energetskog sustava s dizelskim gorivom. 57
Slika 40: Simulacija prijevoza nafte. 57
Slika 41: Simulacija prijevoza dizelskog goriva. 58
Slika 42: Simulacija WTP faze. 58
Slika 43: Usporedba ispuštenih stakleničkih plinova u WTP fazi. 59
Slika 44: Simulacija PTW faze. 61
Slika 45: Rezultati PTW faze. 62
Slika 46: Reultati WTW faze. 63
Slika 47: Rezultati ugljičnog otiska dizelskog motora. 64
Slika 48: Ukupni ugljični otisak dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm). 65
Slika 49: LCA faze broda pogonjenim vodikom. 66
Slika 50: Simulacija WTP faze. 66
Slika 51: Simulacija prijevoza vodika od postrojenja do broda. 67
Slika 52: Rezultati WTP faze. 67
Slika 53: Simulacija PTW faze vodika. 68
Slika 54: Usporedba emisija PEM gorivnog članka, baterija i elektromotora. 71
Slika 55: Ukupni ugljični otisak vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm). 72
Slika 56: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm). 73
Slika 57: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (t CO_2-eq). 73
Slika 58: Ukupni troškovi brodskog energetskog sustava. 76
Slika 59: Cijene karbonske takse za sljedećih 20 godina. 77
Slika 60: Usporedba cjeloživotnih troškova. 80

POPIS TABLICA

Tablica 1: Ograničene vrijednosti NO_X emisija..... 8
Tablica 2: Ograničenja sumpora u gorivu. 10
Tablica 3: Fizikalna i kemijska svojstva vodika..... 12
Tablica 4: Troškovi proizvodnje vodika..... 24
Tablica 5: Ukupan promet putnika i vozila na državnim linijama RH..... 47
Tablica 6: Osnovni podaci broda Prizna. 52
Tablica 7: Osnovni podaci o dimenzijama broda. 53
Tablica 8: Podaci o energetskom postrojenju broda..... 53
Tablica 9: Rezultati WTP faze. 58
Tablica 10: Rezultati analize ugljičnog otiska WTP faze. 59
Tablica 11: Emisijski faktori. 61
Tablica 12: Emisije ispušnih plinova. 61
Tablica 13: Rezultati PTW faze. 62
Tablica 14: Rezultati analize ugljičnog otiska PTW faze. 62
Tablica 15: Ugljični otisak WTW faze dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm). 63
Tablica 16: Maseni udjeli pojedinih materijala dizelskog motora. 63
Tablica 17: Rezultati analize ugljičnog otiska dizelskog motora. 64
Tablica 18: Ukupni ugljični otisak dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm). 65
Tablica 19: Rezultati analize ugljičnog otiska WTP faze. 67
Tablica 20: Popis materijala i njihove mase. 69
Tablica 21: Rezultati analize ugljičnog otiska PEM gorivnog članka. 69
Tablica 22: Rezultati analize ugljičnog otiska baterije. 70
Tablica 23: Rezultati analize ugljičnog otiska elektromotora. 70
Tablica 24: Ukupni ugljični otisak vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm). 71
Tablica 25: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm). 72
Tablica 26: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (t CO_2-eq). 73
Tablica 27: Smanjenje CO_2 emisija pomoću postojećih tehnologija i mjera. 74
Tablica 28: Usporedba cjeloživotnih troškova (€). 79

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
BC	kWh	Kapacitet baterije
CA	€/t CO_2	Karbonska taksa
CF	kg CO_2-eq	Ugljični otisak
EC	kWh/nm	Potrošnja energije
FC	kg/nm	Potrošnja goriva
GWP	-	Potencijal globalnog zatopljenja
IC	€	Trošak investicije
l	nm	Duljina rute
LCCEC	€	Troškovi emisije ugljika tijekom životnog ciklusa
LCFC	€	Trošak goriva u životnom ciklusu
LCMC	€	Troškovi održavanja tijekom životnog ciklusa
LM	nm	Ukupni prijeđeni put tijekom životnog ciklusa
LT	-	Eksploatacijski vijek
m	kg	Masa
N_A	-	Broj povratnih putovanja
NCV	kWh/kg	Neto kalorijska vrijednost
P	kW	Snaga
PR	€	Cijena
PTW	-	Od pumpne stanice do kotača (propulzora)
SFC	kg/kWh	Specifična potrošnja goriva
TE	kg/nm	Emisije u ispušnoj cijevi
v	čv	Brzina
WTP	-	Od izvora do pumpne stanice
WTW	-	Od izvora do kotača (propulzora)

SAŽETAK

Regulatorni okvir postavljen od Međunarodne pomorske organizacije s ciljem smanjenja ukupnih emisija stakleničkih plinova, izazvanih pomorskim prometom, potiče na istraživanja alternativnih rješenja brodskih energetskih sustava. Brodovi u priobalnoj plovidbi zahtijevaju posebnu pozornost jer prometuju u blizini naseljenih mjesta, čime je njihov relativni utjecaj na ljudsko zdravlje potencijalno veći od prekooceanskih brodova. U ovom diplomskom radu analizirane su mogućnosti upotrebe vodika kao energenta u priobalnom brodskom prometu prema ekološkim i ekonomskim kriterijima. Analiziran je cjeloživotni ugljični otisak različitih konfiguracija energetskog sustava (za dizelsko gorivo i vodik) putničkog broda Prizna koji plovi na relaciji Prizna-Žigljen u Republici Hrvatskoj. Analiza je provedena u programskom paketu GREET 2020. U obzir su uzeti svi važniji procesi uključujući proizvodnju i distribuciju pogonskog goriva, proizvodnju osnovnih komponenata brodskog energetskog sustava te samu eksploataciju plovila. Za svaku energetsku konfiguraciju izračunat je cjeloživotni ugljični otisak te je napravljena analiza i usporedba ukupnih cjeloživotnih troškova. Šira uporaba vodika u pomorskom prometu zahtijeva smanjenje troškova njegovog dobivanja, kao i potvrdu od strane nadležnih klasifikacijskih društava da je sigurnost takvih energetskih sustava barem na razini postojećih. Pri tome valja istaknuti da su pravila klasifikacijskih društava koja bi prepoznala vodik kao gorivo budućnosti još uvijek u fazi razvoja.

Ključne riječi: ugljični otisak, cjeloživotna analiza, dizelsko gorivo, vodik, putnički brod.

SUMMARY

Regulatory framework set by the International Maritime Organization, with an aim to reduce emissions caused by marine transportation, motivates research into ship alternative powering options. This is particularly important for coastal vessels due to their operation in inhabited areas and potentially higher effect on human health, compared to long-distance shipping. In this master thesis, viability of hydrogen as an alternative fuel has been analysed from the environmental and economic viewpoint. Life cycle carbon footprint of a passenger vessel Prizna, operating at Prizna – Žigljen ferry route in Croatia has been calculated, for a diesel engine-powered vessel and its alternative powered by hydrogen. The analysis has been performed by means of GREET 2020 software. All important processes like fuel recovery and distribution, manufacturing of power system components, fuel combustion, etc. were taken into account. For each of the power system configurations, besides lifetime emissions, lifetime costs have also been determined and analysed. Wider applicability of hydrogen as a marine fuel requires decrease of its production costs as well as safety approval of relevant classification societies which will guarantee at least the same safety level as in case of existing energy systems. It should be noted that the rules of classification societies, that would recognize hydrogen as a key fuel in the future, are still undevelopted.

Key words: carbon footprint, life cycle assessment, diesel, hydrogen, passenger ship.

1. UVOD

Nepovoljan utjecaj fosilnih goriva na okoliš, njihovo iscrpljivanje te oscilacije u njihovoj cijeni otvaraju mogućnost uvođenja alternativnih goriva na energetsko tržište. U industriji i pomorskom sektoru većinom se koriste neobnovljivi oblici energije koji najčešće podrazumijevaju fosilna goriva. Osnovni problem kod fosilnih goriva je što su ograničena količinom i što zagađuju okoliš. Njihovim izgaranjem se u atmosferu ispuštaju kemijski spojevi koji negativno utječu na okoliš. Ugljikov dioksid (CO_2) smatra se najutjecajnijim stakleničkim plinom jer povećanje njegove koncentracije u atmosferi uzrokuje globalno zatopljenje. S obzirom da se 90% svjetske trgovine odvija pomorskim putem, moglo bi se zaključiti da brodovi značajno doprinose onečišćenju okoliša. Iako brodovi proizvode samo 3,3% ukupnih emisija CO_2 na globalnoj razini [1], kao što je prikazano na Slici 1, projekcije ukazuju da bi se navedene emisije u budućnost značajno mogle povećati, ukoliko se ne poduzmu odgovarajuće mjere.



Slika 1: Prikaz emisija CO_2 raznih industrija na globalnoj razini [1].

Brodovi na razne načine onečišćuju more, zrak i obalu, odnosno cjelokupni okoliš. Ispušni plinovi nastali izgaranjem fosilnog goriva u brodskim motorima mogu se podijeliti u dvije kategorije: stakleнički plinovi kao što su metan (CH_4), dušikov (I) oksid (N_2O) i ugljikov dioksid (CO_2), te štetni plinovi poput dušikovih oksida (NO_X) i sumporovih oksida (SO_X) [2]. Štetni plinovi narušavaju kvalitetu zraka i neizravno utječu na zagrijavanje zraka i stvaranje troposferskog ozona u pojedinim područjima te nastajanje kiselih kiša, dok stakleнički plinovi uzrokuju klimatske promjene, tj. globalno zatopljenje. Osim što imaju štetan utjecaj na okoliš, emisije brodova negativno utječu i na ljudsko zdravlje. U energetskom i prometnom sektoru

potrebno je razmotriti zamjenu fosilnih goriva s alternativnim i čišćim gorivima čijim izgaranjem ili ne nastaju ili nastaju manje emisije štetnih plinova. Jedno od takvih alternativnih goriva je vodik. Za razliku od fosilnih goriva, vodik je ekološki povoljniji jer ne sadrži ugljik pa njegova primjena ne dovodi do emisije CO_2. Vodik se zbog svojih izvanrednih karakteristika smatra važnim izvorom energije za budućnost. Kao gorivo je potpuno čist i neograničeno pristupačan. S obzirom na povoljan utjecaj vodika na okoliš, sve više se provode istraživanja za razvoj njegove primjene, kako bi se riješio globalni problem klimatskih promjena i onečišćenja okoliša [2].

U ovom diplomskom radu analiziran je potencijal vodika kao energenta prema ekološkim i ekonomskim kriterijima. Za tu svrhu, kao temelj su poslužile analize energetskih potreba i eksploatacijskih profila brodova hrvatske priobalne flote, iz kojih je odabran brod za čiji energetski sustav je provedena analiza. Za odabrani brod provedena je cjeloživotna analiza ugljičnog otiska konvencionalnih energetskih sustava s dizelskim motorom kao prvopokretačem te alternativnih rješenja s vodikom kao energentom. Za navedene varijante provedena je i komparativna analiza cjeloživotnih troškova, podrazumijevajući različite scenarije implementacije karbonske takse u sektor priobalne plovidbe.

2. IMO ZAKONSKA REGULATIVA

Međunarodna pomorska organizacija (eng. *International Maritime Organization,* IMO) je agencija Ujedinjenih naroda, čija je svrha promicanje pomorske sigurnosti. Osnovana je međunarodnom konferencijom u Ženevi 1948. godine [3]. Postala je aktivna 1958. godine kada je na snagu stupila IMO konvencija. IMO trenutno broji 167 država članica i 3 pridružena člana.

2.1. Izmjena MARPOL-a

U posljednjih nekoliko godina, glavna tema rasprave Odbora za zaštitu pomorskog okoliša (eng. *Marine Environment Protection Committee,* MEPC) bila je uspostavljanje standarda za brodske emisije CO_2. Postavljanje ograničenja emisija CO_2 razmatrano je kroz uvođenje projektnog indeksa energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI). Cijena goriva bila je glavni pokretač za smanjenje potrošnje goriva i poboljšanja energetske učinkovitosti trgovačkih brodova. Najnovije izmjene i dopune MARPOL-a, Prilog VI [4], su trenutno važeći propisi kojima se želi poboljšati energetska učinkovitost brodova, te zahtijevaju da od 1. siječnja 2013. svaki brod posjeduje Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti (eng. *International Energy Efficiency Certificate,* IEEC).

Uvjeti da bi brod mogao steći IEEC certifikat su:

- Brod mora udovoljavati EEDI-u,
- Brod mora imati Brodski plan upravljanja energetskom učinkovitošću (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan,* SEEMP).

Dok EEDI predstavlja tehničku mjeru, SEEMP je operativna mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti brodova i primjenjiva je na sve brodove koji imaju kapacitet veći od 400 GT, a sudjeluju u međunarodnoj plovidbi.

Prema MEPC.203(62):

1.) Usvajaju se izmjene Priloga VI,

2.) Određeno je kako se izmjene smatraju prihvaćenima 1. srpnja 2012., ukoliko se do tada ne podnese prigovor,

3.) Pozivaju se svi relevantni administrativni organi da imaju na umu da izmjene stupaju na snagu 1. siječnja 2013. po prihvaćanju,

4.) Od tajnika se zahtijeva distribucija rezolucije svim članicama,

5.) IMO poziva sve članice da o promjenama MARPOL-a Priloga VI obavijeste brodovlasnike, kapetane, brodogradilišta, projektne urede, proizvođače brodskih motora, proizvođače brodske opreme, kao i sve druge zainteresirane stranke.

2.2. Pravno-administrativni okvir

U okviru Rezolucije MEPC.203(62) koja obuhvaća izmjene i dopune MARPOL-a Priloga VI, izglasane 15. srpnja 2011. godine, navedeno je nekoliko bitnih pravila koja su nužna za jasan uvid i pravilnu interpretaciju izmjena potrebnih za proračun EEDI-a. Pravila se primjenjuju na sve brodove, osim onih koji su izričito izuzeti po drugim odredbama spomenutog Priloga VI. Ostale relevantne rezolucije Odbora za zaštitu pomorskog okoliša:

• MEPC.212(63): Smjernice za metodu proračuna postignutog EEDI-a za nove brodove.

- U okviru ove rezolucije opisan je postupak proračuna postignutog EEDI- a za sve tipove brodova te su navedeni izrazi prema kojima se računaju svi relevantni proračunski parametri.

• MEPC.213(63): Smjernice za razvijanje SEEMP-a, [5].

- Pravilno provođenje plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda može znatno utjecati na energetsku učinkovitost, te su u ovoj rezoluciji opisane smjernice prema kojima se plan razvija.

• MEPC.214(63): Smjernice za nadzor i certificiranje EEDI-a, [6].

- U smjernicama za nadzor i certificiranje projektnog indeksa energetske učinkovitosti opisan je, prije svega, postupak verifikacije EEDI-a u svrhu dobivanja IEE certifikata.

• MEPC.224(64): Izmjene i dopune za metodu proračuna postignutog projektnog indeksa EEDI-a za nove brodove, [7].

- Novija rezolucija koja uključuje izmjene i dopune već postojećih smjernica za metodu proračuna EEDI-a.

• MEPC.245(66): Smjernice za metodu proračuna postignutog EEDI-a za nove brodove, [8].

- Rezolucija objavljena 2014. godine, koja se odnosi na metodu proračuna postignutog projektnog indeksa, a zapravo predstavlja dorađenu verziju rezolucije MEPC.212(63).

• MEPC.251(66): Izmjene i dopune priloga VI te tehničkog koda NO_X iz 2008., [9].

• MEPC.215(63): Smjernice za izračun referentne krivulje indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) [10].

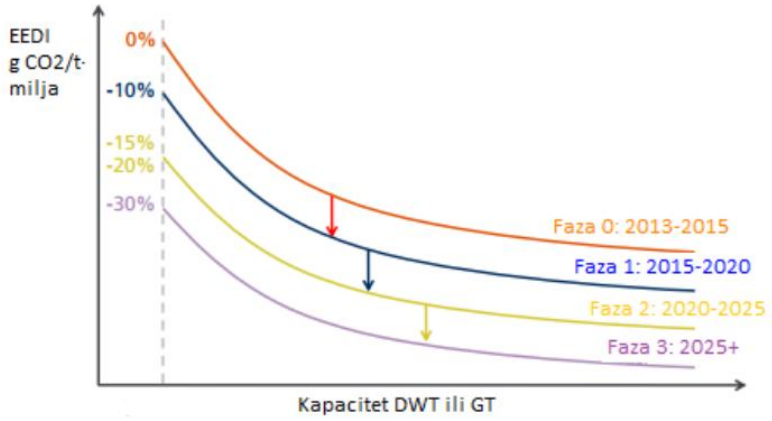
2.3. SEEMP

Operativna mjera kojom se uspostavlja mehanizam za poboljšanje energetske učinkovitosti broda je SEEMP. Od 01.01.2013. svi brodovi veći od GT=400 moraju posjedovati SEEMP. SEEMP pruža pristup brodograđevnim tvrtkama da lakše kontroliraju korištenje (potrošnju) goriva. Smjernice za razvoj SEEMP-a za nove i postojeće brodove uključuju upute za učinkovitu potrošnju goriva, kao i upute za dobrovoljno korištenje EEOI-a (eng. *Energy Efficiency Operational Indicator*) za nove i postojeće brodove. EEOI omogućuje korisnicima mjerenje učinka svih promjena u radu, npr. poboljšano planiranje putovanja, češće čišćenje brodskog vijka ili uvođenje tehničkih mjera kao što su sustavi za povrat otpadne topline ili novi brodski vijak [11]. Predviđanje i planiranje deklarirani su kao važni čimbenici. Primjerice, izbjegavanjem preranog dolaska u luku odnosno smanjivanjem brzine plovidbe je moguće znatno smanjiti potrošnju goriva. IMO je u svojoj studiji o stakleničkim plinovima iz 2009. godine došla do zaključka kako je samo pravilna primjena plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda dovela do smanjenja emisije štetnih plinova za 10-15%. Planiranje, odnosno prva faza je od krucijalne važnosti u cjelokupnoj strukturi SEEMP. Planiranje uključuje analizu trenutnog stanja upravljanja energetskom učinkovitošću na brodu i očekivana poboljšanja, pri čemu je za njegovu provedbu od velike važnosti osigurati dovoljno vremena. Ne mogu se sve mjere primijeniti na sve brodove, čak neke mogu biti i kontradiktorne. Faza implementacije podrazumijeva izradu samog sustava implementacije prethodno planiranih mjera. Ona uključuje detaljan opis načina implementacije, identifikaciju odgovorne osobe, period implementacije i čuvanje zabilješki vezanih za pojedine mjere i razloge zašto se određene mjere ne mogu implementirati. Potrebno je pratiti spomenute mjere, pri čemu treba formirati metodu (međunarodni standard, EEOI). Konzistentno prikupljanje podataka predstavlja osnovu III. faze. Potrebno je nastojati organizirati praćenje s kopna i osigurati mogućnost odvojenog praćenja u posebnim slučajevima eksploatacije broda (potraga, spašavanje, itd.). Završne faze su vrednovanje i poboljšanje pojedine iteracije koje osiguravaju povratne informacije za sljedeći ciklus planiranja. Mogu se provoditi periodički, u tijeku nadzora [12].

2.4. EEDI

Omjer emisije ugljikovog dioksida (CO_2) prilikom prijevoza jedne tone tereta za jednu nautičku milju definira se kao EEDI. Potreba za uvođenjem EEDI-a proizlazi iz tendencije za unapređenjem energetskog sustava broda, odnosno povećanjem njegove učinkovitosti. Prvobitni cilj uvođenja EEDI-a je optimirati potrošnju goriva pomoću projektnih i operativnih mjera koje bi rezultirale smanjenjem emisija čestica nastalih iz goriva procesom izgaranja.

Za svaki novi brod u međunarodnoj plovidbi kapaciteta GT=400 potrebno je izračunati postignuti EEDI koji ne smije biti veći od zahtijevanog EEDI-a. Zahtijevani EEDI računa se ovisno o vrijednosti EEDI referentne krivulje, prikazanoj na Slici 2 i faktoru smanjenja X. Parametri za proračun zahtjevanog EEDI-a u ovisnosti o tipu i veličini broda te vremenskom intervalu dani su rezolucijom MEPC.203(62).



Slika 2: Referentna krivulja za pojedinu fazu redukcije.

2.5. Područja kontrole emisija

U Prilogu VI definirane su dvije skupine zahtjeva za kvalitetu goriva na brodu:

- Globalni zahtjevi,
- Stroži zahtjevi koji se primjenjuju u područjima kontrole emisija (eng. *Emission Control Area*, ECA).

Područja kontrole emisija mogu se odrediti za emisije SO_X, PM, ili NO_X, ili za sve tri vrste emisija s brodova [13].

Područja kontrolirane emisije uključuju:

- Baltičko more (SO_X: usvojen 1997. / stupio na snagu 2005.; NO_X: 2016./2021.),
- Sjeverno more (SO_X: 2005./2006.; NO_X: 2016./2021.),
- Sjevernoameričko područje, uključujući veći dio američke i kanadske obale (NO_X i SO_X: 2010./2012.),

- Američko područje s Karibima, uključujući Portoriko i Američke Djevičanske otoke (NO_X i SO_X: 2011./2014.).

Na Slici 3 prikazana su područja kontrolirane emisije.



Slika 3: Područja kontrolirane emisije [13].

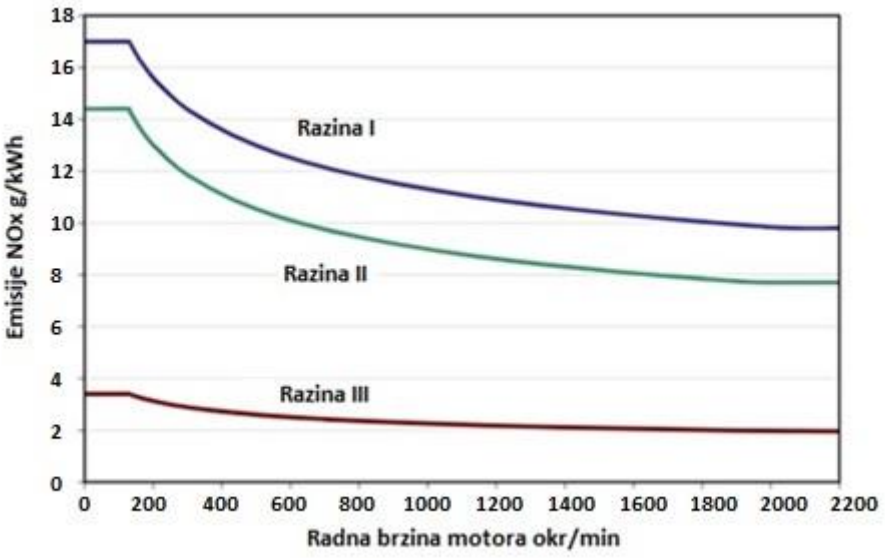
2.6. NO_X emisije

Ograničenja emisije NO_X primjenjuju se na svaki instalirani dizelski motor snage veće od 130 kW, osim onih koji se koriste isključivo za nužne potrebe. NO_X emisije ograničene su pravilom 13 MARPOL-a prilog VI.

Postavljene granice emisija NO_X za brodske dizelske motore ovise o maksimalnoj radnoj brzini rada motora kao što je prikazano u Tablici 1. i grafički prikazano na Slici 4. Ograničenja razine I (Tier I) i razine II (Tier II) su globalna, dok se ograničenja razine III (Tier III) primjenjuju samo u područja za kontrolu emisije NO_X.

Tablica 1: Ograničene vrijednosti NO_X emisija [14].

Skupina	Godina	NO_X ograničenja, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Razina I	2000.	17,0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,8
Razina II	2011.	14,4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,7
Razina III	2016.	3,4	$9 \cdot n^{-0.2}$	2,96



Slika 4: Grafički prikaz smanjenja NO_X emisija [14].

Postizanje standarda Razine II očekuje se pomoću optimizacije procesa izgaranja u motoru, dok se standardi Razine III postižu posebnim metodama poput selektivnog odvajanja plinova ili recirkulacije plinova.

Vrijednost emisije za dizelski motor treba odrediti u skladu s Tehničkim dokumentom NO_X iz 2008. godine u slučaju ograničenja Razine II i Razine III. Većina motora iz Razine I certificirana je za raniju verziju Tehničkog dokumenta NO_X iz 1997. godine.

U novije vrijeme certifikacija motora odvija se u tvornicama motora gdje se provodi potrebno istraživanje prije samog početka postupka. Nakon potrebnog istraživanja motor dobiva EIAPP certifikat (eng. *Engine International Air Pollution Prevention Certificate*).

Prema Tehničkom dokumentu NO_X 2008. [15], pravilo 2.3.4 nalaže da svaki brodski dizelski motor ugrađen na brodu mora sadržavati tehničku dokumentaciju.

Tehnička dokumentacija mora sadržavati:

1.) Identifikaciju onih komponenata, postavki i radnih vrijednosti motora koji utječu na njegove emisije NO_X, uključujući bilo koji uređaj ili sustav za smanjenje NO_X,

2.) Utvrđivanje cijelog niza dopuštenih podešavanja ili alternativnih dijelova za dijelove motora,

3.) Cjeloviti zapis o izvedbi relevantnog motora, uključujući nazivnu brzinu i nazivnu snagu motora,

4.) Sustav NO (eng. *nitric oxide*) na brodu, postupci verifikacije za usklađenost s NO-om,

5.) Kopiju relevantnih podataka o ispitivanju matičnog motora,

6.) Ako je primjenjivo, oznaku i ograničenje za motor koji pripada obitelji ili grupe motora,

7.) Specifikacije rezervnih dijelova / komponenata koji će rezultirati kontinuiranom usklađenošću motora s primjenjivim ograničenjem emisije NO,

8.) EIAPP certifikat, prema potrebi.

Od listopada 2010. svi motori se ispituju metodama koje su navedene u Tehničkom NO_X dokumentu 2008.

Ključni dokument u postupku provjere parametara je evidencija zapisa parametara motora. Evidencija zapisa parametara motora sadrži sve promjene koje utječu na određene parametre motora, uključujući podešavanja, zamjenu dijelova i preinake dijelova motora. Ovi se opisi dopunjuju svim ostalim primjenjivim podacima koji se koriste za procjenu emisija NO.

Provjera motora provodi se po završetku proizvodnje i naknadno kao dio cjelokupnog postupka pregleda broda.

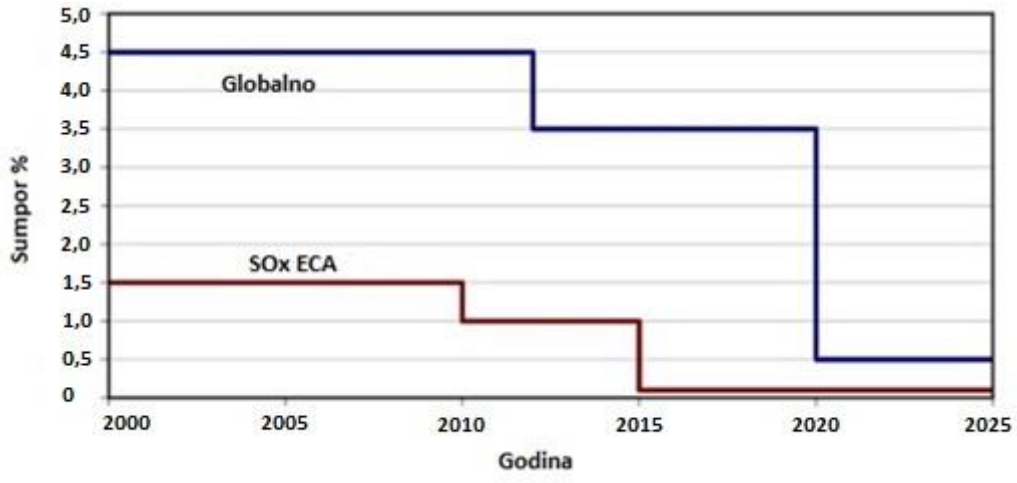
Uz to, postoji slučaj kada je dizelski motor podvrgnut značajnoj preinaci. Za motore ugrađene na brodove na dan ili nakon 1. siječnja 2000. godine, značajna preinaka podrazumijeva svaku preinaku motora koja bi potencijalno mogla dovesti do toga da motor premaši primjenjivu granicu emisije. Redovita zamjena dijelova motora, dijelovima navedenim u tehničkoj dokumentaciji koja ne mijenja svojstva emisije, neće se smatrati značajnom preinakom. Za motore ugrađene na brodove na dan ili nakon 1. siječnja 2000. godine, mjerodavna su pravila Razine II i Razine III iz gore navedene tablice, dok je za motore ugrađene u brodove prije 1. siječnja 2000. mjerodavno pravilo Razine I.

2.7. SO_X emisije

Mjere prevencije SO_X emisije, a indirektno i emisije PM čestica, regulirane su odredbama o sadržaju sumpora u 14. MARPOL Prilog VI regulativi (MEPC 176(58)) [16]. Kontrole emisije SO_X primjenjuju se na sva loživa ulja, na opremu i uređaje za izgaranje na brodu i stoga uključuju glavne i sve pomoćne motore, zajedno s elementima poput kotlova [17]. Emisije SO_X kontroliraju se u dva područja: unutar i izvan ECA uspostavljenih zbog ograničavanja emisije SO_X. Unutar ECA primjenjuju se specijalne kvalitete goriva i sadržaja sumpora, kako bi se smanjilo zagađenje SO_X česticama. Ograničenja sumpora i datumi primjene navedeni su u Tablici 2 i prikazani na Slici 5.

Tablica 2: Ograničenja sumpora u gorivu [14].

Godina	Ograničenje sumpora u gorivu	
	SOx ECA	Globalno
2000.	1,5%	4,5%
2010.	1,0%	
2012.		3,5%
2015.	0,1%	
2020.		0,5%



Slika 5: Grafički prikaz ograničenja sumpora u gorivu [14].

Teško loživo ulje (HFO) dopušteno je pod uvjetom da ispunjava primjenjivu granicu. Brodovi koji plove unutar i izvan ECA primjenjivati će različita goriva kako bi udovoljili odgovarajućim standardima. U takvim slučajevima, prije ulaska u ECA, potrebno je u potpunosti prijeći na

upotrebu mazuta koji je u skladu s propisima. Pri svakom prebacivanju potrebno je evidentirati količine loživog ulja, zajedno s vremenom, datumom i položajem broda. Ti se zapisi trebaju unositi u brodski dnevnik kako je propisala država zastave broda.

Prilikom skladištenja loživog ulja na brod, mora se znati stvarna količina sumpora u loživom ulju. Vrijednost stvarne količine sumpora treba navesti dobavljač loživog ulja. Brodska posada mora osigurati da se ne miješaju loživa ulja koje se koriste u ECA s drugim loživim uljima s većim udjelom sumpora, kako se ne bi premašile granice SO_X emisije u kontroliranim područjima.

Dopuštene su i alternativne mjere za smanjenje emisije sumpora. Mjere se mogu podijeliti u dvije kategorije: primarne (u kojima se izbjegava stvaranje onečišćujuće tvari) i sekundarne (u kojima se onečišćujuća tvar stvara, ali naknadno uklanja do određenog stupnja prije ispuštanja ispušnih plinova u atmosferu). Mjere za smanjenje emisije sumpora primjenjuju se uz dopuštenje Uprave. Od listopada 2010. ne postoje smjernice za primarne mjere, dok su za sekundarne mjere usvojene smjernice (MEPC.259 (68)) za sustave za pročišćavanje ispušnih plinova.

3. VODIK

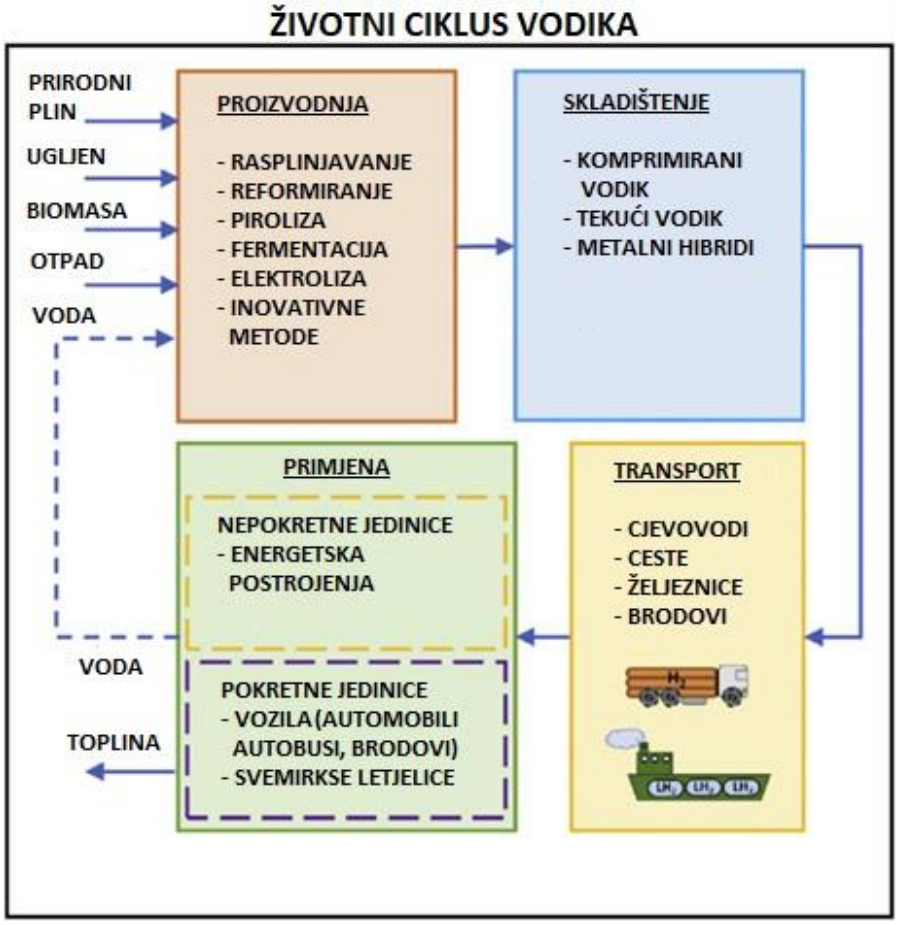
Vodik je kemijski element s atomskim brojem 1 i relativnom atomskom masom od 1,0079 te je prvi u nizu elemenata periodnog sustava [18]. Na Zemlji je u plinovitom stanju raširen u neznatnim količinama (u atmosferi, prirodnom plinu, ekshalacijama vulkana i dr.), ali se pojavljuje u cijelom nizu spojeva: sastojak je vode i hidrata, kiselina i baza, hidrida, te ugljikovodika i gotovo svih ostalih organskih spojeva [19].

Vodik je najlakši od svih plinova, 14,4 puta lakši od zraka. Također, netoksičan i bezbojan. Među kemijskim elementima pokazuje najveću sposobnost difuzije pa ga neki elementi, posebno platinski metali, mogu apsorbirati u velikim količinama. Vodik je lako zapaljivo gorivo; smjesa vodika i kisika (plin praskavac) dovoljno zagrijana reagira eksplozivno, tvoreći vodu uz razvijanje velike količine topline. Smjesa vodika i klora eksplodira čim se izvrgne svjetlosti, a smjesa vodika s fluorom eksplodira i u mraku. S ostalim elementima vodik reagira tek uz zagrijavanje ili uz prisutnost katalizatora. Općenita fizikalna i kemijska svojstva vodika prikazana su u Tablici 3.

Tablica 3: Fizikalna i kemijska svojstva vodika.

Gustoća u plinovitom stanju	0,09 kg/m^3
Gustoća u tekućem stanju	70,9 kg/m^3
Temperatura isparavanja	-253°C pri 1bar
Donja ogrjevna moć	121 MJ/kg
Gornja ogrjevna moć	141,8 MJ/kg

Vodik se danas najviše koristi u kemijskoj industriji i rafineriji. Može se proizvesti na različite načine kao npr. procesi reformiranja, elektroliza itd. Nakon proizvodnje, vodik zahtijeva sigurno skladištenje i prijevoz, kako bi se kasnije koristio u razne svrhe. Vodik se upotrebljava još i kao pogonsko gorivo za automobile i brodove. Izgaranjem vodika, u kombinaciji s kisikom, nastaje voda te se ta voda može ponovno iskoristiti za proizvodnju vodika postupkom elektrolize. To sve predstavlja životni ciklus vodika koji je prikazan na Slici 6 [20].



Slika 6: Životni ciklus vodika [20].

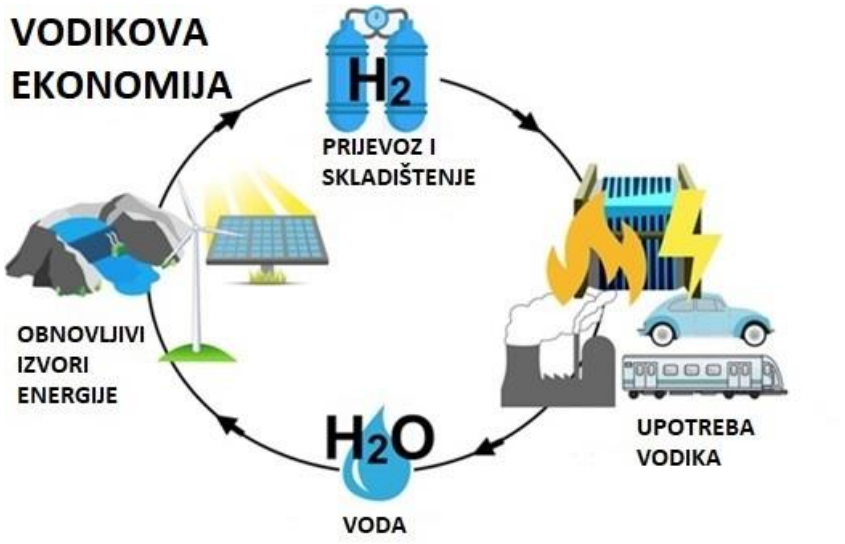
3.1. Vodikova ekonomija

Termin "vodikova ekonomija" vezan je uz ideju promjene svjetske ekonomije ovisne o nafti u onu temeljenu na vodiku. Primarni cilj vodikove ekonomije je da se vodik proizvodi iz obnovljivih izvora energije koji su lako dostupni, s ciljem zamjene dosadašnjih fosilnih goriva. Glavni razlog je onečišćenje okoliša stakleničkim plinovima koji su nusprodukt izgaranja fosilnih goriva. Korištenje fosilnih goriva za dobivanje energije dovelo je do velikih globalnih problema, tj. globalnog zatopljenja, povećanja stakleničkih plinova, porasta razine mora, iscrpljivanja prirodnih resursa itd.

Gospodarstvo temeljeno na vodiku podrazumijeva i uključuje tehnologije [21]:

- Proizvodnja vodika,
- Skladištenje i prijevoz vodika,
- Upotreba vodika.

Vodik kao energent izvanrednih karakteristika mogao bi sve to promijeniti. Kao gorivo potpuno je čist, neograničeno pristupačan i dostiživ za zemlje koje danas nemaju pristup energiji [22]. Na Slici 7 prikazan je plan primjene vodikove ekonomije [23].

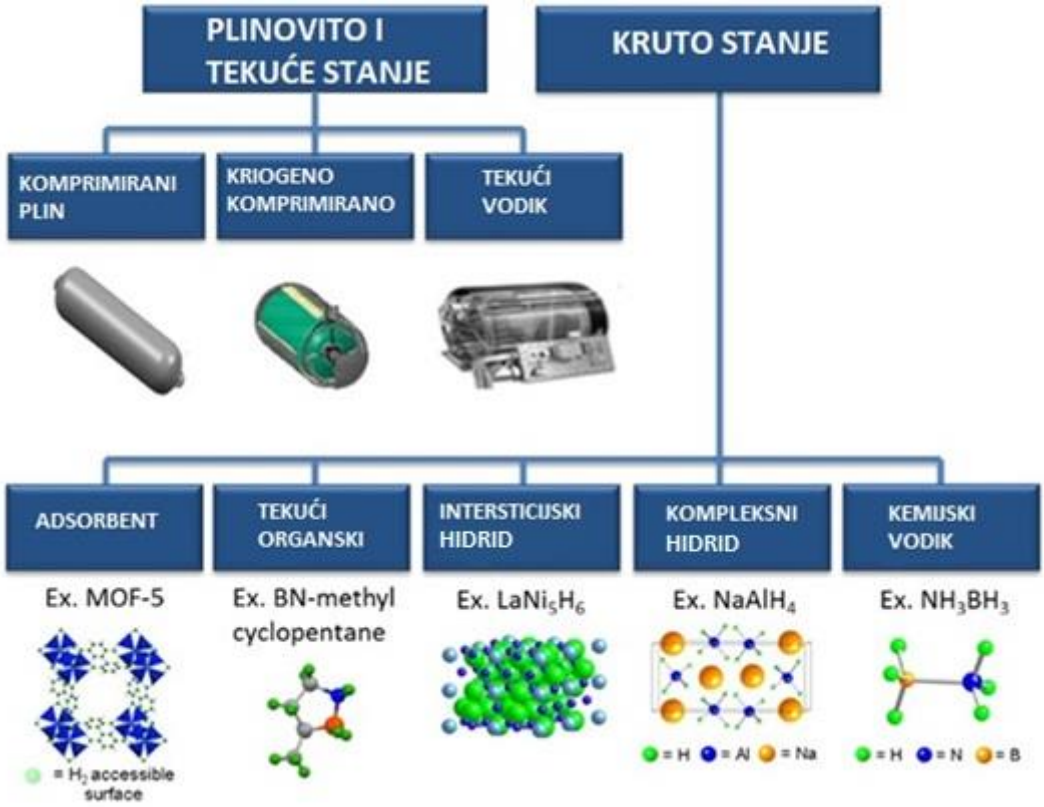


Slika 7: Vodikova ekonomija [23].

3.2. Skladištenje vodika

Skladištenje vodika važan je aspekt vodikove ekonomije bitan za razvoj budućeg gospodarstva. Zahtjevi za skladištenje vodika na brodu su niski radni tlak i temperatura, brzo punjenje spremnika, zanemarivo odvođenje topline i gubici energije prilikom punjenja i pražnjenja spremnika, reverzibilnost, afinitet na kisik i vlagu, niski troškovi infrastrukture i sigurnost u radnim uvjetima [22].

Postoje tri sustava za skladištenje: sustav skladištenja u plinovitom, tekućem i krutom stanju. Za razliku od skladištenja u plinovitom i tekućem stanju, sustav skladištenja u krutom stanju temelji se na tome da se čestice vodika apsorbiraju u krutinama, kao npr. metalni hidridi. Na Slici 8 prikazani su načini skladištenja vodika [24].



Slika 8: Načini skladištenja vodika [24].

3.2.1. Sustav skladištenja vodika u plinovitom stanju

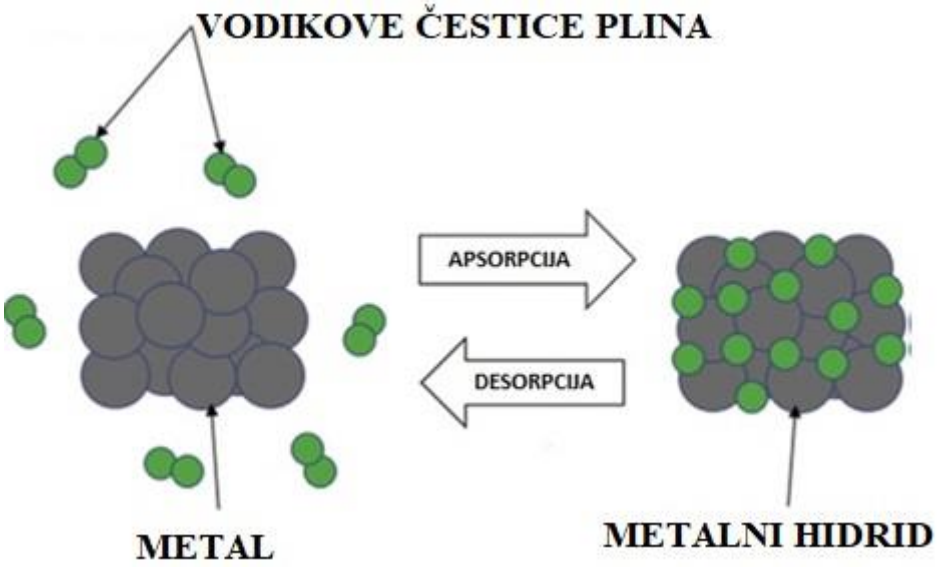
Najkorišteniji sustav skladištenja vodika je skladištenje u plinovitom stanju. Obzirom da vodik ima malu gustoću, mora se skladištiti pod visokim tlakom između 350 i 700 bara [25]. Kao materijali spremnika koriste se čelik i aluminij. Može se koristiti i plastični kompozit ojačan karbonskim vlaknima s odgovarajućom čvrstoćom i otpornošću na udarce, ali je preskup pa se izbjegava njegovo korištenje. Istražuju se i druge opcije koje su ekonomičnije i praktičnije. Ako je količina vodika koju treba pohraniti velika ili je vrijeme trajanja skladištenja dugo, vodik bi se mogao pohraniti u velikim podzemnim skladištima u prikladnim geološkim formacijama kao solne kaverne [22].

3.2.2. Sustav skladištenje vodika u tekućem stanju

Druga metoda skladištenja vodika je skladištenje u tekućem stanju. Vodik se skladišti u kriogenim spremnicima na temperaturi -252,87 °C i pri tlaku od 1,013 bara [26]. Za takvo skladištenje vodika potrebni su spremnici s dobrom izolacijom, kako bi se mogla održavati željena temperatura u spremniku. Takav način skladištenja je energetski zahtjevan [22].

3.2.3. Sustav skladištenja vodika u krutom stanju

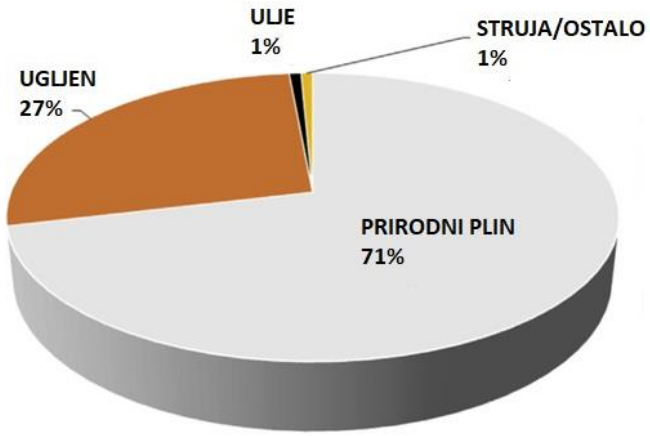
Sustavi skladištenja vodika u plinovitom i tekućem stanju imaju neke nedostatke. Trenutni nedostaci su problemi sigurnosti takvih sustava i veliki troškovi. Zbog toga se sve više pažnje posvećuje sustavima skladištenja vodika u krutom stanju. Sustavi skladištenja vodika u krutom stanju temeljeni na metalnim hidridima pokazali su velike potencijale u smislu sigurnosti skladištenja. Metalni hidridi nastaju međusobnim djelovanjem vodika s različitim metalima, što rezultira skladištenjem u čvrstom stanju pod određenim tlakom i temperaturom. Ovim načinom skladištenja moguće je reverzibilno apsorbirati i desorbirati vodik s malom promjenom tlaka, što je jedna od prednosti primjene ovog sustava. Nedostaci su niski kapacitet skladištenja, tromost sustava i neprihvatljive temperature apsorpcije i desorpcije vodika. Na Slici 9 prikazan je princip skladištenja vodika u metalnim hidridima [22].



Slika 9: Skladištenje vodika pomoću metalnih hidrida [22].

3.3. Proizvodnja vodika

Vodik se danas može proizvesti na puno načina iz različitih sirovina. Neki od njih su procesi rasplinjavanja ugljena, reformiranje prirodnog plina, elektroliza vode i tako dalje. Danas se vodik najviše proizvodi iz prirodnog plina, kao što je prikazano na Slici 10.



Slika 10: Različite sirovine za proizvodnju vodika [27].

3.3.1. Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva

U procesima proizvodnje vodika iz fosilnih goriva zagrijavaju se ugljikovodici i para, a u nekim slučajevima i zrak ili kisik. Nakon zagrijavanja se odvode u reaktor. Vodik se dobiva razgradnjom vode i ugljikovodika. Druga metoda razgradnje ugljikovodika na vodik i ugljik je razgradnja bez prisutnosti pare ili zraka [28].

3.3.1.1. Rasplinjavanje ugljena

Ugljen je složena i vrlo varijabilna tvar koja se može pretvoriti u razne proizvode [29]. Ugljen se zagrijava do 900 °C. Pri toj temperaturi ugljen prelazi u plinovito stanje, zatim se miješa s parom i kisikom te prolazi kroz katalizator na bazi nikla. Ova metoda je manje poželjna jer zahtijeva visoke temperature i stvara onečišćenja (oslobađa velike količine ugljikovog monoksida (CO). Ukupno se ovim postupkom dobiva 18% vodika. Rasplinjavanje se odvija u spremnicima visokog tlaka, gdje su kisik (ili zrak) i para izravno u kontaktu s ugljenom ili drugim krutim sirovinama uzrokujući niz kemijskih reakcija koje pretvaraju sirovinu u sintetički plin. Taj plin se sastoji uglavnom od bezbojnog i lako zapaljivog CO, vodika (H_2) i ostatka pepela, odnosno troske.

3.3.1.2. Reformiranje pare

Reformiranje pare najraširenij je postupak za proizvodnju sintetskog plina bogatog vodikom [30]. Temeljni postupak je dobivanje vodika i ugljikovih oksida reakcijom pare i ugljikovodika u prisutnosti katalizatora na bazi nikla pri temperaturama od 750-1000 °C. Mješavina plina sadrži višak CO pa se zbog toga se ugljikov monoksid u smjesi pretvara u vodik i ugljikov dioksid. Postoje razni postupci za uklanjanje ugljikovih dioksida koji nastaju u reakcijama. To

su metode apsorpcije, adsorpcije i membranskog odvajanja. Razne sirovine mogu se koristiti u proizvodnji vodika postupcima reformiranja parom. To su prirodni plin (metan), metanol, ukapljeni prirodni plin, benzin, etanol, i destilati dobiveni Fischer-Tropschovim (FT) postupkom.

3.3.1.2.1. Reformiranje pare prirodnog plina (metana)

To je endotermni postupak koji koristi vodenu paru. Međutim, endotermna reakcija neizmjerno je složena jer zahtijeva toplinsku energiju iz vanjskog izvora. Postupak se provodi dodavanjem pare metanu, na temperaturi od 700–1000 °C u kataliziranom reaktoru pod tlakom 3-25 bara [31].

3.3.1.2.2. Reformiranje ukapljenog naftnog plina

Ovaj postupak gotovo je identičan postupak pretvorbi prirodnog plina. Ukapljeni naftni plin (eng. *Liquefied Petroleum Gas*, LPG) se zagrijava na 380 °C i pročišćava prolaskom kroz kobaltni molibden katalizator i sloj cinkovog oksida. Zatim se LPG pomiješa se s parom te se zagrijavanja na 480 °C. Nakon zagrijavanja na 480 °C ulazi u pretvarač kataliziran niklom i dobiva se vodik uz pomoć ugljikovog monoksida. Nakon izlaska iz reaktora, mješavina se hladi sa 800 °C na 350 °C. Nakon hlađenja šalje se u drugi reaktor kataliziran željezom. CO i para pretvaraju se u vodik i CO_2. Preostali CO i druge nečistoće prolaze kroz jedinicu za pročišćavanje i dobiva se H_2 čistoće 99,9995%.

3.3.1.2.3. Reformiranje metanola

Metanol ima nisko vrelište, visok omjer vodika i ugljika pa se stoga može reformirati na relativno niskoj temperaturi, smanjujući rizik od stvaranja koksa tijekom reakcije [32]. Para se ne koristi u prvoj fazi reakcijskog procesa fragmentacije metanola u vodik i ugljikov dioksid. Para ili voda koriste se samo za razgradnju vode u vodik pomoću ugljikovog monoksida. Postupak se odvija na temperaturi od 300 °C. Postupak se sastoji od nekoliko koraka, poput miješanja metanola i demineralizirane vode, zagrijavanja i isparavanja mješavine, uklanjanja kondenzata i pročišćavanje plina. Učinkovitost dobivanja vodika ovim postupkom je oko 80%.

3.3.1.2.4. Reformiranje benzina

Postupak reformiranja benzina važan je za vozila koja koriste gorivne članke. Postupci reformiranja nafte i ukapljenog prirodnog plina slični su i vrše se s istim katalizatorima na istim temperaturama. Benzin se također može reformirati pod istim uvjetima.

3.3.1.2.5. Reformiranje etanola

Etanol je vrlo atraktivna sirovina zbog relativno visokog sadržaja vodika, dostupnosti, netoksičnosti i skladištenja [33]. U etanolskim reaktorima koristi se rodij-cerijev katalizator i proces se odvija na temperaturi od 700 °C. Miješanjem vodene pare, kisika i etanola dobivamo velike količine vodika. Također, dobiva se i velika količina ugljikovog monoksida, koji se mora pretvoriti u ugljikov dioksid propuštanjem kroz drugi katalizator. Na kraju procesa dobivamo približno 50% vodika, 30% dušika i 20% ugljikovog dioksida.

3.3.1.3. Fischer-Tropschova sinteza (FT)

Fischer-Tropschova sinteza je skup kemijskih reakcija kojim se sintetski plin pretvara u kapljevite ugljikovodike. Sa najopćenitijom definicijom, sintetski plin je smjesa plinova CO i H_2. Teoretski se sintetski plin može dobiti iz bilo kojeg izvora ugljikovodika. Sirovina iz koje će se dobiti sintetski plin je od velike važnosti. Razlikujemo niskotemperaturnu FT sintezu (odvija se na 230 °C) i visokotemperaturnu FT sintezu (odvija se na 340 °C). Kod niskotemperaturne FT sinteze dobivamo dugolančane ugljikovodike, a kod visokotemperaturne FT sinteze kratkolančane ugljikovodike.

3.3.1.4. Autotermalno reformiranje

Autotermalno reformiranje je postupak za dobivanje sintetskog plina [34]. To je kombinacija reforimiranja plina i parcijalne oksidacije. Izlazna temperatura plina je između 950 i 1100 °C, a tlak može biti i do 100 bara. Iz nastalog vodenog plina dobiva se vodik tako što se plin pomiješa s vodenom parom i provodi kroz katalizator. Potreba za pročišćavanjem nastalih plinova značajno podiže troškove i smanjuje ukupnu učinkovitost postrojenja.

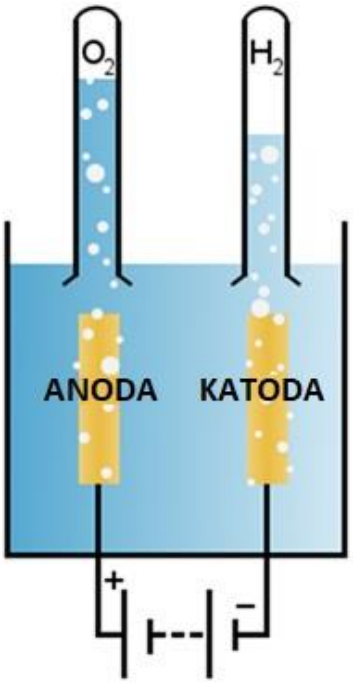
3.3.1.5. Termičko pucanje

Spojevi ugljikovodika razgrađuju se u katalizatoru zagrijavanjem na visokim temperaturama bez prisutnosti kisika, a kao rezultat nastaju vodik i ugljik. Najpovoljniji aspekt ove vrste procesa jest nepostojanje emisija stakleničkih plinova.

3.3.2. Proizvodnja vodika iz vode

Voda je vrlo bogat izvor vodika. Prednost korištenja vodika kao goriva je ta što je nusprodukt izgaranja vodika i kisika iz zraka voda. To znači da je vodik obnovljiv izvor energije. Vodik se može dobiti iz vode elektrolizom, toplinskim raspadanjem i termokemijskom razgradnjom vode. Elektroliza je postupak koja predstavlja najučinkovitiju tehniku razdvajanja vode. Osnovni dijelovi za elektrolizu su katode i anode koje su uronjene u elektrolit. Primjenom

električne struje, voda se razdvaja na vodik i kisik [35]. Vodik se stvara na strani katode, dok se kisik stvara na strani anode, kao što je prikazano na Slici 11 [36].



Slika 11: Elektroliza vode [36].

Procesi toplinskog raspadanja odvijaju se na visokim temperaturama. Na temperaturi 1400 °C ili više, molekule pare počinju se razgrađivati u plinove vodika i kisika. Potrebno je povećati temperaturu na 2500–3000 °C da bi se dobio vodik koji odgovara industrijskoj upotrebi.
U termokemijskoj razgradnji vode, voda i reaktanti podvrgavaju se kemijskim promjenama na visokim temperaturama. Reaktanti korišteni u tim promjenama mogu se koristiti više puta. Glavni koraci ovog postupka su proizvodnja topline i električne energije, termokemijska razgradnja vode te pročišćavanje dobivenog vodika i kisika.

3.3.3. Proizvodnja vodika na bazi biomase

Vodik se može dobiti termičkim rasplinjavanjem biomase kao što je otpad od drveća u šumama, slame, kruti otpad u stambenim naseljima i tako dalje.
Proizvodnja vodika na bazi biomase može se klasificirati u tri kategorije:

- Termokemijska proizvodnja vodika iz biomase,
- Proizvodnja vodika pirolizom biomase,
- Proizvodnja vodika rasplinjavanjem biomase.

3.3.3.1. Termokemijska proizvodnja vodika iz biomase

Proizvodnja vodika iz biomase nalikuje proizvodnji vodika iz fosila goriva. U početku se plin sastoji od H_2, CO i CH_4. Zatim se metan pretvara u vodik i ugljikov monoksid procesom reformiranja pare. Nusproizvod plina u procesu je CO_2, ali je zbog iznimno male prisutnosti zanemariv.

3.3.3.2. Proizvodnja vodika pirolizom biomase

Piroliza je termička razgradnja organske tvari, odnosno biomase u anaerobnim uvjetima, odnosno uvjetima bez prisustva kisika. Ovim postupkom dobiva se tekućina slična nafti koja se naziva bio-ulje. Pomoću ovog postupka možemo dobiti razne elemente, uključujući i vodik. Nečistoće dobivene postupkom su sumporovodik (H_2S), CO_2, cijanovodična kiselina (HCN), Ni/Fe karbonili, ugljik i pepeo.

3.3.3.3. Proizvodnja vodika rasplinjavanjem biomase

Rasplinjavanje biomase je postupak dobivanja vodika u kontroliranim uvjetima koji uključuje toplinu, paru i kisik za pretvaranje biomase u vodik i druge proizvode [37]. Rasplinjavanje biomase odvija se na visokim temperaturama (preko 725 °C). Djelomičnom oksidacijom biomase nastaju plin i ugljen. Ugljen se na kraju pretvara u H_2, CO, CO_2 i CH_4.

Rasplinjavanje biomase odvija se uz prisutnost kisika (O_2). Da bi se mogao provesti proces rasplinjavanja biomase, udio vlage mora biti minimalno 35%. Jedan od značajnih problema rasplinjavanja biomase je stvaranje katrana tijekom procesa. Postoji nekoliko metoda za uklanjanje katrana. Najučinkovitiji način je korištenje aditiva kao npr. dolomita. Njegovim korištenjem uklanja se 100% katrana. Učinkovitost ovog postupka je do 60%. Ova visoka učinkovitost čini metodu rasplinjavanja biomase privlačnom alternativom u proizvodnji vodika. Osim toga, metode proizvodnje vodika iz biomase slične su cijenama s metodama pretvorbe prirodnog plina. Također, potrebno je još napomenuti kako je ovaj postupak ekološki prihvatljiv.

3.3.4. Biološka proizvodnja vodika

Za biološku proizvodnju vodika koriste se mikroalge i bakterije. U prirodnom okruženju vodik nastaje tijekom anaerobne pretvorbe organske tvari. Međutim, taj vodik se ne može upotrijebiti jer ga koriste metanske bakterije. Proizvodnja vodika ovisna je o prisutnosti enzima kao što su hidrogenaze i nitrogenaze koji proizvode vodik. Biološku proizvodnju vodika možemo podijeliti u dvije skupine. To su procesi koji su ovisni o svjetlu i procesi koji nisu ovisni o

svjetlu. U procese koje ovise o svjetlu spadaju izravna i neizravna fotoliza, foto-fermentacija, dok je proces koji ne ovisi o svjetlu tamna fermentacija [28].

3.3.4.1. Izravna biofotoliza

Izravna biofotoliza biološki je postupak koji uključuje upotrebu mikroalgi (cijanobakterija i eukariotskih mikroalgi) za proizvodnju vodika iz sunčeve svjetlosti i vode. Proces se odvija u aneorobnim uvjevima [28].

3.3.4.2. Neizravna biofotoliza

U neizravnoj biofotolizi osjetljivost procesa uklanja se međusobnim odvajanjem O_2 i H_2. Alge omogućuju zadržavanje CO_2 u ugljikohidratima, a daljnjim procesom tamne fermentacije proizvodi se H_2. Također, mnoge vrste algi i cijanobakterija mogu proizvoditi enzime koji omogućuju stvaranje vodika vezanjem dušika iz atmosfere [28].

3.3.4.3. Foto-fermentacija

Riječ je o procesu u kojem fotosintetske bakterije uzimaju organske kiseline i alkohole kao supstrat i stvaraju H_2. S ljubičastim bakterijama bez sumpora, proizvodnja vodika uglavnom ovisi o solarnoj energiji i reduciranim spojevima (organskim kiselinama) [28].

3.3.4.4. Tamna fermentacija

Tamna fermentacija je proces koji se odvija u anoksičnim i anaerobnim uvjetima. Nedostatak ovog procesa je niska brzina proizvodnje vodika i gubitak termodinamičke stabilnosti na kraju procesa [28].

3.3.5. Proizvodnja vodika iz otpadnih plinova

Za dobivanje vodika iz otpadnih plinova mogu se primijeniti različiti postupci, kao na primjer kriogena destilacija, apsorpcija, adsorpcija i odvajanje membrane [28].

3.3.5.1. Kriogena destilacija

Kriogena destilacija je postupak odvajanja koji se izvodi na niskim temperaturama. Najjednostavniji i najčešće korišten kriogeni postupak je postupak djelomične kondenzacije. Smjesa se dovodi u kriogenu jedinicu i proces se odvija pri tlaku od 20-80 bara [28].

3.3.5.2. Proces apsorpcije

Apsorpcija plinova je kemijski proces gdje se iz plinovitih smjesa odvajaju pojedine čestice [38]. Znatne su količine vodika u strujama otpadnih plinova koji se koriste kao gorivo i koji se iscrpljuju iz rafinerija i petrokemijske industrije. Te struje plinova se mogu koristiti za

proizvodnju vodika. Princip rada ovog postupka je odvajanje metana i težih ugljikovodika iz plinova koji sadrže vodik pomoću odgovarajućeg otapala. U tu svrhu koriste se metode čišćenja pomoću vode i apsorpcije polietilen glikolom. Uklanjanje CO_2 pomoću vode pod tlakom jednostavna je i isplativa metoda. Ova se metoda temelji na maloj topljivosti H_2 u vodi. Metoda apsorpcije polietilen glikolom fizikalni je postupak sličan metodi separaciji vode.

3.3.5.3. Proces adsorpcije

Adsorpcija se definira kao taloženje molekularnih tvari na površinu [40]. Uobičajeni postupci adsorpcije su PSA (eng. *Pressure Swing Adsorption*) i TSA (eng. *Thermal Swing Adsorption*) tehnologije. PSA je tehnologija pročišćavanja plina. PSA tehnologija ima široko područje primjene u proizvodnji i pročišćavanju kisika, dušika i vodika. Među adsorpcijskim tehnologijama, postupak PSA privukao je veliki interes za odvajanje i zaustavljanje CO_2 iz plinskih smjesa zbog niskoenergetske potrebe i niskih troškova ugradnje. Komercijalno dostupni adsorbenti osjetljivi su na vlagu u smjesi plinova, stoga je potrebna oprema koja omogućuje uklanjanje vlage.

TSA je druga metoda adsorpcije koja se koristi za odvajanje nečistoća od struje plina. Iako je TSA učinkovit postupak pročišćavanja, nedostatak je dugo trajanje grijanja i hlađenja, pa se završetak mnogih ciklusa ne može izvršiti u potrebnom vremenu. Međutim, to je prikladan postupak za uklanjanje nečistoća u malim količinama koje se adsorbiraju silom.

3.3.5.4. Membranska separacija

Membranska separacija je alternativni postupak kriogenim i PSA sustavima za odvajanje. Postoje dvije vrste membrana, a to su organske i anorganske membrane. Organske membrane mogu se klasificirati kao polimerne i biološke membrane, a anorganske kao metalne i keramičke membrane [28].

Prednosti membranske separacije:

- Niskoenergetske potrebe,
- Kontinuirani postupak odvajanja,
- Jednostavno skaliranje, može biti u bilo kojoj veličini,
- Nisu potrebni aditivi,
- Može se koristiti s drugim sustavima za odvajanje.

Nedostaci membranske separacije:

- Problem onečišćenja,
- Kratak životni vijek trajanja membrane,
- Mala brzina protoka.

3.3.5.5. Postupak membranskog kontaktora

Postupak membranskog kontaktora je postupak uklanjanja specifične komponente u smjesi plinova. Proces se odvija bez primjene tlaka. U ovom procesu, tehnologija apsorpcije u sustavu kombinirana je s tehnologijom membranske separacije. Postupak membranskog kontaktora omogućuje neovisnu kontrolu brzine protoka plina i tekućine. Protoci plina i tekućine dobro su odvojeni membranama [28].

3.3.6. Troškovi proizvodnje vodika

U Tablici 4 prikazani su troškovi proizvodnje vodika za različite postupke dobivanja.

Tablica 4: Troškovi proizvodnje vodika [28].

Proces	Izvor energije	Sirovina	Kapitalni troškovi (M$)	Cijena vodika ($/kg)
Reformiranje pare prirodnog plina (metana) s izoliranjem i skladištenjem ugljika	Fosilna goriva	Prirodni plin	226,4	2,27
Reformiranje pare prirodnog plina (metana) bez izoliranjem i skladištenjem ugljika	Fosilna goriva	Prirodni plin	180,7	2,08
Rasplinjavanje ugljena s izoliranjem i skladištenjem ugljika	Fosilna goriva	Ugljen	545,6	1,63
Rasplinjavanje ugljena s izoliranjem bez skladištenjem ugljika	Fosilna goriva	Ugljen	435,9	1,34
Autotermalno reformiranje metana s izoliranjem i skladištenjem ugljika	Fosilna goriva	Prirodni pin	183,8	1,48
Piroliza metana	Generirana para	Prirodni plin	-	1,59–1,70

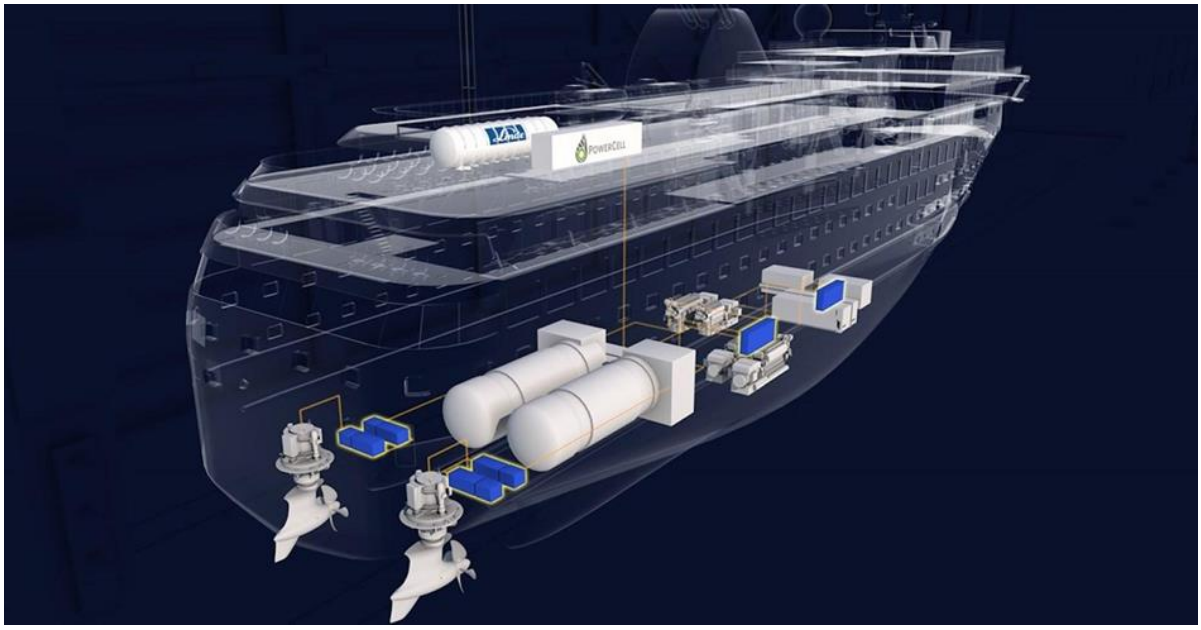
Piroliza biomase	Generirana para	Biomasa	53,4–3,1	1,25–2,20
Rasplinjavanje biomase	Generirana para	Biomasa	149,3–6,4	1,77–2,05
Izravna biofotoliza	Solarni izvori	Voda+ alge	50 $/m2	2,13
Neizravna biofotoliza	Solarni izvori	Voda+ alge	135 $/m2	1,42
Tamna fermentacija	-	Biomasa	-	2,57
Foto-fermentacija	Solarni izvori	Biomasa	-	2,83
Solarna fotonaponska elektroliza	Solarni izvori	Voda	12–54,5	5,78–23,27
Solarno termalna elektroliza	Solarni izvori	Voda	421–22,1	5,10–10,49
Elektroliza pomoću energije vjetra	Vjetar	Voda	504,8–499,6	5,89–6,03
Nuklearna elektroliza	Nuklearni izvori	Voda	-	4,15–7,00
Nuklearna temoliza	Nuklearni izvori	Voda	39,6–2107,6	2,17–2,63
Solarna termoliza	Solarni izvori	Voda	5,7–16	7,98–8,40
Fotoelektroliza	Solarni izvori	Voda	-	10,36

4. OSNOVNA KONFIGURACIJA BRODSKOG ENERGETSKOG SUSTAVA POGONJENOG VODIKOM

U novije vrijeme sve više se ulaže u tehnologije koje će u budućnosti koristiti alternativna goriva s ciljem smanjenja emisija štetnih plinova. Tako se danas razvijaju novi pogonski sustavi brodova koji će koristiti vodik kao alternativno gorivo. Osnovne komponente brodskog energetskog sustava pogonjenog vodikom su:

- Gorivni članci,
- Baterija,
- Elektromotori,
- Spremnici vodika.

Na Slici 12 prikazan je primjer broda pogonjenog vodikom s osnovnim komponentama.



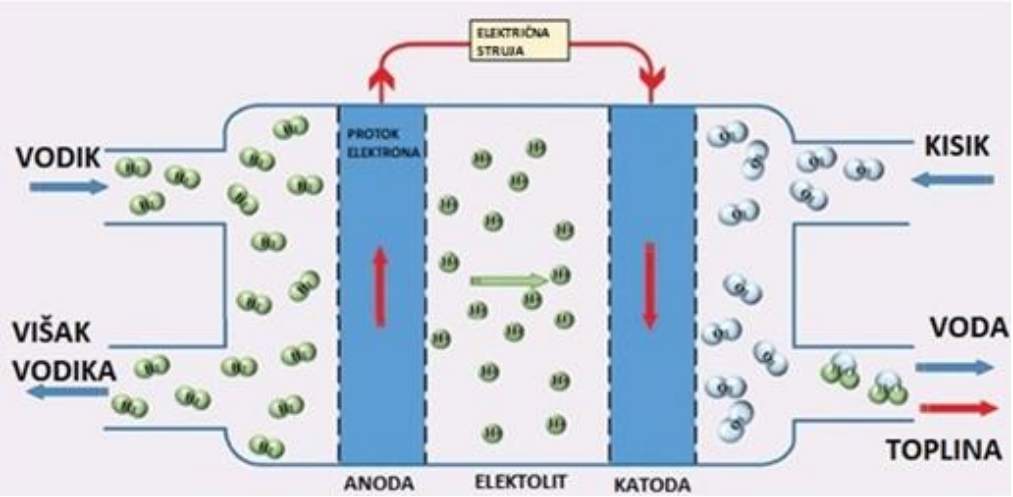
Slika 12: Brod pogonjen vodikom i njegovi osnovni dijelovi [39].

4.1. Gorivni članci

Gorivni članci su elektrokemijski uređaji koji služe za izravnu pretvorbu kemijske energije u električnu. Za razliku od dizelskog motora, gorivni članci stvaraju manje emisije NO_X zbog odsutnosti izgaranja te imaju manje mehaničkih dijelova, a rezultat toga je smanjenje buke i vibracije na brodu. Nadalje, mogućnost korištenja različitih vrsta goriva daje priliku za smanjenje SO_X i CO_2 vlasnicima brodova tijekom plovidbe u ECA zonama. U usporedbi s motorima s unutarnjim izgaranjem, gorivni članci imaju dramatično manje emisije uz veću učinkovitost. Tehnologija gorivnih članaka vrlo je obećavajuća zbog visoke energetske

učinkovitosti i niskog utjecaja zagađenja na okoliš. Gorivni članci izvanredne su inovacije za električnu energiju s velikim potencijalom za svestrane primjene.

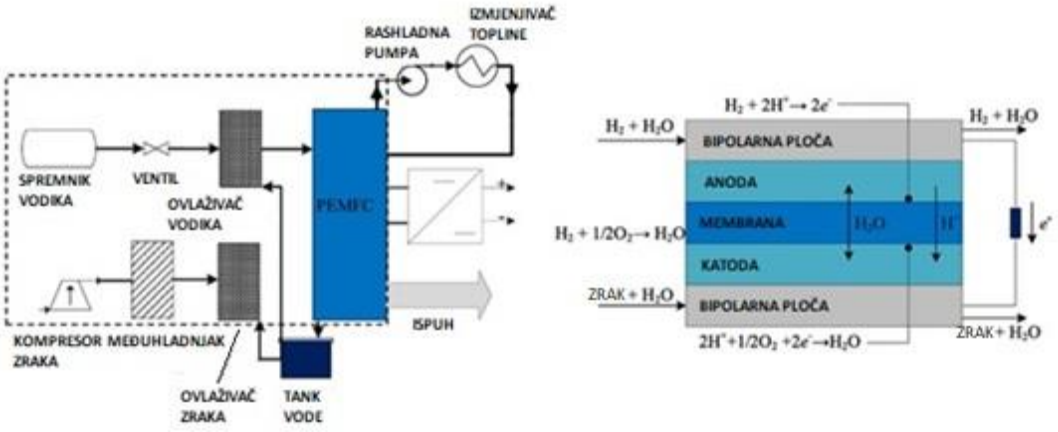
Gorivni članci mogu se klasificirati prema vrsti elektrolita, radnoj temperaturi, korištenju vrste goriva. Međutim, najčešća klasifikacija je prema vrsti elektrolita [41]. Komercijalne vrste gorivih članaka klasificiranih na osnovi elektrolita su PEMFC (eng. *Proton-exchange membrane fuel cell*), AFC (eng. *Alkaline fuel cell*), PAFC (eng. *Phosphoric acid fuel cell*), MCFC (eng. *Molten carbonate fuel cell*), SOFC (eng. *Solid oxide fuel cell*). Na Slici 17 shematski je prikaz gorivni članak.



Slika 13: Shematski prikaz gorivnog članka [42].

4.1.1. PEMFC gorivni članak

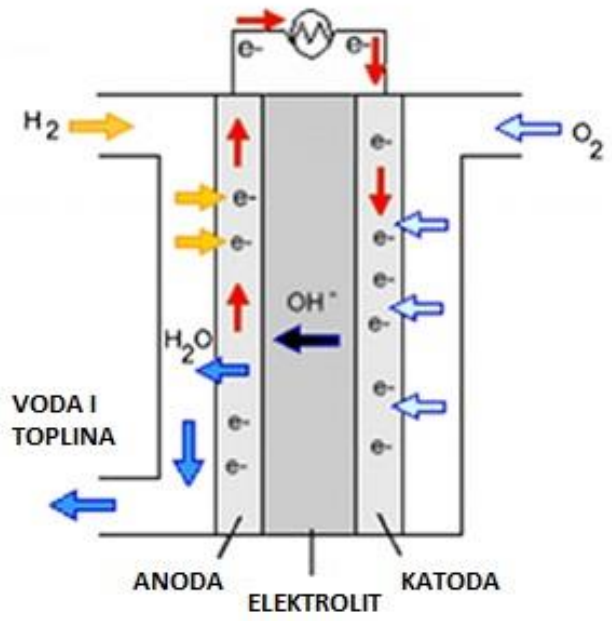
PEMFC je najfleksibilnija vrsta gorivih članaka jer ima najveći raspon primjene. Radna temperatura je obično između 65 i 85 °C te gorivni članak mora raditi ispod 100 °C zbog vode koja nastaje na katodnoj strani. Gorivni članak koristi vodik kao gorivo i uz prisutnost kisika proizvodi vodu, električnu energiju i toplinu zbog egzotermne reakcije. Članak za izmjenu protona radi pri niskim radnim temperaturama te omogućuje fleksibilan rad. Zbog niske radne temperature, PEMFC gorivni članak ima manje strože zahtjeve za materijale od kojih se izrađuje. Učinkovitost PEMFC gorivnih članaka je između 50 i 60%. Za PEMFC potrebno je koristiti čisti vodik iz razloga što je katalizator izrađen od platine te može biti otrovan ugljičnim monoksidom ako koristimo goriva koja sadrže ugljik. Nedostaci PEM gorivnih članaka su potreba za platinom kao katalizatorom, poteškoće u upravljanju vodom u ćeliji i upotreba čistog vodika kao goriva. Postoji i visokotemperaturni PEMFC gorivni članak koji radi na 200 °C. Manje je osjetljiv na goriva s ugljikom u usporedbi s konvencionalnim vrstama PEM gorivnih članaka. Zbog postizanja visoke radne temperature ova vrsta gorivnih članaka rješava problem osjetljivosti na nečistoće te problem upravljanja vodom. Viša temperatura smanjuje stvaranje nečistoća te je pojednostavljeno upravljanje vodom jer voda prelazi iz tekućeg u plinovito stanje, zbog visoke temperature. Kao gorivo moguće je koristiti dizelsko ulje, ukapljeni prirodni plin ili metanol [41]. Na Slici 14 shematski je prikazan energetski sustav s PEMFC gorivnim člankom te PEMFC gorivni članak zasebno.



Slika 14: PEMFC gorivni članak [43].

4.1.2. AFC gorivni članak

AFC gorivni članak prvi je gorivni članak koji je razvijen 1939. godine. Izlazna snaga je 1-5kW. Nedavna istraživanja ukazuju da AFC gorivni članci mogu doseći i do 200 kW snage. AFC-ov elektrolit je alkalan i za anodu koristi nikal, a za katodu srebro. Radna temperatura je ispod 100 °C. AFC gorivni članci su među najučinkovitijim vrstama gorivnih članaka, postižući do 60% učinkovitosti (do 87% kombinacijom topline) [44]. Vodik i kisik moraju biti čisti prije ulaska u gorivne članke zbog niske tolerancije na ugljikov dioksid. Elektrolit i ugljikov dioksid mogu reagirati i stvoriti krutine (nečistoće) kalijevih karbonantnih čestica. Ovo se smatra nedostatkom jer smanjuje učinkovitost AFC gorivnog članka. Ovi gorivni članci se koriste u NASA-inim svemirskim brodovima. Prednosti ovih gorivnih članaka su: niske cijene troškova, niska radna temperatura, mala veličina i masa te jednostavan princip rada. Na Slici 15 nalazi se shematski prikaz AFC [45].

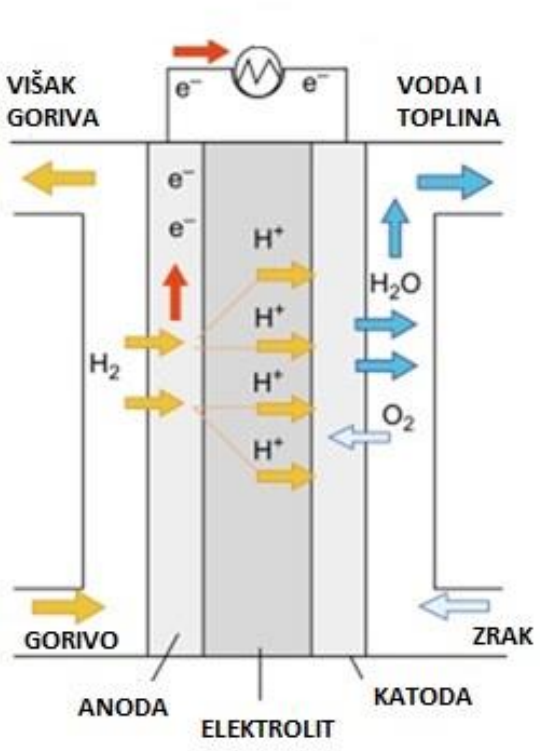


Slika 15: AFC gorivni članak [45].

4.1.3. PAFC gorivni članak

PAFC radi na visokim temperaturama između 150 i 220 °C. PAFC koristi fosfornu kiselinu u tekućem obliku kao elektrolit. Također, u ovoj vrsti gorivih članaka, gorivo koje ulazi sa strane anode ionizira se putem katalizatora. Protoni putuju na katodnu stranu kroz tekući elektrolit fosforne kiseline. Uz prisutnost kisika na katodnoj strani proizvodi se voda. Električna učinkovitost je između 38-40%, a toplinska oko 40-45%. Ukupna korisnost može doseći do 85% u kombiniranom sustavu. Izlazna snaga im je od 100-400 kW [46].

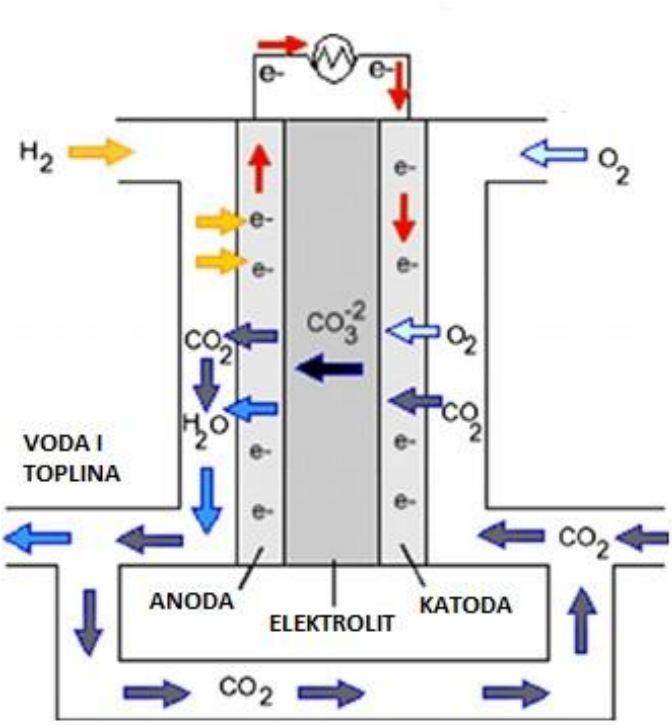
Zbog viših radnih temperatura koriste se i druga goriva koja sadrže ugljikovodike poput dizelskog goriva ili ukapljenog prirodnog plina. Prije ulaska dizelskog goriva ili ukapljenog prirodnog plina, potrebno je provesti proces reformacije goriva. Međutim, prilikom reformacije doći će do stvaranja malih količina CO_2 i NO_X. Također, visoka radna temperatura smanjuje osjetljivost na ugljični monoksid. Na Slici 16 je shematski prikaz PAFC gorivnog članka [47].



Slika 16: PAFC gorivni članak [47].

4.1.4. MCFC gorivni članak

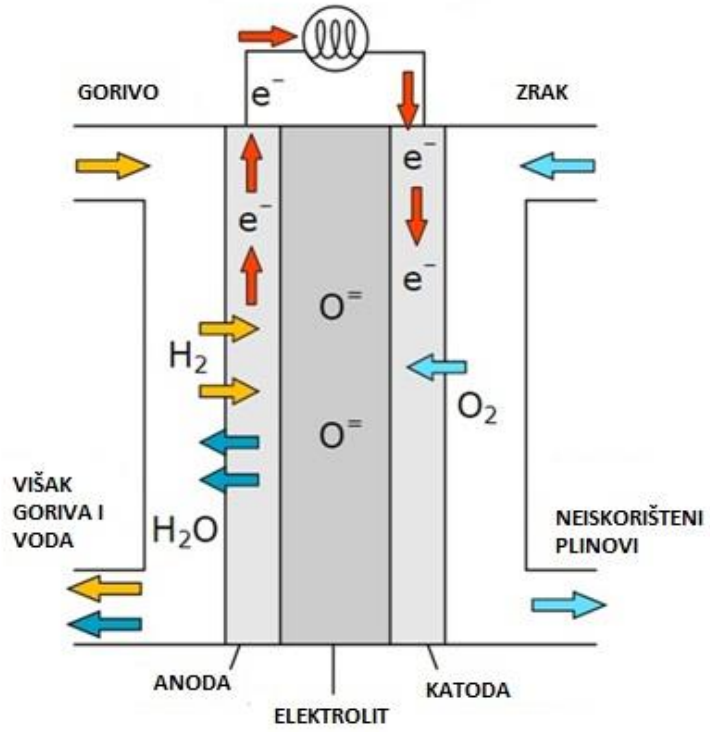
MCFC je još jedan visokotemperaturni gorivni članak [48]. Radi na temperaturama između 600 i 700 °C. Ova visoka temperatura osigurava učinkovitu vodljivost iona, a osim toga smanjuje potrebe za skupim katalizatorom kao što je platina. Elektrolit je smjesa rastopljenih karbonata alkalnih metala. Nikal na anodi i nikal-oksid na katodi koriste se kao elektrode. Zahvaljujući visokoj radnoj temperaturi MCFC gorivni članak može doseći visoku ukupnu učinkovitost. Dimni plinovi se mogu koristiti nakon izlaska iz ćelije preko plinskih ili parnih turbina. Međutim, električna učinkovitost je oko 50-60%, a ukupna učinkovitost može doseći 85%. Za razliku od PAFC-a, MCFC gorivni članak ne treba jedinicu za reformiranje ugljikovodičnih goriva jer se proces reformiranja odvija u gorivnom članku. Sporo pokretanje te pojavljivanje korozije i pucanja komponenata zbog visokih radnih temperatura smatraju se nedostatkom MCFC gorivnog članka. Na Slici 17 nalazi se shematski prikaz MCFC gorivnog članka [49].



Slika 17: MCFC gorivni članak [49].

4.1.5. SOFC gorivni članak

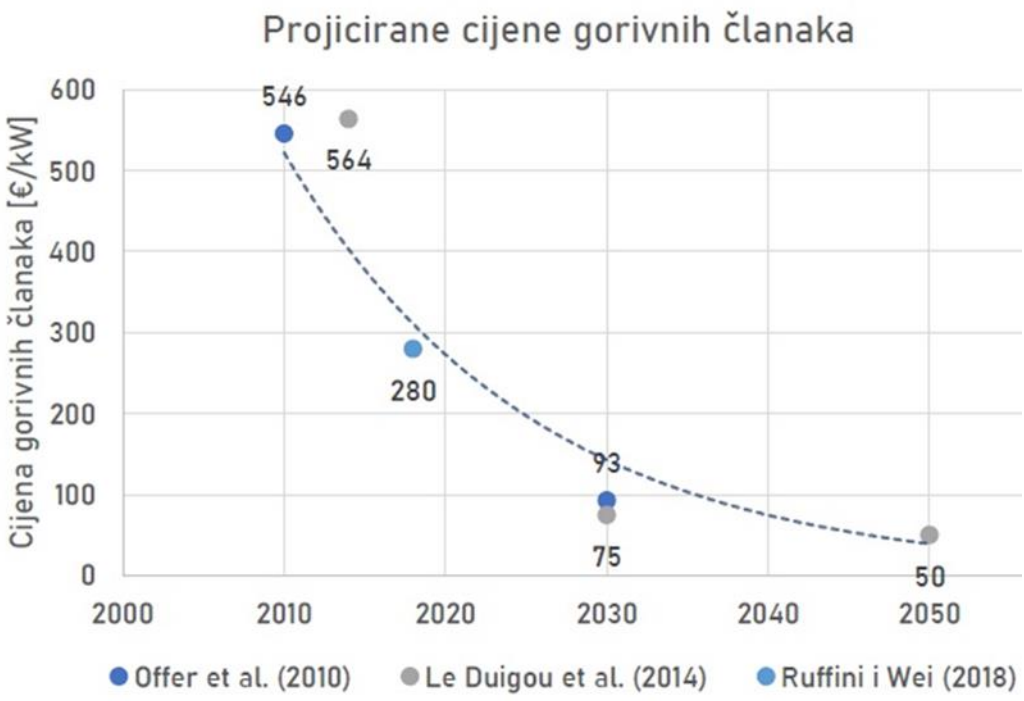
SOFC gorivni članak radi na visokim radnim temperaturama između 800 i 1000 °C. Električna učinkovitost SOFC gorivnog članka je između 50 i 60%, ali zbog visoke temperature može se iskoristiti toplina pa učinkovitost može doseći 75-80%. Zahvaljujući visokoj temperaturi, SOFC gorivni članak ne treba skupe katalizatore kao PEMFC. Najvažnija prednost SOFC-a je visoka učinkovitost. Također, SOFC ima mogućnost korištenja različitih goriva kao što su amonijak, metanol, vodik. Na Slici 18 prikazan je primjer SOFC gorivnog članka.



Slika 18: SOFC gorivni članak [50].

4.1.6. Trošak

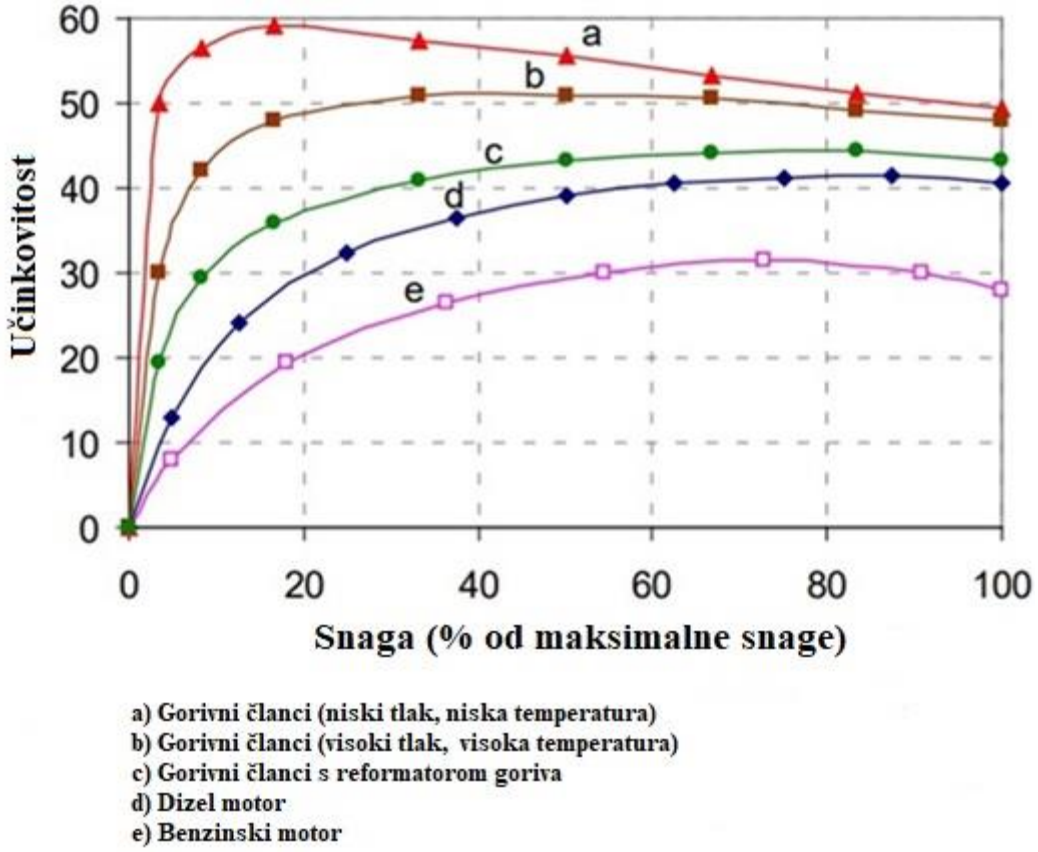
Trenutno gorivni članci imaju veći udio troška u usporedbi s dizelskim motorima. Američko ministarstvo energetike predviđa da će se izravni troškovi vodikovih PEM-ovih gorivnih članaka smanjiti za gotovo 45 USD/kW, kada se proizvode u količini od 100 000 jedinica godišnje i 45 USD/kW pri količini od 500 000 jedinica godišnje od 2020. do 2025. U budućnosti bi cijene gorivnih članaka trebale padati, kao što je prikazano na Slici 19. Troškovi su podijeljeni u dvije kategorije: kao kapitalni izdaci (CapEx) i operativni izdaci (OpEx) tijekom primjene gorivih članaka na brodu. CapEx je investicijski trošak koji uključuje jedinicu gorivih članaka, skladište goriva i dijelove sustava kao što su kompresori, pumpe, cjevovodi i sigurnosni sustavi. Opcije goriva za gorivne članke uglavnom su vodik, ukapljeni prirodni plin i dizelsko ulje. Dizelsko ulje već je godinama jedno od glavnih logističkih goriva za otpremu. Za vodik je trenutno problem što su proizvodnja, skladištenje, kompresija i prijevoz skuplji od konvencionalnog sustava za skladištenje goriva. OpEx su operativni troškovi, koji uključuju troškove održavanja i trošak goriva. U današnje vrijeme, skladištenje vodika nije uobičajena primjena za komercijalne brodove jer su troškovi veliki [41].



Slika 19: Projicirane cijene gorivnih članaka [51], [52], [53].

4.1.7. Učinkovitost

Učinkovitost gorivih članaka veća je od konvencionalnog dizelskog motora. Gorivni članci imaju ukupnu električnu učinkovitost između 50 i 65%. Učinkovitost se može povećati kod visokotemperaturnih gorivnih članaka kao što su SOFC i MCFC gorivni članci. Ispušnih plinovi mogu se iskoristiti putem plinskih ili parnih turbina. U ovom slučaju ukupna učinkovitost sustava može doseći do 70-80%. Na Slici 20 prikazan je dijagram učinkovitosti gorivnih članaka.



Slika 20: Dijagram učinkovitosti [54].

4.1.8. Sigurnost

Glavno pitanje sigurnosti gorivih članaka povezano je s visokim temperaturama ispušnih plinova i proizvodnjom električne energije. Tijekom ispuštanja ispušnih plinova, cijevi moraju imati dvostruki sloj i biti propisano izolirane kako bi se spriječilo bilo kakvo curenje. Također, oprema poput membrane, elektrolita i elektroda mora se održavati u dobrom stanju kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i sigurni rad. Istjecanje elektrolita može biti opasno za ljudski život. Dodatne mjere opreza za čisti vodik koji koriste jedinice gorivnih članaka su te da spremnik vodika i dovodne cijevi moraju biti izolirani. Zbog fizičkog svojstva vodika (hlapljiv i vrlo eksplozivan) moraju se osigurati dodatne mjere opreza. Prilikom prijevoza vodika između spremnika i anodne strane gorivnog članka potrebno je osigurati ventilaciju i nepropusno kućište.

4.1.9. Vijek trajanja

Životni vijek gorivih članaka ovisi o radnoj temperaturi. Prilikom rada na visokim temperaturama dolazi do toplinskih naprezanja materijala, što uzrokuje zamor materijala. Najnovija istraživanja su pokazala da je vijek trajanja SOFC gorivnih članaka do 30 000 sati. Proizvođači PEMFC gorivnih članaka ukazuju da eksponencijalno raste poboljšanje vijeka trajanja u posljednjih petnaest godina. Iz ove perspektive, vijek trajanja gorivih članaka povećava se s tehnološkim razvojem i čini se kao obećavajuća tehnologija u bližoj budućnosti.

4.2. Baterije

Tehnologija baterija značajno se razvila tijekom posljednja dva desetljeća. Danas u području baterija dominiraju litij-ionske baterije [55]. Baterije kao spremnici energije pogodni su za upotrebu na brodovima jer dodatno osiguravaju autonomiju i siguran povratak u luku u slučajevima kad ostali izvori energije na brodu zakažu, odnosno pokrivaju vršna opterećenja sustava kad je potrebna dodatna energija za potrebe potrošača.

4.3. Elektromotor

Elektromotor zbog svojih dobrih karakteristika pronalazi sve veću primjenu na brodu. Neke od njegovih prednosti su:

- Velika pouzdanost i trajnost,
- Jednostavan prijenos i pretvorba energije,
- Trenutna raspoloživost pogona,
- Pogodnost održavanja,

- Jednostavno upravljanje i regulacija,
- Stabilna pogonska karakteristika,
- Čisti rad, minimalno zagađivanje okoliša.

Na Slici 21 je prikazan primjer elektromotora na brodu [56].



Slika 21: Elektromotor [56].

4.4. Spremnici vodika

Vodik se na brodu uglavnom skladišti u spremnicima. Pretežito se koristi vodik u plinovitom i tekućem stanju. Vodik u plinovitom stanju skladišti se pri tlaku između 350 i 700 bara, dok se vodik u tekućem stanju skladišti na – 253 °C pri okolišnom tlaku. Prednost korištenja vodika u plinovitom stanju je brzo punjenje spremnika zbog visokih tlakova. Na Slici 22 je prikazan primjer spremnika za ukapljeni vodik [57].



Slika 22: Spremnik ukapljenog vodika [57].

5. ANALIZA HRVATSKE NACIONALNE FLOTE

5.1. Kategorije plovidbe

Brodovi se mogu podijeliti prema kategorijama plovidbe. Prema Naredbi o kategorijama plovidbe pomorskih brodova [58] postoji 8 kategorija plovidbi:

1.) Neograničena plovidba – međunarodna plovidba svim morima i vodama koje su pristupačne s mora,

2.) Velika obalna plovidba – međunarodna plovidba morima (i vodama koje su pristupačne s mora) koja se nalaze između Gibraltarskog i Babelmandepskog tjesnaca, uključujući Crno more i Azovsko more, te izvan Mediterana do luka Lisabon i Casablanca u Atlantskom oceanu, te Crvenim morem do luka Aden i Berbera,

3.) Mala obalna plovidba – međunarodna plovidba Jadranskim morem i dijelom Jonskog mora (i vodama koje su pristupačne s mora) do crte koja spaja rt Santa Maria di Leuca (uključujući luku Taranto) i rt Katakolon (uključujući luku Katakolon), Jonske otoke i zaljeve: Patraski, Korintski (uključujući Korintski kanal) i Atenski do crte koja spaja rt Kolona i rt Skili,

4.) Obalna plovidba Jadranskim morem – međunarodna plovidba Jadranskim morem (i vodama koje su pristupačne s mora) do crte koja spaja rt Santa Maria di Leuca, rt Kefali (otok Krf) i rt Skala (kod Butrinskog zaljeva), za koje se brod ne udaljava više od 20 Nm od najbliže obale, kopna ili otoka,

5.) Nacionalna plovidba – plovidba unutarnjim morskim vodama i teritorijalnim morem Republike Hrvatske i vodama koje su pristupačne s mora,

6.) Nacionalna obalna plovidba – plovidba unutarnjim morskim vodama Republike Hrvatske i vodama koje su pristupačne s mora,

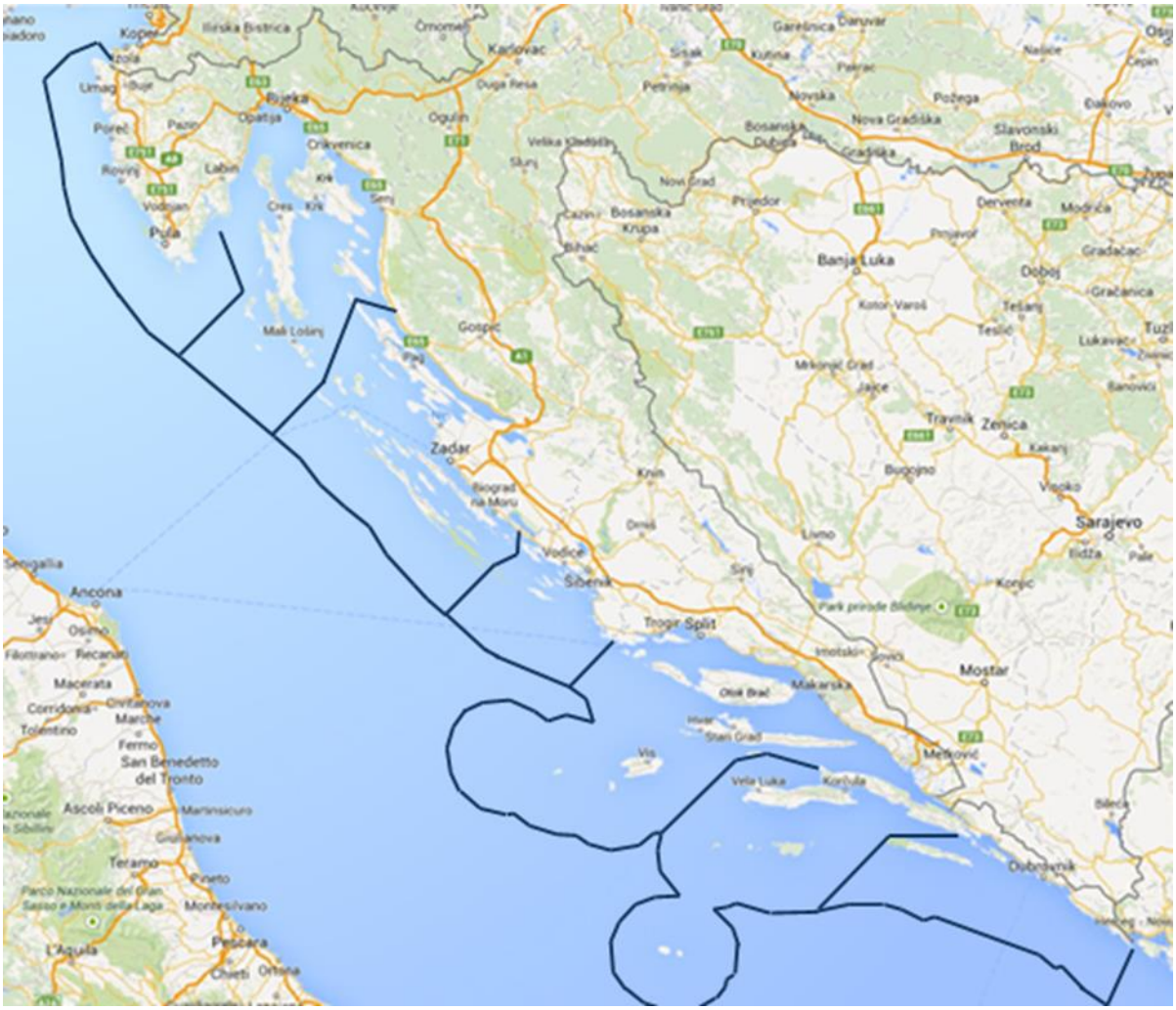
7.) Nacionalna priobalna plovidba – plovidba zaštićenim područjima unutarnjih morskih voda Republike Hrvatske i vodama koje su pristupačne s mora; i to: Fažanskim, Zadarskim, Srednjim, Pašmanskim, Vrgadskim, Murterskim, Šibenskim, Splitskim, Bračkim, Hvarskim, Neretvanskim, Stonskim i Koločepskim kanalom i Pirovačkim zaljevom,

8.) Lokalna plovidba – plovidba povezanim lučkim bazenima koji predstavljaju jedinstvenu geografsku i prometnu cjelinu, lukama, zaljevima (Limskim, Raškim, Kaštelanskim i Klek – Neumskim zaljevom, Rijekom dubrovačkom, Prokljanskim jezerom uključujući ušće rijeke Krke do rta Jadrija), jezerima, kao i rijekama hrvatskog Jadranskog sliva do granice do koje su one plovne s morske strane.

Hrvatskoj nacionalnoj floti pripadaju kategorije 5, 6, 7 i 8.

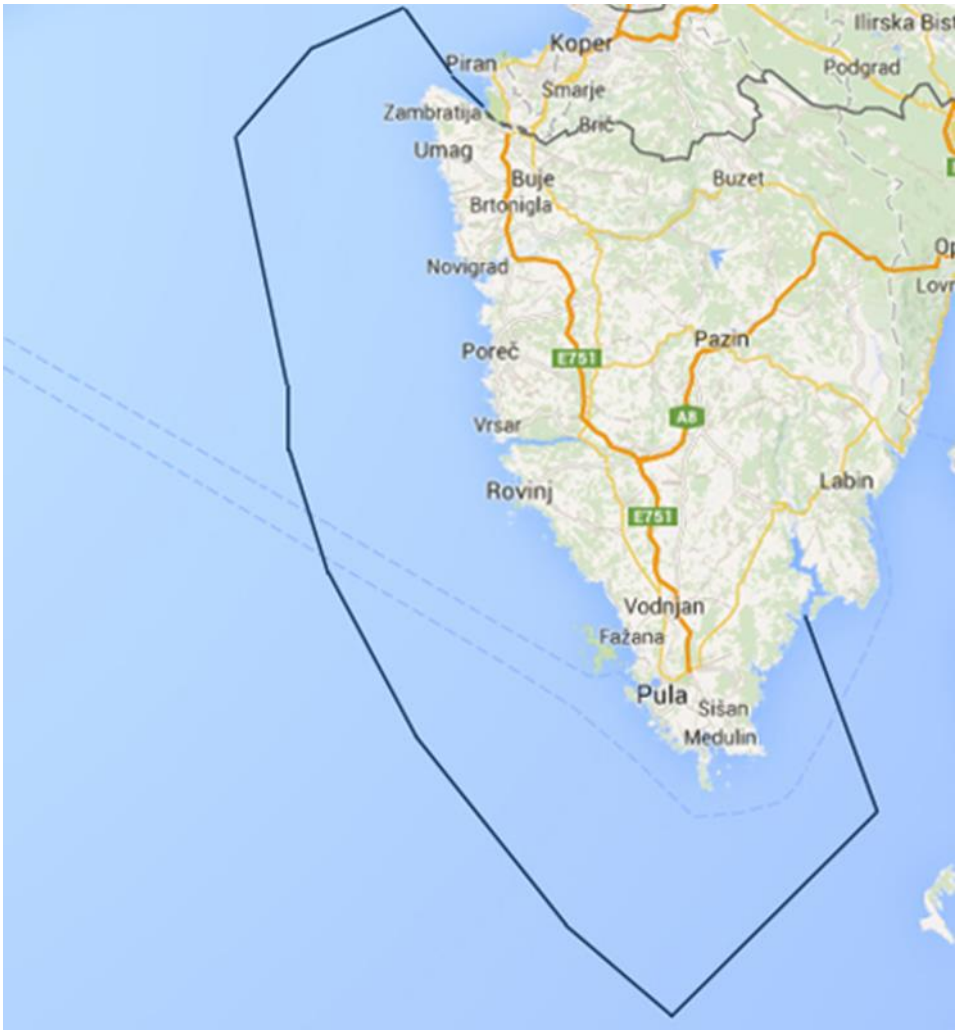
5.2. Plovna područja

Na područjima teritorijalnog mora Republike Hrvatske postoje 7 plovnih područja. To su plovno područje Pule, Rijeke, Zadra, Šibenika, Splita, Korčule i Dubrovnika. Na Slici 23 su prikazana plovna područja Republike Hrvatske [59].



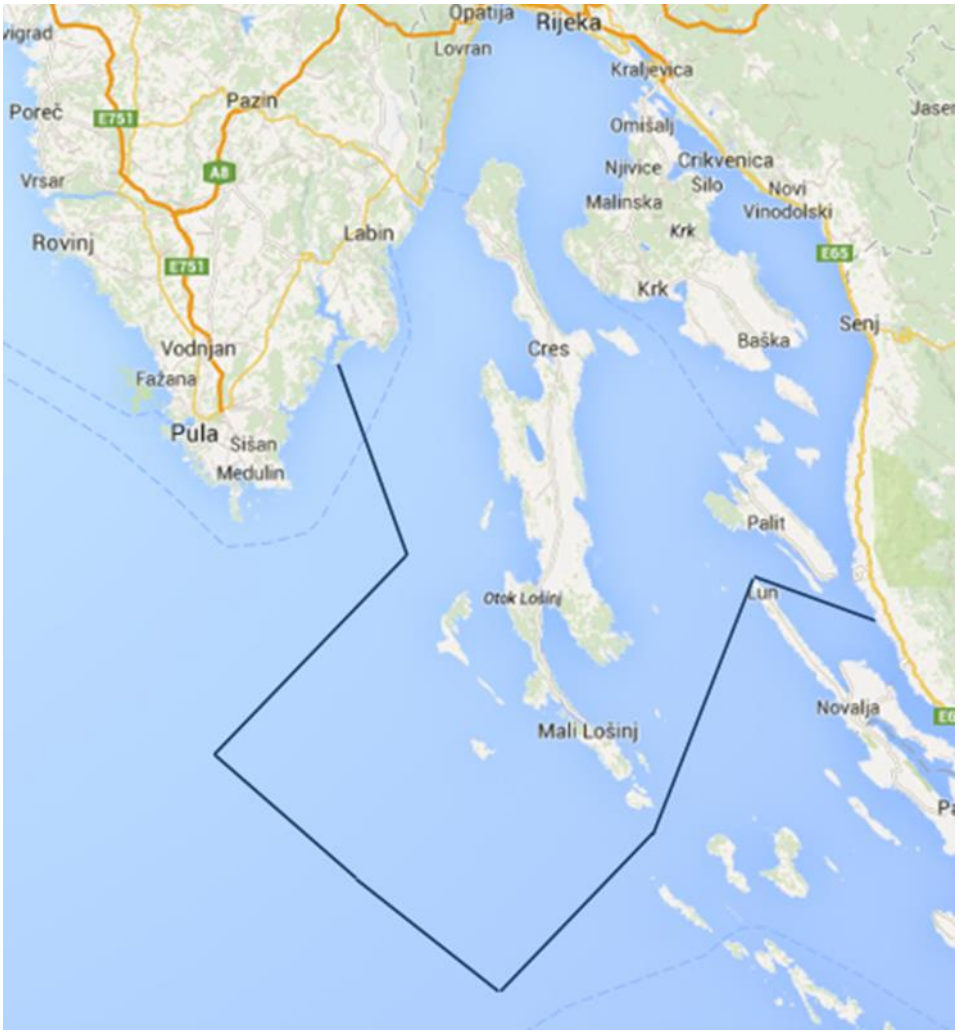
Slika 23: Plovna područja Republike Hrvatske [59].

Plovno područje Pula obuhvaća područja od državne granice s Republikom Slovenijom i Republikom Italijom do spojnice rt Ubac - obalno svjetlo Galijola, a zatim u smjeru 225° prema otvorenom moru. Na Slici 24 prikazano je plovno područje Pule.



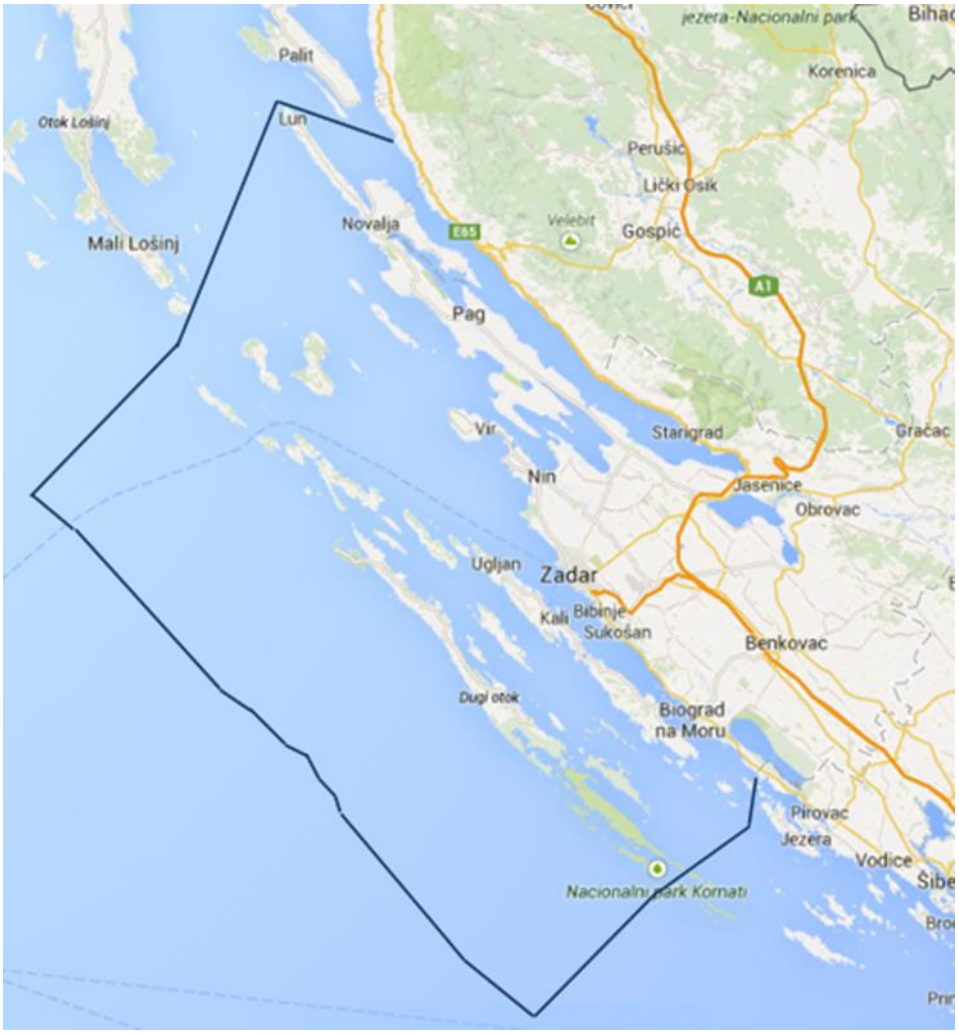
Slika 24: Plovno područje Pule [59].

Plovno područje Rijeka obuhvaća područja od spojnice rt Uba - obalno svjetlo Galijola, a zatim u smjeru 225° prema otvorenom moru do spojnice rt Vrutak na kopnu - Rt Lun (otok Pag) - otočić Grujica, a zatim 225° prema otvorenom moru. Na Slici 25 prikazano je plovno područje Rijeke.



Slika 25: Plovno područje Rijeke [59].

Plovno područje Zadar obuhvaća područja od spojnice rt Vrutak na kopnu - Rt Lun (otok Pag) - otočić Grujica, a zatim 225° prema otvorenom moru do spojnice lučica Draga - otočić Murvenjak - otok Lavsa, a zatim u smjeru 225° prema otvorenom moru. Na Slici 26 prikazano je plovno područje Zadra.



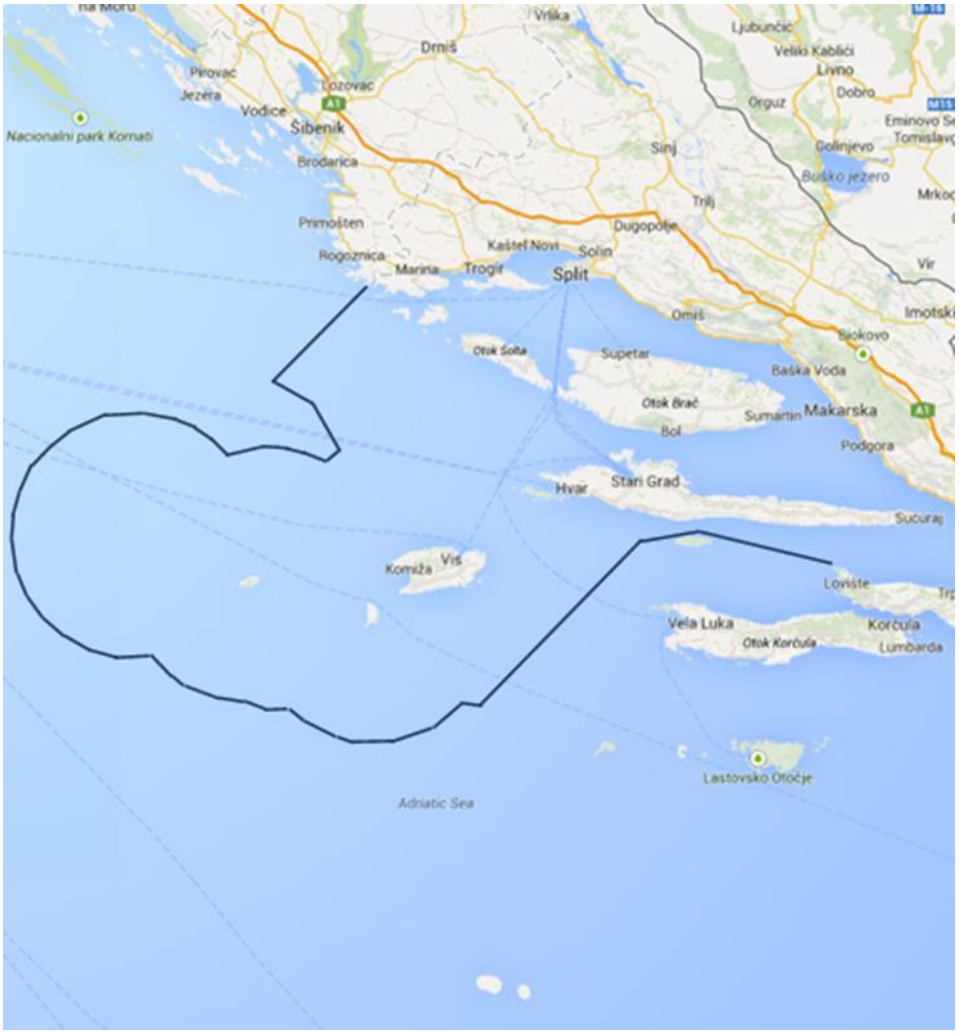
Slika 26: Plovno područje Zadra [59].

Plovno područje Šibenik obuhvaća područja od spojnice lučica Draga (isključivo) - otočić Murvenjak - otok Lavsa, a zatim u smjeru 225º prema otvorenom moru do linije od rta Ploča u smjeru 225º prema otvorenom moru. Na Slici 27 prikazano je plovno područje Šibenika.



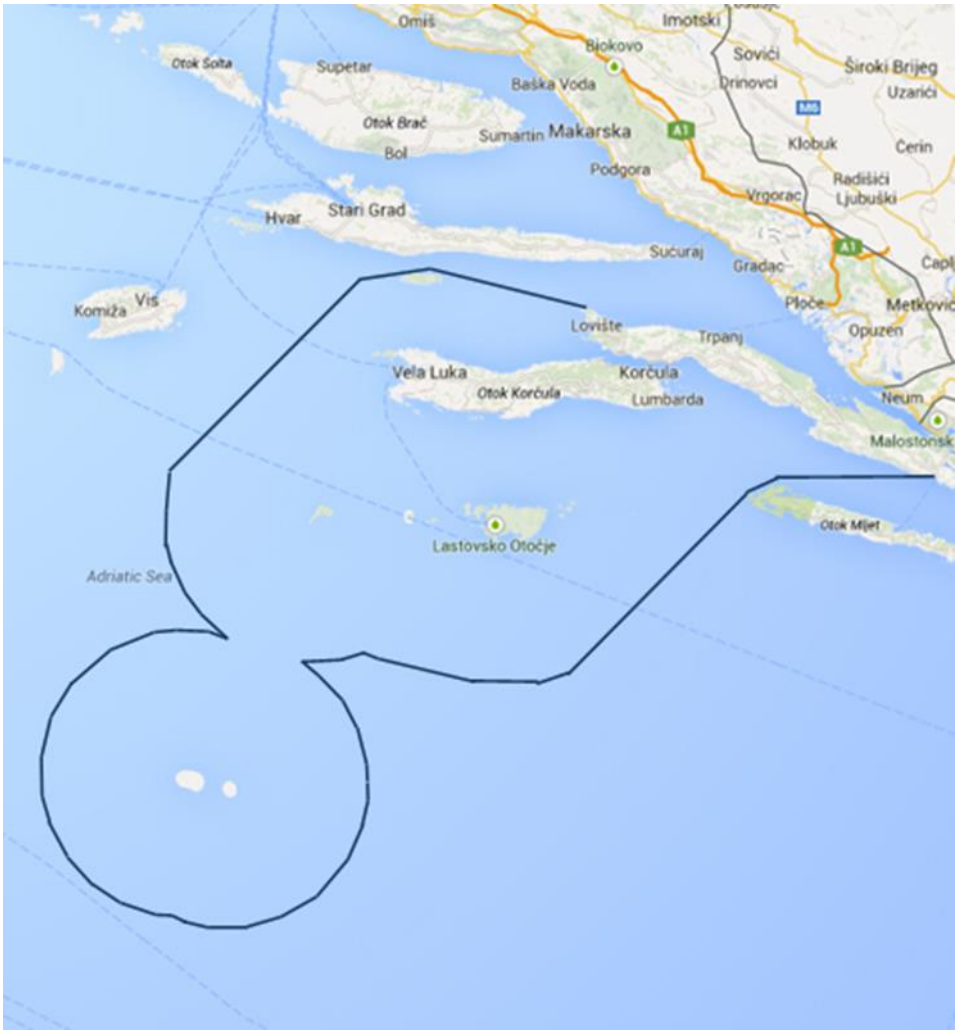
Slika 27: Plovno područje Šibenika [59].

Plovno područje Split obuhvaća područja od spojnice rta Ploča u smjeru 225º prema otvorenom moru do spojnice obalno svjetlo Lovišće - otok Šćedro - hrid Lukavci, te potom u smjeru 225º prema otvorenom moru. Na slici 28 prikazano je plovno područje Splita.



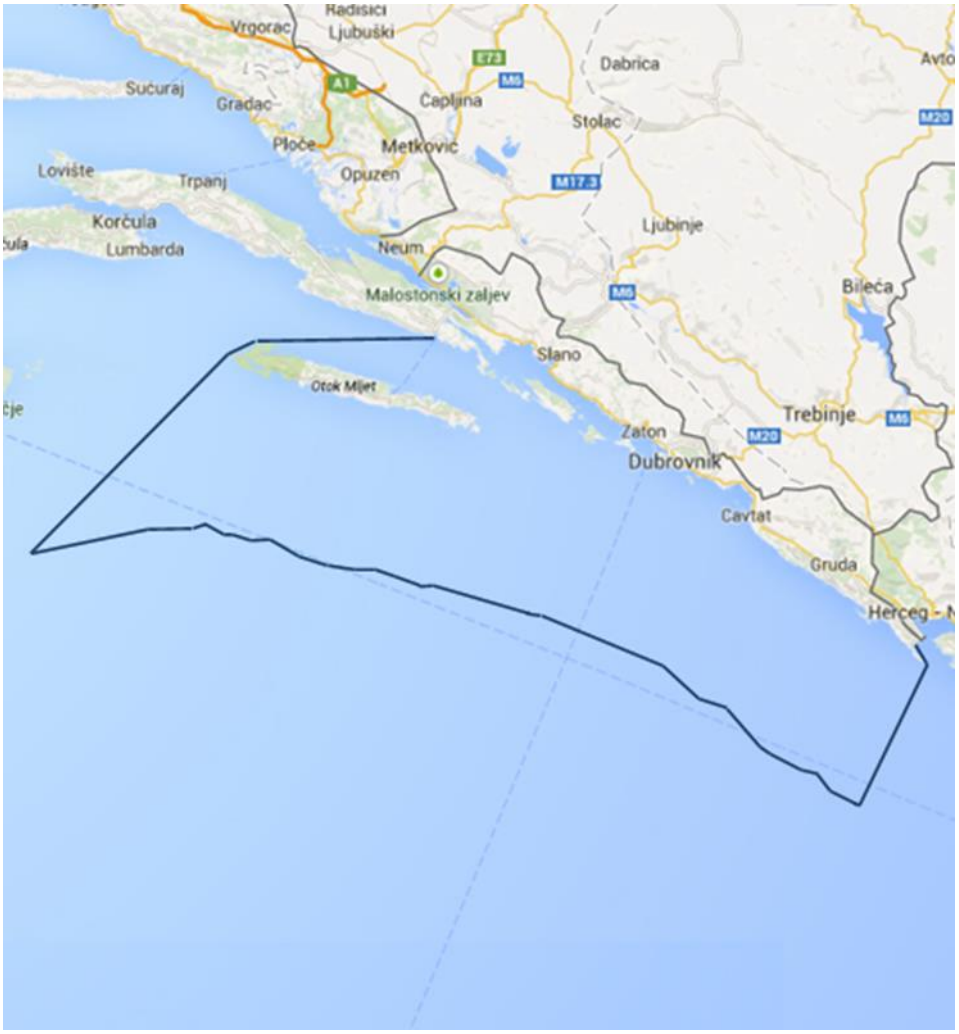
Slika 28: Plovno područje Splita [59].

Plovno područje Korčula obuhvaća područja od spojnice obalno svjetlo Lovišće - otok Šćedro - hrid Lukavci, te potom u smjeru 225º prema otvorenom moru do spojnice uvala Prapratno (poluotok Pelješac) - Rt Glavat (otok Mljet) - Goli rat (otok Mljet), te potom u smjeru 225º. Na Slici 29 prikazano je plovno područje Korčule.



Slika 29: Plovno područje Korčule [59].

Plovno područje Dubrovnik obuhvaća područja od spojnice uvala Prapratno (poluotok Pelješac) – Rt Glavat (otok Mljet) – Goli rat (otok Mljet), te potom u smjeru 225º do državne granice s Republikom Crnom Gorom. Na Slici 30 prikazano je plovno područje Dubrovnika.



Slika 30: Plovno područje Dubrovnika [59].

5.3. Brodske kompanije

Najveći putnički prijevoznik u Hrvatskoj je "Jadrolinija". Održava linije na gotovo svim hrvatskim otocima te u nekim lukama u Italiji. "Jadrolinija" je osnovana 1947. godine u Rijeci. Ostale putničke brodarske tvrtke u Hrvatskoj su "Rapska plovidba" iz Raba koja u svojoj floti posjeduje ukupno 4 broda, Catamaran Line iz Splita, te ostali manji privatni brodovlasnici. Popis brodskih kompanija prikazane su u Tablici 5 [60].

Tablica 5: Ukupan promet putnika i vozila na državnim linijama RH [61].

Brodar	Putnici	
Jadrolinija	11892926	86,1%
Rapska plovidba d.d.	907347	6,6%
KTD Bilan d.o.o.	217457	1,6%
G&V Line Iadera d.o.o.	207454	1,5%
MB Kapetan Luka, Ivan Tomić, t.p.	119920	0,9%
Bura line & Off shore	108176	0,8%
Gradski parking d.o.o. Šibenik	63371	0,5%
RPZ Vrgada	67129	0,5%
G&V Line d.o.o.	59275	0,4%
Miatrade d.o.o.	51707	0,4%
Catamaran Line d.o.o.	49112	0,4%
Krilo shipping company d.o.o.	28415	0,2%
Porat Ilovik d.o.o.	18351	0,1%
Nautički centar Komiža d.o.o.	8250	0,1%
Ukupno	13808890	100%

5.4. Brodovi u nacionalnoj plovidbi

Prema podacima iz HRB-a, Hrvatska nacionalna flota broji 884 brodova. Prosječna starost brodova je 46 godina. Bruto tonaža kreće se u rasponu od 5 do 6721, te prosječni GT iznosi 230,5. Duljina za nadvođe je u rasponu od 9,21 m do 92,89 m, te prosječna duljina iznosi 23,6 m.

5.5. Vrste brodova u hrvatskoj nacionalnoj floti

U hrvatskoj nacionalnoj floti postoji nekoliko vrsta brodova, neki od njih su [62]:

- Klasični putnički brod,
- RO-RO putnički brod,
- Putnički katamaran.

5.5.1. Klasični putnički brod

Danas su klasični putnički brodovi koji se koriste u linijskom putničkom brodarstvu u prvom redu namijenjeni obalnoj plovidbi. Putnički brodovi razlikuju se s obzirom na veličinu, stoga ih se može svrstati na dvije osnovne skupine: brodovi za prijevoz do 200 putnika i brodovi za prijevoz više od 200 putnika. Na Slici 31 i 32 su prikazani primjeri putničkih brodova.



Slika 31: Putnički brod Burja.



Slika 32: Putnički brod Luka [63].

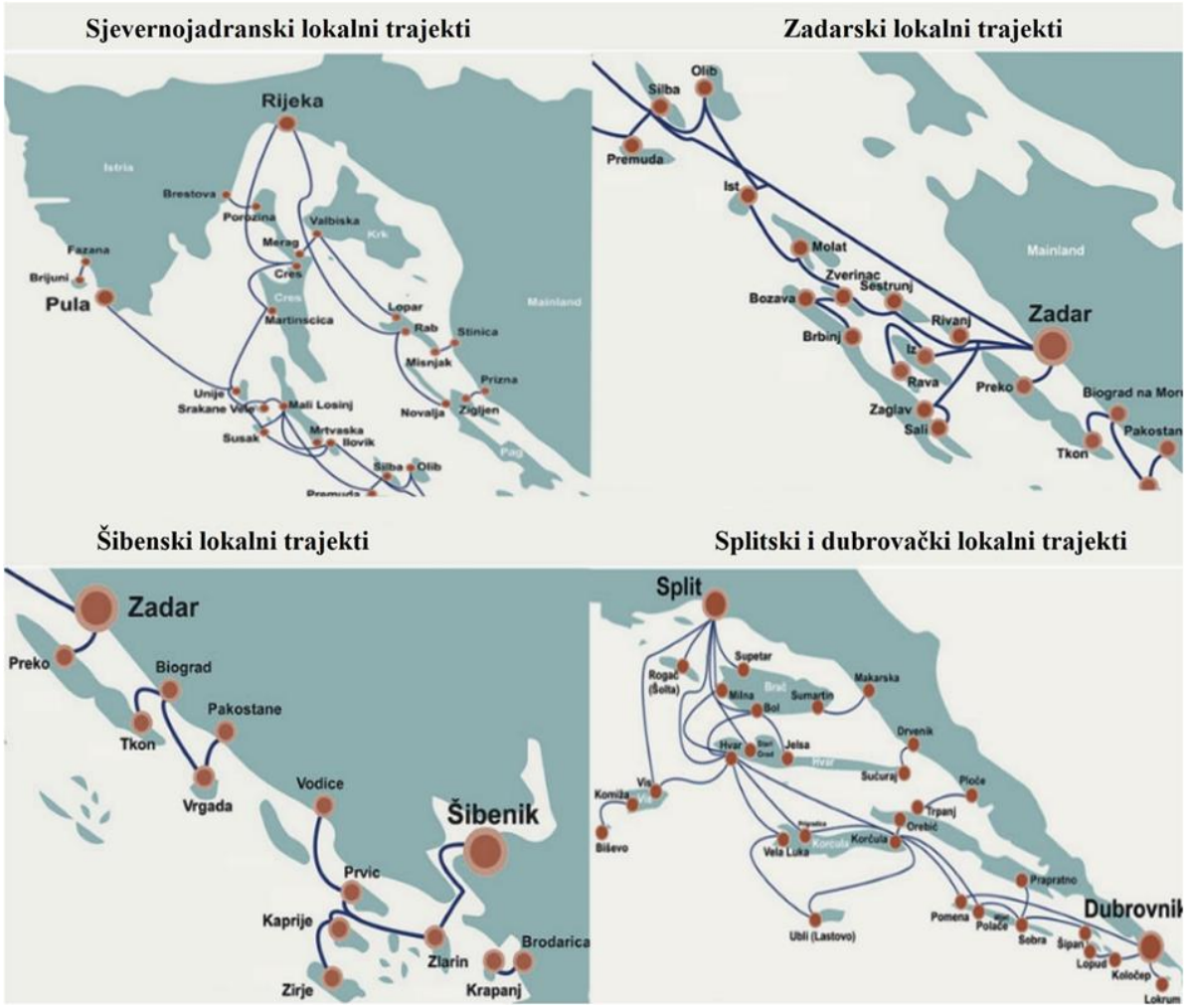
5.5.2. Ro-Ro putnički brod (trajekt)

Ro-Ro putnički brodovi su brodovi koji imaju mogućnost prevoženja putnika i cestovnih vozila (osobna vozila, kamionske prikolice, autobusi, željezničke kompozicije). Najčešće se koriste na stalnim brodskim prugama kao prirodni nastavak cestovne prometne mreže u pojedinoj državi ili, rjeđe, između dviju država. Temeljna zadaća im je ponajprije povezivanje obale i kopna. Na Slici 33 prikazan je trajekt Kornati kao primjer broda koji spada u ovu skupinu.



Slika 33: Trajekt Kornati [64].

Na Slici 34 su prikazane rute hrvatskih lokalnih trajekata.



Slika 34: Rute hrvatskih lokalnih trajekata [65].

5.5.3. Putnički katamaran

Katamaran spada u skupinu brzih putničkih plovila čije putovanje ne traje duže od četiri sata, a uglavnom se koriste za povezivanje luka s regionalnim središtem na udaljenosti od 20 do 40 nautičkih milja (obalna i međuotočna plovidba), najčešće prevoze samo putnike, iako mogu prevoziti i vozila, a to su uglavnom brodovi dvotrupci, tzv. katamarani. Na Slici 35 je prikazan primjer putničkog katamarana Silba.



Slika 35: Putnički katamaran Silba [66].

6. ZNAČAJKE ANALIZIRANOGA BRODA

Za cjeloživotnu analizu odabran je Ro-Ro putnički brod Prizna koji je u vlasništvu tvrtke Jadrolinija. Duljina trajekta iznosi 54 m, kapacitet putnika je 300, dok je kapacitet vozila 60. Na Slici 36 prikazan je prikazan je Ro-Ro putnički brod Prizna.



Slika 36: Ro-Ro putnički brod Prizna [67].

U Tablici 6 su prikazani osnovni podaci o gradnji broda te njegove općenite karakteristike.

Tablica 6: Osnovni podaci broda Prizna [68].

Ime broda	Prizna
HRB broj	15177
Vrsta broda	Ro-Ro putnički
Godina gradnje	1970.
Brodograditelj, mjesto gradnje	KALMAR VARV A.B., KALMAR
Vrsta poriva	Motor s unutarnjim izgaranjem
Materijal gradnje trupa	Čelik

U Tablici 7 su prikazani osnovni podaci o dimenzijama broda i njegovoj konstrukcijskoj brzini.

Tablica 7: Osnovni podaci o dimenzijama broda [68].

Duljina između okomica, Lpp (m)	52,4
Duljina preko svega, Loa (m)	65
Širina (m)	11,7
Visina (m)	2,4
Gaz (m)	1,626
Bruto tonaža GT	307
Neto tonaža NT	116
Brzina (čv)	8

U Tablici 8 su prikazani podaci o energetskom postrojenju.

Tablica 8: Podaci o energetskom postrojenju broda [68].

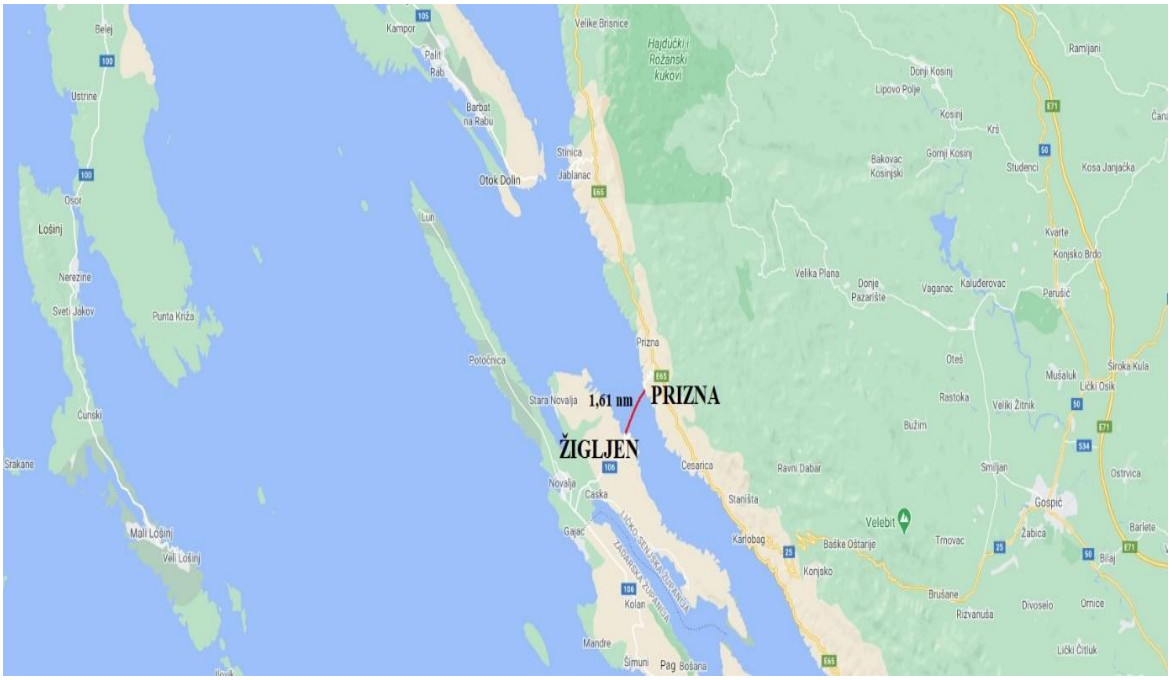
Vrsta i broj porivnih strojeva	Dizelski, četverotaktni, jednoradni, 4
Proizvođač stroja	SAAB-SCANIA AB
Ukupna snaga (kW)	792
Broj, ukupna snaga generatora (kW)	2,84
Broj i vrsta vijaka	4, s fiksnim krilima

Trajekt Prizna na liniji Prizna-Žigljen godišnje plovi 1590 puta [69]. Duljina puta iznosi 1,61 nm, dok je prosječno vrijeme putovanja u jednom smjeru 15 min.

Preko duljine puta i prosječnog vremena trajanja putovanja možemo izračunati prosječnu brzinu trajekta.

$$v_{pr} = \frac{1{,}61}{\frac{15}{60}} = 6{,}44 \text{ čv.}$$

Na Slici 37 je prikazana je ruta Prizna-Žigljen.



Slika 37: Prikaz rute plovidbe trajekta na relaciji Prizna-Žigljen.

7. OPIS POSTUPKA CJELOŽIVOTNE ANALIZE

Pod pokroviteljstvom američkog Ureda za energetsku učinkovitost i obnovljive izvore energije, Argonne je razvio model cjelovite životne analize pod nazivom GREET. GREET (eng. *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*) [70] je programski alat koji istražuje utjecaje životnog ciklusa tehnologija vozila, brodova, goriva, proizvoda i energetskih sustava. Ovaj program može izračunati ukupnu potrošnju obnovljive i neobnovljive energije, emisije onečišćivača zraka, emisije stakleničkih plinova i potrošnju vode.

7.1. Opis proračuna u programskom paketu GREET

Proračun u GREET-u 2020 podijeljen je u dvije osnovne faze:

- WTP (eng. *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 (eng. *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 a ta se faza označava kao PTW. WTW faza se sastoji od WTP i PTW

Za WTP fazu je potrebno definirati vrstu goriva i način njegova nastanka. Također, potrebno je definirati sve načine prijevoza koji su se koristili od njegova nastanka do dolaska do pumpne stanice. GREET u svojoj bazi podataka nudi dosta informacija koje se mogu iskoristiti prilikom definiranja dolaska goriva do potrošača. Moguće je i samostalno konfiguriranje nekih podataka kao npr. vrste goriva, procesa prijevoza i tako dalje. Kada se definira željeni način prijevoza i procesi proizvodnje, moguće je utvrđivanje količine određene emisije za pojedini segment procesa.

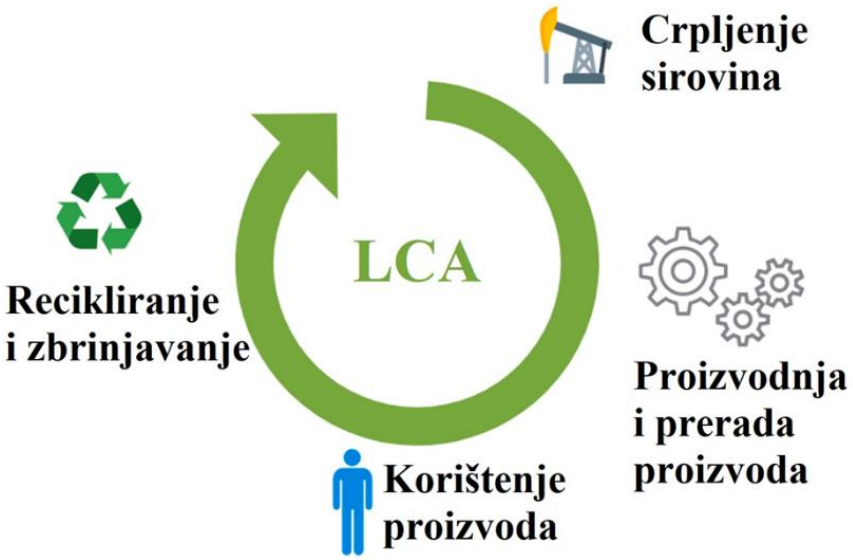
Kako bi definirali PTW fazu potrebno je odabrati vrstu potrošača, dakle potrebno je izabrati željeni brod. Prilikom konfiguracije može se definirati vrsta pogonskog stroja, potrošnja goriva, emisija plinova i tako dalje.

7.2. Analiza životnog ciklusa

Zbog problema o globalnom zatopljenju i onečišćenju okoliša došlo je do razvoja metode za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš kroz emisije tvari koje su s njim povezane. Ova metoda je poznata kao analiza životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Assessment,* LCA). Prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju [71], LCA se definira kao tehnika za procjenjivanje ekološkog utjecaja proizvoda tijekom njegovog životnog ciklusa. To uključuje:

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

Na Slici 38 je prikazan životni ciklus proizvoda i njegove životne faze.



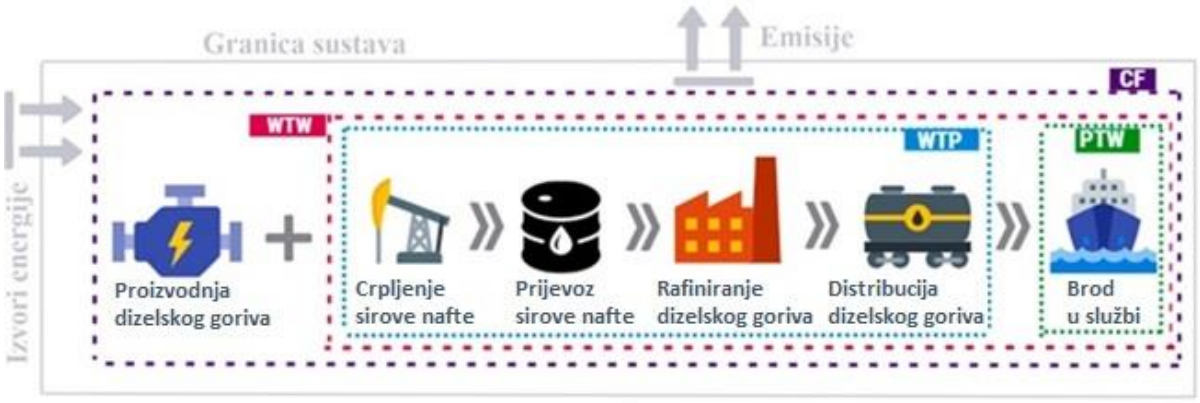
Slika 38: Životni ciklus proizvoda i njegove faze [69].

7.3. LCA broda pogonjenog dizelskim motorom.

LCA broda pogonjenog dizelskim motorom uključuje procese:

- Proizvodnju dizelskog motora,
- Crpljenje sirove nafte,
- Prijevoz sirove nafte,
- Rafiniranje dizelskog goriva,
- Distribuciju dizelskog,
- Uporaba plovila.

Na Slici 39 su prikazani procesi za LCA broda pogonjenog dizelskim gorivom.



Slika 39: LCA energetskog sustava s dizelskim gorivom [69].

7.3.1. Proračun ugljičnog otiska u WTP fazi

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

Sirova nafta uvozi se s Bliskog istoka. Pretpostavljeni postupak prijevoza sirove nafte uključuje prijevoz cisternama od mjesta eksploatacije do luke (500 km) gdje se sirova nafta skladišti i zatim utovara u tanker koji plovi prema Hrvatskoj (4000 km) do terminala Omišalj odakle se prevozi cjevovodom do rafinerije (7 km). Cijeli prijevoz sirove nafte simuliran je u programu GREET 2020, Slika 40.



Slika 40: Simulacija prijevoza nafte.

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 [72].

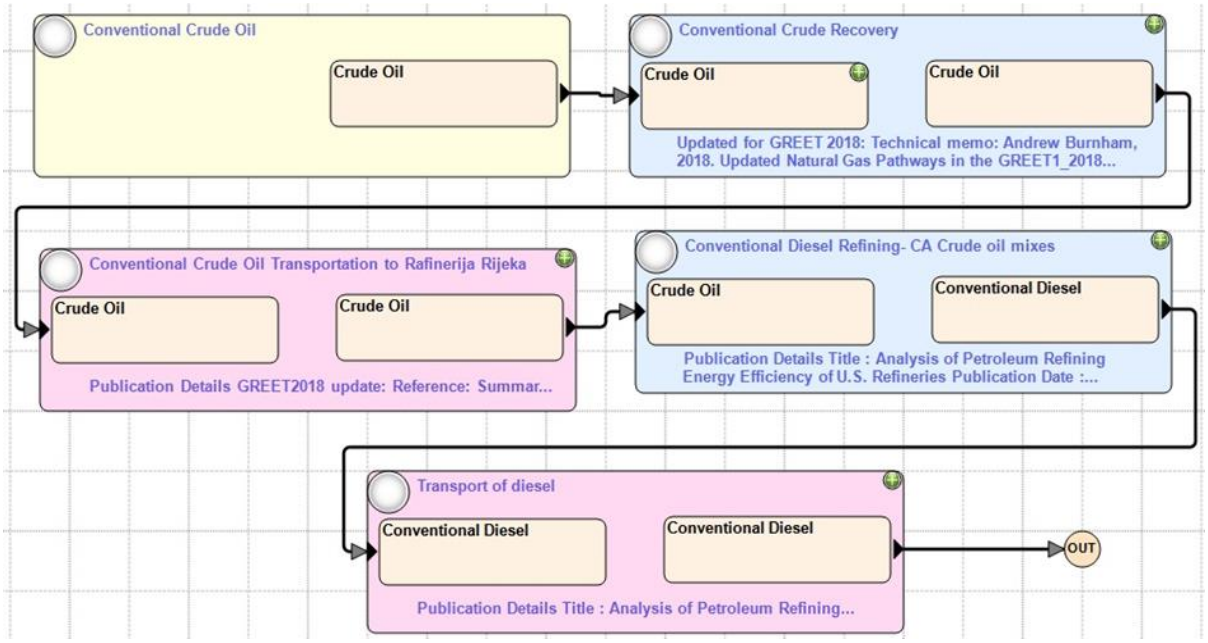
Dizelsko gorivo koje se koristi u Hrvatskoj nacionalnoj floti kao pogonsko gorivo odgovara konvencionalnom dizelu iz baze podataka GREET 2020 pa se time parametri procesa dobivaju iz zadanih postupaka rafiniranja konvencionalnog dizela iz baze GREET 2020 (*Conventional Diesel Refining*). Nakon što se proizvede, cisterne prevoze dizelsko gorivo od Rijeke do pumpne stanice u Prizni (100km).

Na Slici 41 je prikazana simulacija prijevoza dizelskog goriva od rafinerije do broda.



Slika 41: Simulacija prijevoza dizelskog goriva.

Na Slici 42 je prikazana simulacija WTP faze.



Slika 42: Simulacija WTP faze.

U Tablici 9 su prikazani rezultati WTP faze

Tablica 9: Rezultati WTP faze.

Emisije stakleničkih plinova (kg/nm)	
CO_2	3,475
CH_4	0,0230
N_2O	$6{,}58 \cdot 10^{-5}$

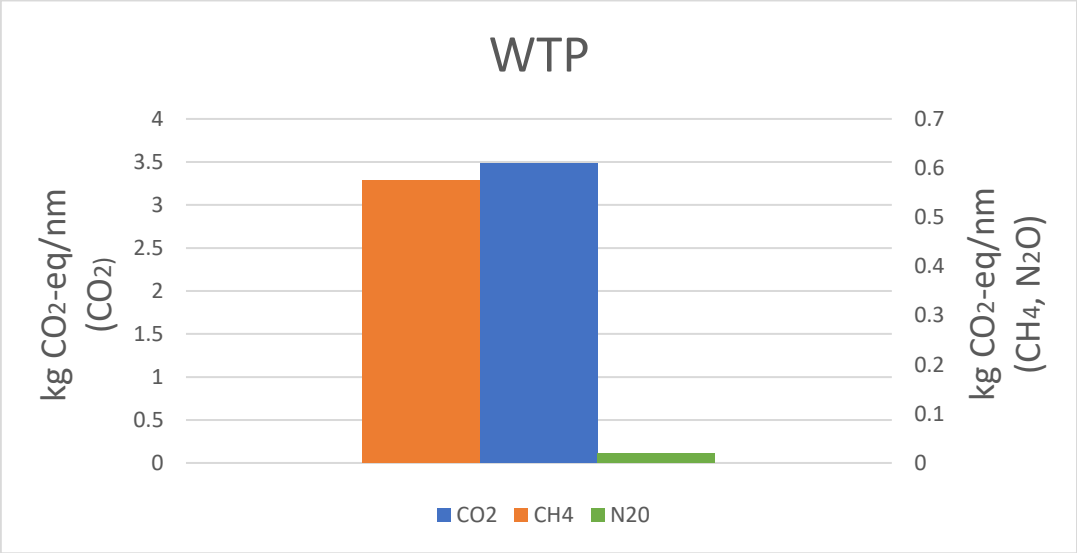
Kako pojedini plinovi ne doprinose podjednako globalnom zagrijavanju, uveden je pojam „potencijala globalnog zagrijavanja“ (eng. *Global Warming Potential*, GWP). To je mjera koja pokazuje koliko će energije apsorbirati 1 tona ispuštenog stakleničkog plina tijekom određenog vremena, najčešće tijekom 100 godina, u usporedbi s 1 tonom CO_2. Što je veći GWP to plin više doprinosi globalnom zagrijavanju. Množenjem dobivenih rezultata 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 10 prikazuje GWP-e za navedene stakleničke plinove te ukupni ugljični otisak WTP faze za brod Prizna.

Tablica 10: Rezultati analize ugljičnog otiska WTP faze.

Plin	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg CO_2-eq/nm)
CO_2	1	3,475
CH_4	25	0,575
N_2O	298	$1{,}96 \cdot 10^{-2}$
Ugljični otisak		4,070

Slika 43 prikazuje usporedbu ispuštenih stakleničkih plinova u WTP fazi.



Slika 43: Usporedba ispuštenih stakleničkih plinova u WTP fazi.

7.3.2. Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi

Kako bi se u potpunosti definirao cjelokupni životni ciklus broda, potrebno je još konfigurirati PTW fazu. U PTW fazu se ubrajaju svi ispušteni plinovi prilikom eksploatacije broda, odnosno plinovi koji nastaju uslijed izgaranja dizelskog goriva u pogonskim i pomoćnim strojevima. Za simulaciju PTW faze potrebni su nam podaci o potrošnji energije (eng. *energy consumption, EC*) i emisiji ispušnih plinova (eng. *tailpipe emission, TE*).

EC je omjer prosječne ukupne snage i prosječne brzine broda.

$$EC = \frac{P_{pr,uk}}{v_{pr}}.$$

Prosječnu snagu motora dobivamo iz izraza:

$$P_{M,pr} = P_M \cdot 0{,}8 \cdot \left(\frac{v_{pr}}{v}\right)^3 = 792 \cdot 0{,}8 \cdot \left(\frac{6{,}44}{8}\right)^3 = 330{,}52 \text{ kW}.$$

Prosječna snaga generatora je 50% od ukupne snage generatora.

$$P_{AG,pr} = 42 \text{ kW}.$$

Ukupnu prosječnu snagu broda dobivamo zbrajanjem prosječne snage glavnog motora i generatora:

$$P_{pr,uk} = 330{,}52 + 42 = 372{,}52 \text{ kW}.$$

$$EC = \frac{372{,}52}{6{,}44} = 57{,}85 \frac{\text{kWh}}{\text{nm}}.$$

EC dijelimo s 1,852 kako bi vrijednost preračunali po kilometru:

$$EC = \frac{58{,}75}{1{,}852} = 31{,}24 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}.$$

Emisije ispušnih plinova dobijemo množenjem potrošnje goriva (eng. *fuel consumption*, *FC*) i emisijskog faktora (eng. emission factor, *EF*).

$$TE_i = FC \cdot EF_i.$$

Potrošnju goriva dobijemo množenjem *EC* i specifične potrošnje goriva *SFC* (eng. *specific fuel consumption*). *SFC* za dizelsko gorivo iznosi 0,215 kg/kWh.

$$FC_D = EC \cdot SFC_D = 57{,}85 \cdot 0{,}215 = 12{,}43 \frac{\text{kg}}{\text{km}}.$$

FC_D dijelimo s 1,852 (1 nm=1,852 km) kako bi dobili potrošnju goriva u nautičkim miljama:

$$FC_D = \frac{12{,}43}{1{,}852} = 6{,}71 \frac{\text{kg}}{\text{nm}}.$$

Emisijski faktori zadani su u Tablici 11.

Tablica 11: Emisijski faktori.

Emisije	Emisijski faktori (g/kg goriva)
CO_2	3206
CH_4	0,06
N_2O	0,15

Množenjem zadanih emisijskih faktora i potrošnje goriva dobivamo emisije ispušnih plinova. Rezultati su prikazani u Tablici 12.

Tablica 12: Emisije ispušnih plinova.

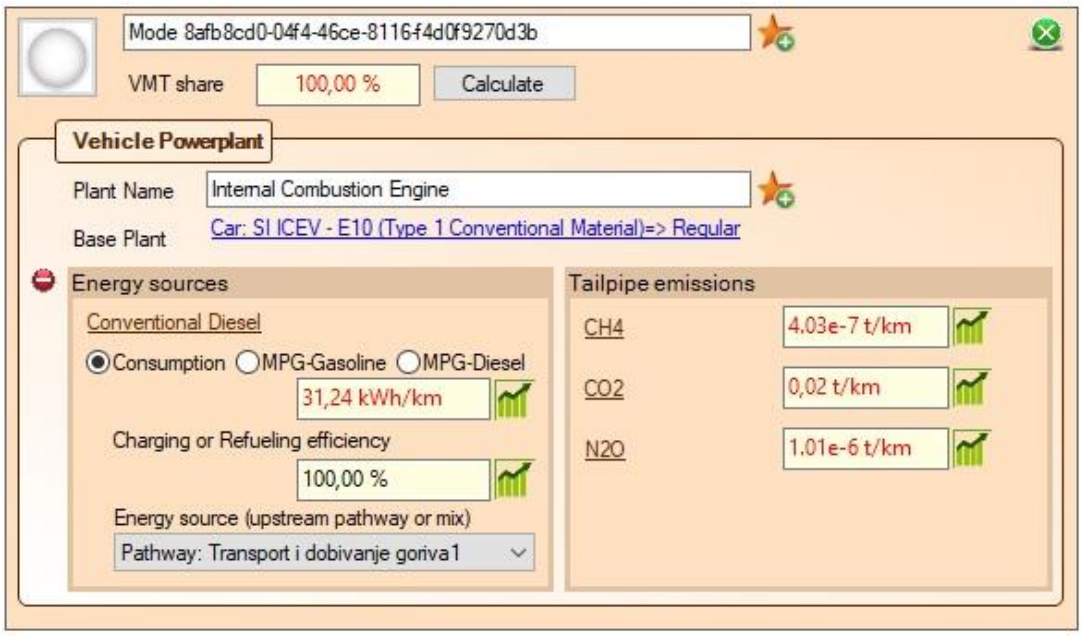
TEi, CO_2	0,0215 t/km
TEi,CH_4	$4{,}029 \cdot 10^{-7}$ t/km
TEi,N_2O	$1{,}007 \cdot 10^{-6}$ t/km

Također, u postavkama moramo unijeti i put koji brod prijeđe tijekom svog života (eng *lifetime mileage, LM*). *LM* dobijemo iz izraza:

$$LM = LT \cdot N_A \cdot 2 \cdot l = 20 \cdot 1590 \cdot 2 \cdot 1{,}61 = 102396 \text{ nm},$$

gdje je *LT* broj godina, N_A broj putovanja u godini a *l* duljina rute u jednom smjeru.

Na Slici 44 je prikazana simulacija PTW faze.



Slika 44: Simulacija PTW faze.

U Tablici 13 su prikazani rezultati PTW faze.

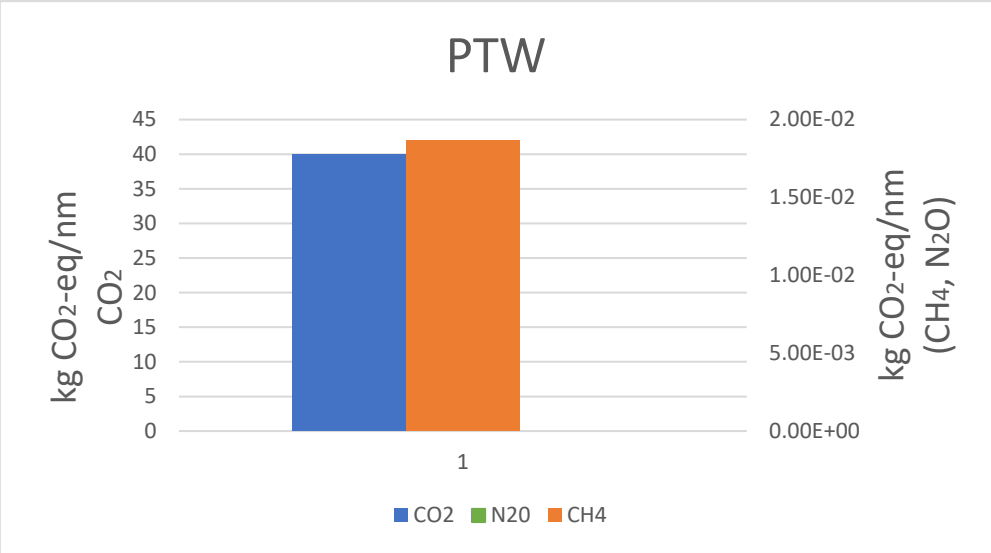
Tablica 13: Rezultati PTW faze.

Emisije stakleničkih plinova (kg/nm)	
CO_2	39,874
CH_4	$7{,}46 \cdot 10^{-4}$
N_2O	0

Množenjem dobivenih rezultata iz Tablice 13 s GWP za pojedine plinove dobivamo ukupni ugljični otisak u PTW fazi. Rezultati su prikazani u Tablici 14 i na Slici 45.

Tablica 14: Rezultati analize ugljičnog otiska PTW faze.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg CO_2-eq/nm)
CO_2	1	39,874
CH_4	25	$1{,}86 \cdot 10^{-2}$
N_2O	298	0
Ugljični otisak		39,893



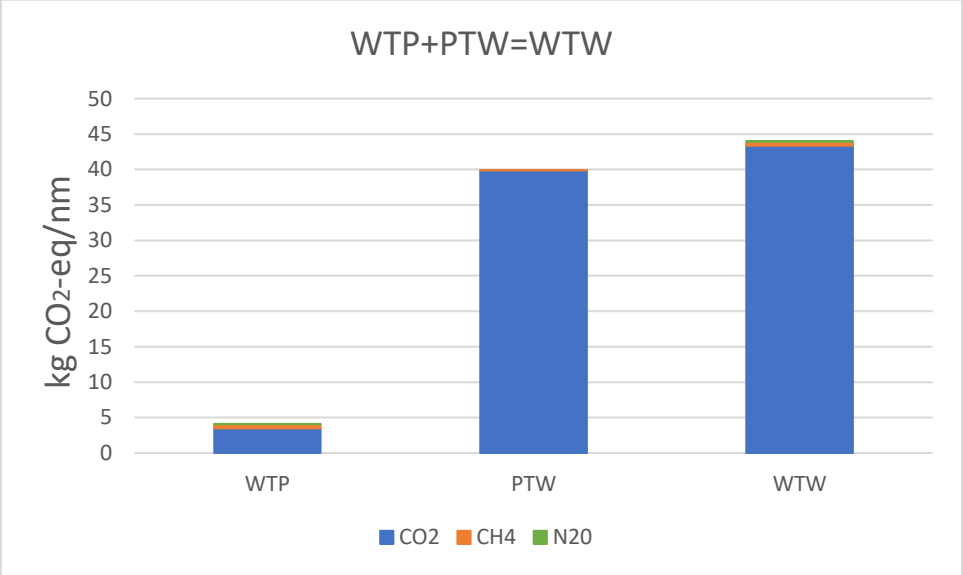
Slika 45: Rezultati PTW faze.

7.3.3. Rezultati WTW faze

Ugljični otisak WTW faze dobiva se zbrajanjem ugljičnih otisaka WTP i PTW faze. Rezultati su prikazani u Tablici 15 i na Slici 46.

Tablica 15: Ugljični otisak WTW faze dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm).

	WTP	PTW	WTW
CO_2	3,475	39,874	43,349
CH_4	0,575	$1{,}86 \cdot 10^{-2}$	0,5940
N_2O	$1{,}96 \cdot 10^{-2}$	0	$1{,}96 \cdot 10^{-2}$
Ukupno	4,070	39,893	43,96



Slika 46: Reultati WTW faze.

7.3.4. Utjecaj proizvodnje dizelskog motora

Kako bi analizirali utjecaj proizvodnje dizelskog motora, potrebno je unijeti pojedine materijale motora u programskom paketu GREET 2020. Masu dizelskog motora dobijemo iz izraza:

$$m = \frac{2 \cdot P_{pr,uk}}{450} = \frac{2 \cdot 372{,}52}{450} = 1655 \text{ kg.}$$

U Tablici 16 su zadani maseni udjeli pojedinih materijala dizelskog motora.

Tablica 16: Maseni udjeli pojedinih materijala dizelskog motora [69].

Materijal motora	Maseni udio (%)
Lijevano željezo	46
Čelik	40
Aluminij	8

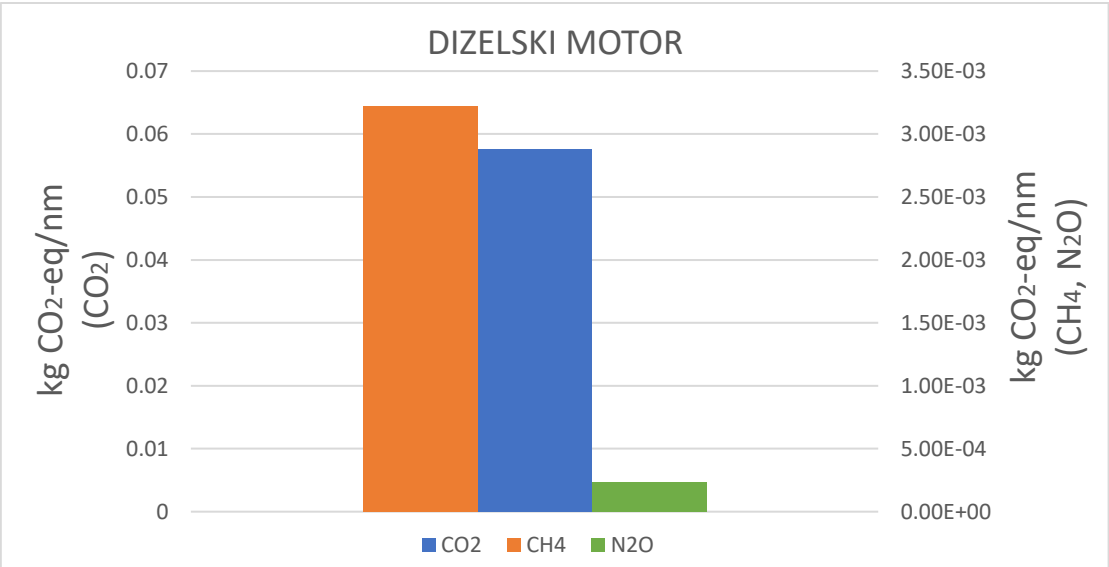
Ulje i mazivo	3
Plastika	0,9
Guma	0,9
Boja	0,9
Bakar i cink	0,2
Olovo	0,1

Za svaki pojedini materijal izračunamo njegovu masu. Masu pojedinog materijala dobijemo množenjem ukupne mase dizelskog motora s masenim udjelom pojedinog materijala prikazan u Tablici 16, zatim te mase unosimo u programski paket GREET 2020.

Rezultati analize ugljičnog otiska dizelskog motora prikazani su u Tablici 17 i na Slici 47.

Tablica 17: Rezultati analize ugljičnog otiska dizelskog motora.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg CO_2-eq/nm)
CO_2	1	0,0575
CH_4	25	$3{,}22 \cdot 10^{-3}$
N_2O	298	$2{,}34 \cdot 10^{-4}$
Ugljični otisak		0,0609



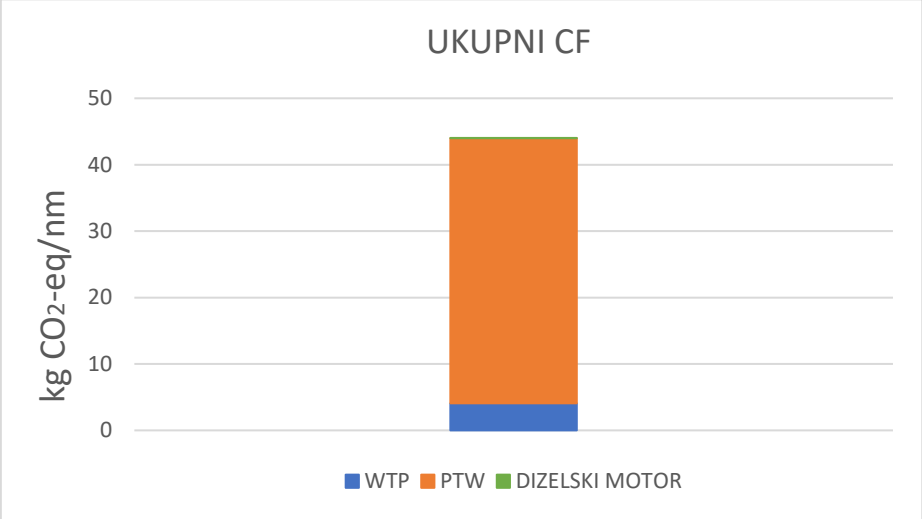
Slika 47: Rezultati ugljičnog otiska dizelskog motora.

7.3.5. Ukupni ugljični otisak za brod pogonjenim dizelskim gorivom

U Tablici 18 i na Slici 48 prikazani su rezultati ukupnog ugljičnog otiska za brod pogonjen dizelskim motorom.

Tablica 18: Ukupni ugljični otisak dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm).

WTP	4,070
PTW	39,893
Proizvodnja dizelskog motora	0,0609
Ukupno	44,024



Slika 48: Ukupni ugljični otisak dizelskog goriva (kg CO_2-eq/nm).

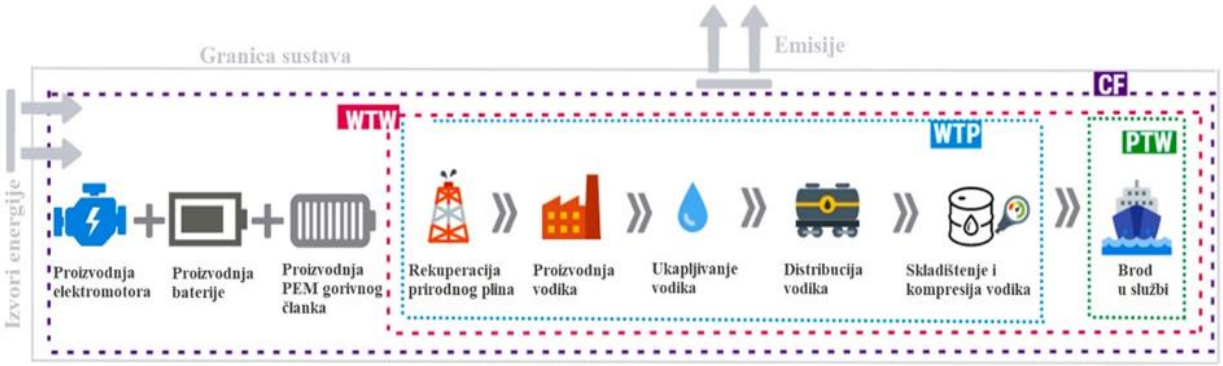
7.4. Ugljični otisak broda pogonjenim vodikom

LCA broda pogonjenim vodikom uključuje:

- Proizvodnju elektromotora, baterije i PEM gorivnog članka,
- Rekuperaciju prirodnog plina,
- Proizvodnju vodika,
- Ukapljivanje vodika,
- Distribuciju vodika,
- Skladištenje i kompresiju vodika,
- Uporaba plovila.

Osnovne komponente broda pogonjenog vodikom su elektromotor i PEM gorivni članak te je potrebno analizirati i njihov utjecaj na ukupni ugljični otisak. Za ovaj način pogona moguće je koristiti i baterije. Baterije su planirane za pohranu dodatne energije kako bi sustav u potpunosti

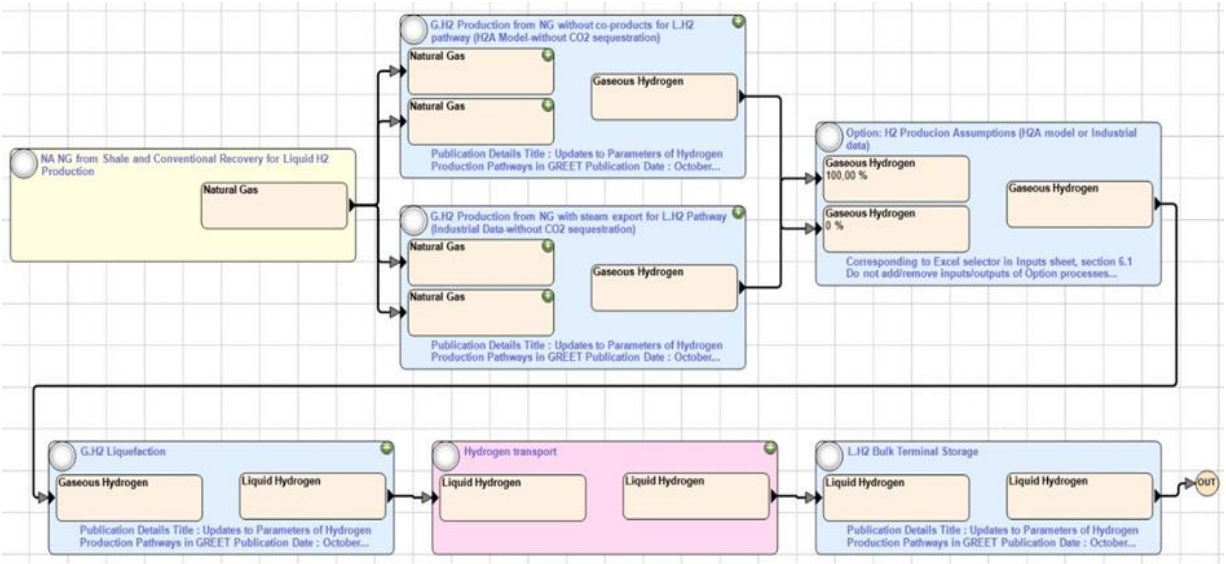
bio bez emisija. [73]. Također potrebno je uzeti i njihov utjecaj na ukupni ugljični otisak. Na Slici 49 su prikazani procesi za LCA broda pogonjenim vodikom



Slika 49: LCA faze broda pogonjenim vodikom [69].

7.4.1. Proračun ugljičnog otiska u WTP fazi

U simulaciji WTP faze u programskom paketu GREET 2020 koristili su se neki procesi koji postoje u samoj programskoj podršci: proizvodnja vodika iz fosilnih goriva, ukapljivanje vodika te njegov prijevoz i skladištenje. Za transportne procese bila je potrebna samostalna konfiguracija. Slika 50 prikazuje simulaciju WTP faze u programskom paketu GREET 2020.



Slika 50: Simulacija WTP faze.

Hrvatska nije razvila tržište vodika, te se pretpostavlja da se vodik proizvodi u zapadnoj Europi i prevozi u Hrvatsku. Nakon proizvodnje, ukapljeni vodik se prevozi cisternama do broda (1100 km).

Na Slici 51 je prikazana simulacija prijevozaa vodika od postrojenja do broda

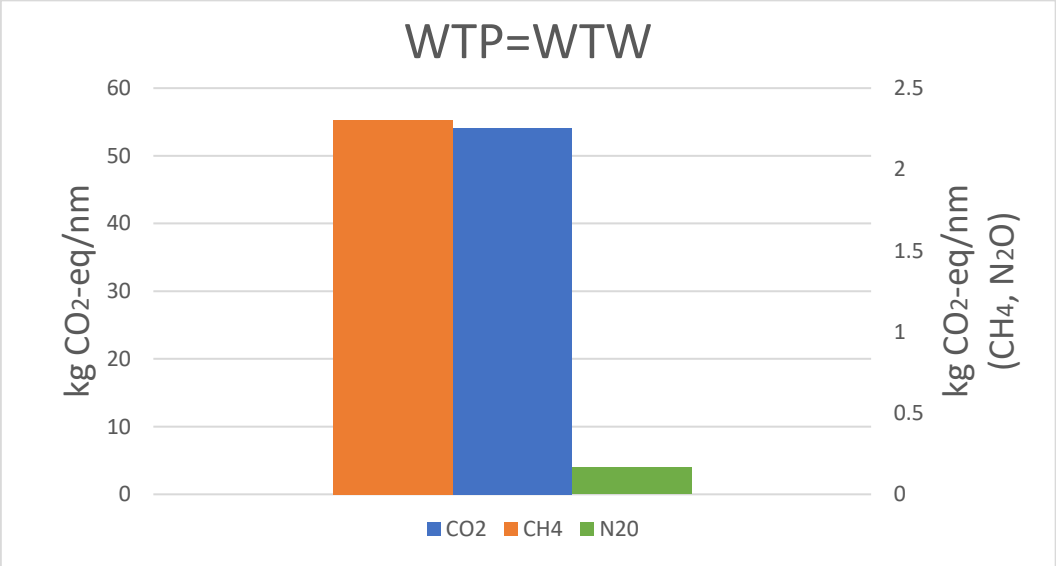


Slika 51: Simulacija prijevoza vodika od postrojenja do broda.

Rezultati analize ugljičnog otiska WTP faze prikazani su u Tablici 19 i na Slici 52.

Tablica 19: Rezultati analize ugljičnog otiska WTP faze.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg CO_2-eq/nm)
CO_2	1	54,109
CH_4	25	2,301
N_2O	298	0,163
Ugljični otisak		56,574



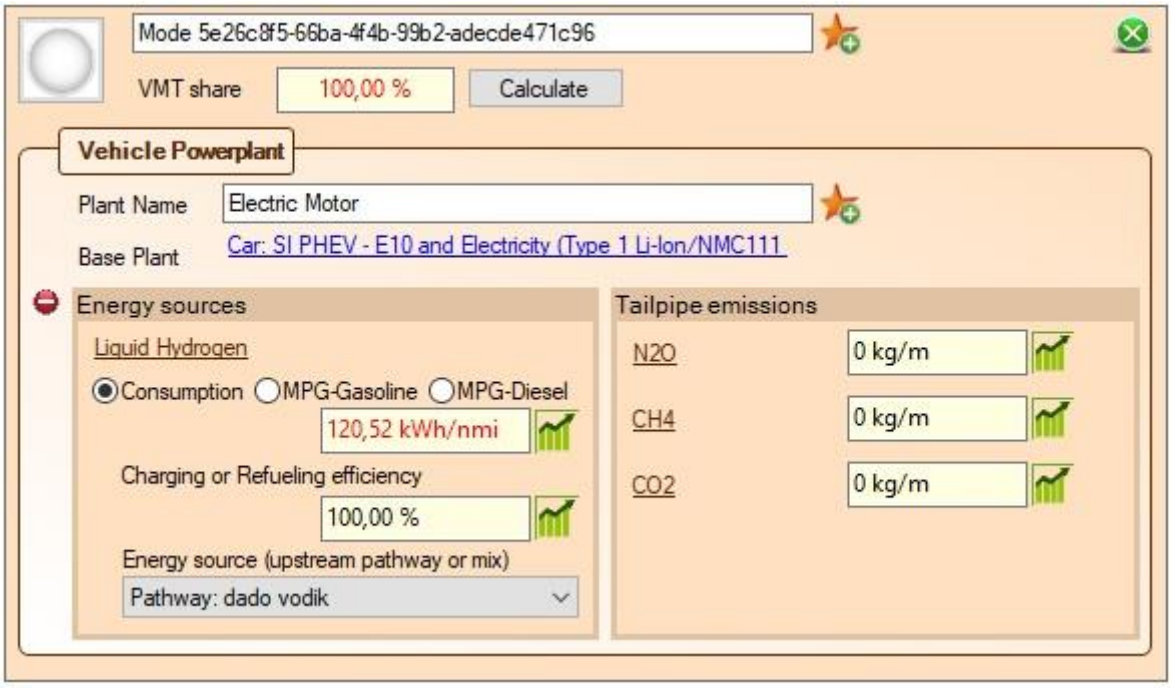
Slika 52: Rezultati WTP faze.

7.4.2. Proračun ugljičnog otiska u PTW fazi

U PTW fazi nema emisija stakleničkih plinova, jer je nusprodukt izgaranja voda. Kako bi se pokrile energetske potrebe broda, moramo uzet u obzir korisnost PEM gorivnog članka, stoga će *EC* biti drugačiji od dizelskog motora. Novi *EC* dobijemo dijeljenjem *EC* od dizelskog motora s korisnosti PEM gorivnog članka ($\eta_{PEM} = 0{,}48$):

$$EC = \frac{57{,}85}{0{,}48} = 120{,}52 \frac{\text{kWh}}{\text{nm}}.$$

Na Slici 53 je prikazana simulacija PTW faze vodika.



Slika 53: Simulacija PTW faze vodika.

7.4.3. Utjecaj PEM gorivnog članla, baterije i elektromotora

Kod broda pogonjenim vodikom, PTW faza nema nikakvih emisija tijekom pretvaranja energije iz kemijskog oblika u mehanički, ali je potrebno uzeti u obzir utjecaj proizvodnje elektromotora, baterije i PEM gorivnog članka jer i oni doprinose ukupnom ugljičnom otisku. Primjena tehnologije gorivnih članaka u procesu proizvodnje električne energije za brodske potrošače omogućuje veću energetsku efikasnost zbog manje potrošnje goriva i smanjenje emisije plinova. Gorivni članci dobar su izbor za opskrbu brodskih potrošača, posebno u lukama i u plovidbi obalnim područjem. Također, generator električne energije može se zamijeniti sustavom sa gorivnim člancima. Nivo snage i tip struje (AC ili DC) kojom se opskrbljuje mreža slični su onima proizvedenim uobičajenom tehnologijom. Na putničkom brodu gorivni članci

mogu biti korišteni i kao glavni izvor energije u većem obimu tijekom krstarenja pri manjim brzinama, pogotovo u zaštićenim područjima, te tijekom uplovljavanja/isplovljavanja i boravka u luci.

Kako bi uzeli u obzir utjecaj PEM gorivnog članka u cjeloživotnoj analizi, potrebno je u programskom paketu GREET 2020 unijeti masu pojedinih materijala PEM gorivnog članka. U Tablici 20 je prikazan popis materijala i njihove mase.

Tablica 20: Popis materijala i njihove mase [74].

Materijal	Masa materijala (kg)
Porozni karbonski papir	29,10
Epdm guma	19,40
PVC	2667,50
Platina	2,43
Bakar	2425,00
Čelik	8,730,00
Naflion	2,43
Aluminij	1940,00
Grafit	2910,00

U Tablici 21 su prikazani rezultati analize emisija stakleničkih plinova PEM gorivnog članka

Tablica 21: Rezultati analize ugljičnog otiska PEM gorivnog članka.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg CO_2-eq/nm)
CO_2	1	1,070
CH_4	25	0
N_2O	298	0,0053
Ugljični otisak		1,075

Unatoč visokoj cijeni odabrane su Litij-ionske (eng. *Li-ion*) baterije jer imaju najveću gustoću energije [75].

Bitno je uzeti u obzir promjene baterije tijekom životnog ciklusa. Kako baterija može trajati 10 godina, a životni vijek broda je oko 20 godina, razmatrat će se ugljični otisak zbog promjene baterija u ciklusu.

Kako bi uzeli u obzir utjecaj baterija, potrebno je u programskom paketu GREET 2020 unijeti ukupnu masu baterija za analizirani brod Prizna. Kako bi izračunali masu baterije, prethodno je potrebno izračunati kapacitet baterije (eng. *battery capacity*, *BC*). *BC* računamo pomoću izraza:

$$BC = 1{,}2 \cdot EC \cdot 2 \cdot l = 1{,}2 \cdot 120{,}52 \cdot 2 \cdot 1{,}6 = 465{,}65 \text{ kWh}.$$

Dijeljenjem *BC* sa specifičnom energijom baterije (0,22 kWh/kg) dobivamo masu baterije potrebnu za rad broda pogonjenim vodikom

$$m = \frac{465{,}65}{0{,}22} = 2116{,}61 \text{ kg}.$$

U Tablici 22 su prikazani rezultati analize ugljičnog otiska baterije.

Tablica 22: Rezultati analize ugljičnog otiska baterije.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg/nm)
CO_2	1	1,680
CH_4	25	0
N_2O	298	0,013
Ugljični otisak		1,694

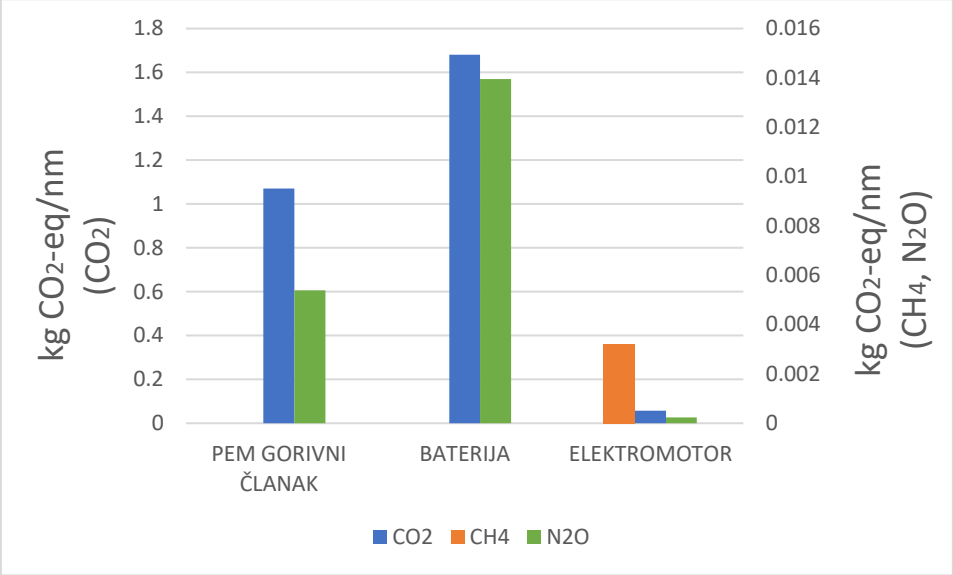
Pogonski elektromotori koriste se u svim režimima plovidbe broda. Rad elektromotora mnogo je tiši, te su smanjene emisije u okoliš.

U programskom paketu GREET 2020 za elektromotor su korištene iste komponente kao i za dizelski motor. U Tablici 23 su prikazani rezultati analize ugljičnog otiska elektromotora.

Tablica 23: Rezultati analize ugljičnog otiska elektromotora.

	GWP	Emisije stakleničkih plinova (kg/nm)
CO_2	1	$5{,}75 \cdot 10^{-2}$
CH_4	25	$3{,}22 \cdot 10^{-3}$
N_2O	298	$2{,}34 \cdot 10^{-4}$
Ugljični otisak		$6{,}10 \cdot 10^{-2}$

Na Slici 54 je prikazana usporedba emisija PEM gorivnog članka, baterije i elektromotora.



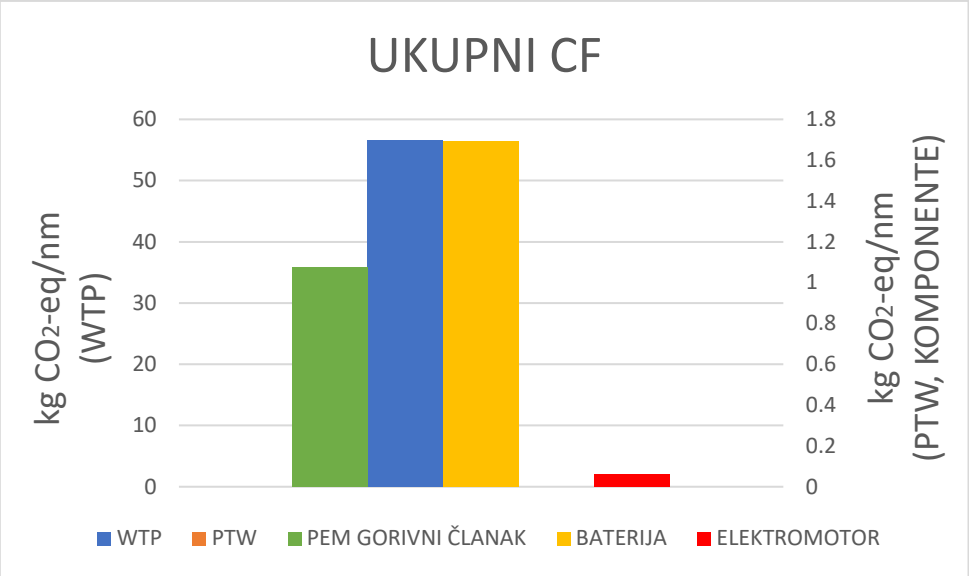
Slika 54: Usporedba emisija PEM gorivnog članka, baterija i elektromotora.

7.4.4. Ukupni ugljični otisak broda pogonjenim vodikovim gorivom

Ukupni ugljični otisak broda pogonjenim vodikom dobijemo zbrajanjem WTP i PTW faze te zbrajanjem svih njihovih komponenata (proizvodnju PEM gorivnog članka, elektromotora i baterije). Na Slici 55 i u Tablici 24 su prikazani ukupni rezultati.

Tablica 24: Ukupni ugljični otisak vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm).

WTP	56,574
PTW	0
Proizvodnja PEM gorivnog članka	1,075
Proizvodnja baterije	1,694
Proizvodnja elektromotora	$6{,}10 \cdot 10^{-2}$
Ukupno	59,4



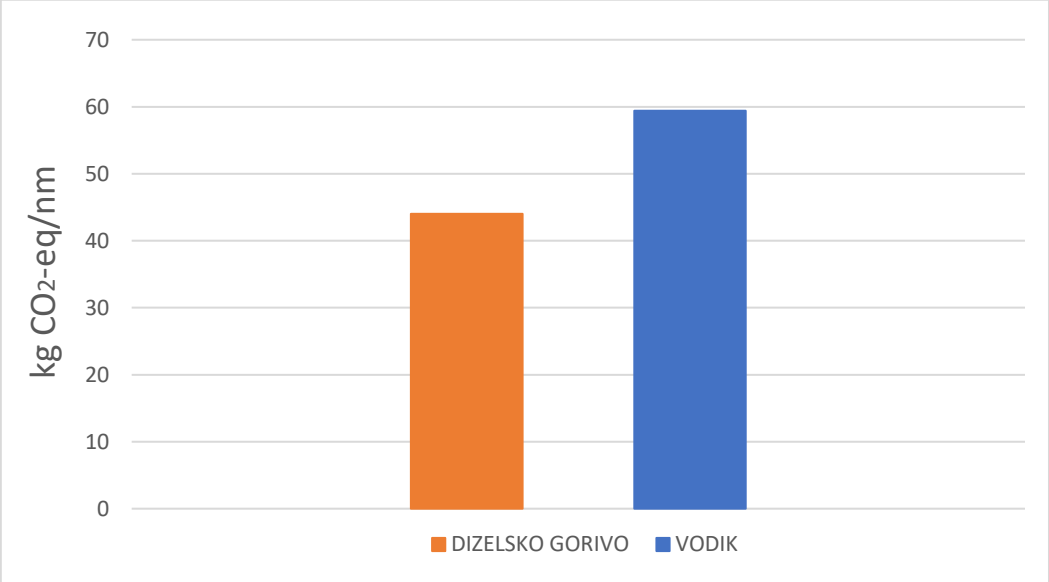
Slika 55: Ukupni ugljični otisak vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm).

7.5. Usporedba rezultata

Na Slikama 56 i 57 i u Tablicama 25 i 26 prikazana je usporedba LCA rezultata broda pogonjenim dizelskim gorivom, odnosno vodikom. Tijekom životnog ciklusa broda, postojeći brod na dizelski poriv emitira 39,89 kg CO_2-eq/nm, dok brod pogonjen vodikom tijekom svog rada ne emitira štetne emisije. Jedna od prednosti ove konfiguracije je ta što nema ispušnih plinova. Gledajuću ukupne ugljične otiske (za životni vijek od 20 godina), ugljični otisak za brod pogonjen dizelskim gorivom iznosi 4507,93 t CO_2-eq, dok za brod pogonjen vodikom iznosi 6082,88 t CO_2-eq. Uspoređujući rezultate, možemo zaključiti da proizvodnja vodika trenutno najviše emitira štetne plinove, ali razvojem novih tehnologija smanjit će se emisije štetnih plinova prilikom proizvodnje vodika.

Tablica 25: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm).

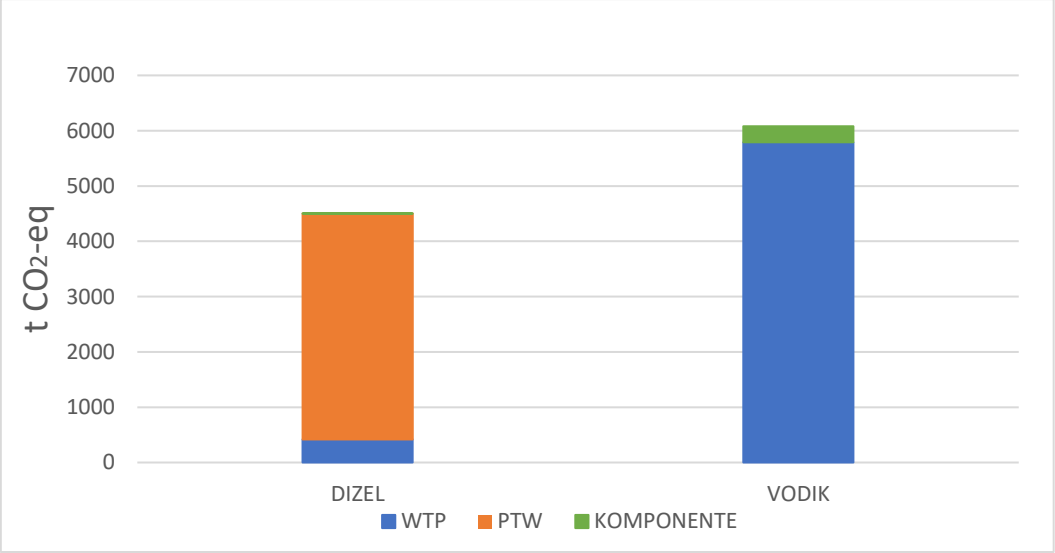
	Dizelsko gorivo	Vodik
WTP	4,070	56,574
PTW	39,893	0
Komponente	0,060	2,830
Ukupno	44,024	59,405



Slika 56: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (kg CO_2-eq/nm).

Tablica 26: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (t CO_2-eq).

	Dizelsko gorivo	Vodik
WTP	416,7885	5793,03
PTW	4084,899	0
Komponente	6,245683	289,85
Ukupno	4507,933	6082,88



Slika 57: Usporedba rezultata LCA dizelskog i vodikovog goriva (t CO_2-eq).

8. TEHNIČKE I OPERATIVNE MJERE ZA SMANJENJE NEŽELJENIH EMISIJA

Najveći izvor atmosferskog onečišćenja tijekom životnog ciklusa broda je proces izgaranja goriva. Izgaranjem goriva na bazi ugljikovodika u okoliš se ispuštaju stakleнички plinovi. U prethodnom poglavlju prikazani su rezultati provedene analize. Iz rezultata možemo vidjeti da brod pogonjen vodikom nema nikakvih emisija štetnih plinova, dok brod pogonjen dizelskim gorivom najviše emitira štetne plinove tijekom svoje eksploatacije. Iako su sustavi koji koriste ugljikovodike kao izvor energije u velikoj mjeri optimirani, postoji načini da se poboljša njihova energetska učinkovitost primjenom već postojećih tehnologija. S tom svrhom je u Drugoj IMO studiji o stakleničkim plinovima 2009. godine utvrđeno da dodatnim poboljšanjima na trupu broda, glavnom (porivnom) motoru i konstrukciji brodskog vijka zajedno sa smanjenjem eksploatacijske brzine moguće postići znatna smanjenja, Tablica 27, [76].

Tablica 27: Smanjenje CO_2 emisija pomoću postojećih tehnologija i mjera [76].

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%		

Gledajući sa stajališta emisije štetnih plinova, smanjenje brzine plovidbe značilo bi i smanjenje potrošnje goriva, a time i štetnih emisija. Međutim, time bi se povećalo vrijeme plovidbe pa bi se za isto ukupno vrijeme plovidbe prevozilo manje putnika i vozila. Isto tako, ukoliko plovidba više traje, rastu i ostali operativni troškovi, poput troškova posade. Za vlasnika broda to znači

optimiranje između smanjenja brzine plovidbe, odnosno potrošnje goriva i količine prevezenih putnika i vozila s ciljem postizanja ekonomske isplativosti. Na osnovi ovih ograničenja može se zaključiti da bi najpogodniji način smanjenja emisija CO_2 na putničkim brodovima bila primjena alternativnih goriva.

9. ANALIZA CJELOŽIVOTNIH TROŠKOVA

Analiza cjeloživotnih troškova (eng. *Life-Cycle Cost Analysis, LCCA*) provodi se za brod Prizna u slučaju da je pogonjen dizelskim gorivom i za slučaj kada je pogonjen vodikom. Rezultati *LCCA* analize se odnose na životni vijek broda koji je procijenjen na 20 godina. Ukupni troškovi brodskog energetskog sustava se sastoje od investicijskih troškova (eng. *Investment cost, IC*) i eksploatacijskih troškova koji se dalje dijele na troškove održavanja (eng. *life-cycle maintenance cost, LCMC*), troškove goriva (eng. *life-cycle fuel cost, LCFC*) i troškove emisije štetnih plinova (eng. *life-cycle carbon emission cost, LCCEC*) . Na Slici 58 su prikazani ukupni troškovi brodskog energetskog sustava.



Slika 58: Ukupni troškovi brodskog energetskog sustava [69].

U obzir su uzete mogućnosti uvođenja troškova emisije štetnih plinova (karbonske takse) pri čemu su razmatrani sljedeći modeli:

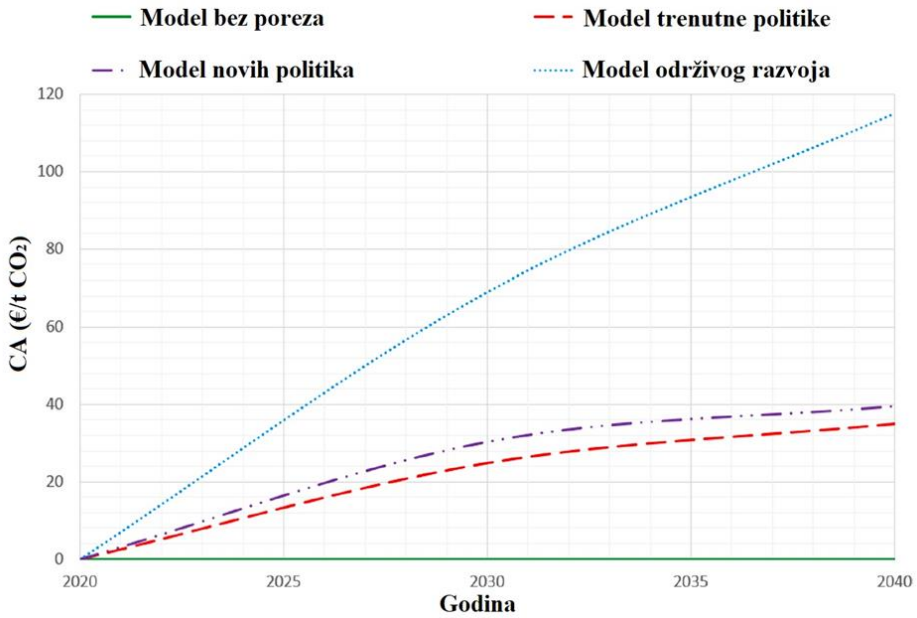
1. Model bez poreza (BP): karbonska taksa se neće primijeniti i nema troškova vezano uz emisije

2. Model trenutne politike (TP): uzimaju se trenutne vrijednosti

3. Model novih politika (NP): u obzir se uzimaju promjene u energetskom sektoru

4. Model održivog razvoja (OR): u ovom modelu prema planovima UN-a za 2030. god. cijena CO_2 raste do 125 €/tona.

Na Slici 59 je prikazana promjena cijene karbonske takse za sljedećih 20 godina za različite scenarije.



Slika 59: Cijene karbonske takse za sljedećih 20 godina [69].

9.1. Troškovi brodskog energetskog sustava pogonjenog dizelskim gorivom

Model troškova brodskog energetskog sustava koji je pogonjen dizelskim gorivom uključuju: investicijske troškove, troškove održavanja, troškove potrošnje goriva i karbonske takse.

Trošak ulaganja u novi dizelski motor računa se kao umnožak ukupne prosječne snage i cijene snage po kW (250 €/kw)

$$IC_D = P_{pr,uk} \cdot \frac{250€}{kW} = 93130\ €.$$

Trošak goriva računamo kao umnožak ukupnog prijeđenog puta tijekom 20 godina života, potrošnje goriva i PR_D

$$LCFC_D = LM \cdot FC_D \cdot PR_D = 102396 \cdot 12{,}43 \cdot 0{,}78 = 993308\ €,$$

gdje je PR_D cijena dizelskog goriva (0,78 €/kg).

Troškove održavanja računamo kao umnožak ukupnog prijeđenog puta broda Prizne tijekom 20 godina života, potrošnje energije i cijene u € po kWh:

$$LCMC_D = LM \cdot EC \cdot 0{,}014\ €/kWh = 102396 \cdot 57{,}85 \cdot 0{,}014 = 82923€.$$

Trošak emisije štetnih plinova računamo kao umnožak emisije u PTW fazi s koeficijentom *CA* [69].

$$LCCEC_D = \sum_{i=1}^{20} PTW_{A,i} \cdot CA_i = 243886\ €.$$

9.2. Troškovi brodskog energetskog pogonjenog vodikovim gorivom

LCCA vodika uključuje investicijske troškove, troškove održavanja i troškove potrošnje goriva. Za razliku od dizelskog goriva, vodik nema emisije štetnih plinova pa onda nema ni troškova karbonske takse.

Investicijski trošak broda pogonjenim vodikom uzima se kao kapitalni trošak PEM gorivnog članka uvećan za 50% kako bi se uzeo u obzir trošak spremnika za vodik i ostale potrebne opreme. Investicijski trošak broda pogonjenog vodikom računamo prema sljedećoj formuli:

$$IC_H = P_{PEM} \cdot 368\ \frac{€}{kW} \cdot 1{,}5 = 428352\ €,$$

gdje je P_{PEM} snaga gorivnog članka (P_{PEM}= 776 kW).

Investicijski trošak baterije se računa kao umnožak kapaciteta baterije *BC* i cijene baterije izražene u €/kWh (eng. *Price, PR*). Cijena baterije iznosi 200€/kWh. *BC* računamo prema idućoj formuli:

$$BC = 1{,}2 \cdot EC \cdot 2 \cdot l = 1{,}2 \cdot 120{,}52 \cdot 2 \cdot 1{,}61 = 465{,}65\ \text{kWh},$$

gdje je *EC* potrošnja energije vodika dok je *l* duljina puta od Prizne do Žigljena. Nakon što smo izračunali *BC*, možemo izračunati i investicijski trošak baterije:

$$IC_B = BC \cdot PR_B = 465{,}65 \cdot 200 = 93130\ €.$$

Trošak goriva za slučaj vodika se računa prema sljedećoj formuli:

$$LCFC_H = LM \cdot FC_H \cdot PR_H\,.$$

Za izračun troškova potrošnje goriva vodika potrebna nam je potrošnja vodika (eng. *fuel consumption, FC*). *FC* vodika dobijemo dijeljenjem potrošnje energije vodika *EC* i neto kalorijskom vrijednosti vodika (eng. *net calorific value, NCV*). Neto kalorijska vrijednost vodika jednaka je 33,3 kWh/kg.

$$FC_H = \frac{EC}{NCV_H} = \frac{120{,}52}{33{,}3} = 3{,}61 \frac{\text{kg}}{\text{nm}},$$

$$LCFC_H = LM \cdot FC_H \cdot PR_H = 102396 \cdot 3{,}61 \cdot 9{,}5 = 3520378\ €,$$

gdje je PR_H cijena vodika. Cijena vodika iznosi 9,5 €/kg.

Trošak održavanja PEM gorivnog članka jednak je investicijskom trošku gorivnog članka, tj.

$$\text{LCM}C_{PEM} = P_{PEM} \cdot 368\ \frac{€}{kW} = 776 \cdot 368 = 285568\ €.$$

Trošak održavanja baterije računamo iz izraza:

$$\text{LCM}C_B = BC \cdot PRB_{2030} = 465{,}65 \cdot 169 = 78695\ €,$$

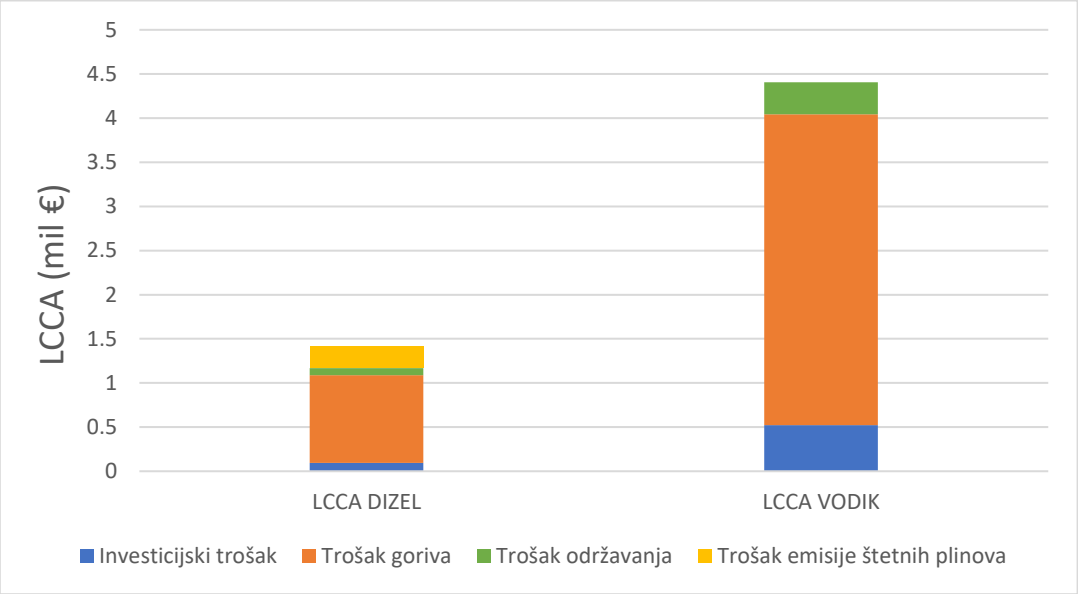
gdje je PRB_{2030} cijena baterije u 2030. godini (169 €/kWh).

9.3. Usporedba cjeloživotnih troškova

U Tablici 28 i na Slici 60 prikazane se usporedbe cjeloživotnih troškova za slučaj broda koji je pogonjen dizelskim gorivom i za slučaj broda pogonjenim vodikom. Iz priloženih rezultata vidimo da su ukupni troškovi za brod koji je pogonjen vodikom veći od broda pogonjenim dizelskim gorivom. Za razliku od broda koji je pogonjen dizelskim gorivom, brod pogonjen vodikom nema nikakvih troškova emisije štetnih plinova (karbonske takse), što je jedna od prednosti ove konfiguracije. Razvojem i unapređenjem tehnologije za očekivati je da će se cijena vodika smanjiti.

Tablica 28: Usporedba cjeloživotnih troškova (€).

Cjeloživotni troškovi (€)	Dizelsko gorivo	Vodik
Investicijski trošak	93130	521482
Trošak goriva	993308	3520378
Trošak održavanja	82923	364263
Trošak emisije štetnih plinova	243886	0



Slika 60: Usporedba cjeloživotnih troškova.

10. ZAKLJUČAK

Međunarodna pomorska organizacija pokušava svojim regulatornim okvirom utjecati na smanjenje emisija štetnih plinova u pomorskom prometu. U ovom radu proveden je proračun cjeloživotnih emisija CO_2 trajekta Prizna koji plovi na relaciji Prizna – Žigljen u akvatoriju Republike Hrvatske, za radni vijek od 20 godina. Za usporedbu je napravljena analiza ugljičnog otiska brodskog energetskog sustava koji kao pogonsko gorivo koristi vodik. Korišten je programski paket GREET 2020 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 broda pogonjenim dizelskim gorivom dodatno se razmatra proizvodnja glavnog pogonskog motora. Nadalje, kod broda pogonjenim vodikom također se razmatraju WTP I PTW faze, ali za razliku od broda pogonjenim dizelskim gorivom uzima se utjecaj proizvodnje PEM gorivnog članka, baterije i elektromotora. Ugljični otisak WTP faze dizelskog motora iznosi 4,07 kg CO_2-eq/nm, dok za vodik iznosi 56,57 kg CO_2-eq/nm. Ugljični otisak PTW faze dizelskog motora iznosi 39,89 kg CO_2-eq/nm, dok kod vodikove konfiguracije nema emisija u PTW fazi. Jedna od glavnih prednosti brodova pogonjenim vodikom je što tijekom eksploatacije ne generiraju štetne emisije. Ukupni CF za konfiguraciju s dizelskim motorom iznosi 4507,93 t CO_2-eq, dok za vodikovu konfiguraciju iznosi 6082,88 t CO_2-eq. Usporedba ovih vrijednosti jasno pokazuje da brod pogonjen dizelskim gorivom ima manje cjeloživotnih emisija stakleničkih plinova nego brod pogonjen vodikom. Kod broda pogonjenim vodikom većina emisija stakleničkih plinova otpada na sam proces proizvodnje vodika.

Shodno tome, 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.

Također, napravljena je i usporedba cjeloživotnih troškova broda pogonjenim dizelskim gorivom, odnosno pogonjenim na vodik. Ukupni troškovi za dizelsku konfiguraciju iznose 1413249 €, dok za vodikovu konfiguraciju ukupni trošak iznosi 4406125 €. Ti iznosi su očekivani jer primjena vodika nije toliko razvijena kao primjena dizelskog goriva. Korištenje vodika kao alternativnog goriva pokazuje potencijal za primjene u brodograđevnoj industriji i

ostalim industrijama jer je ekološki najpovoljniji u eksploatacijskoj fazi. Razvojem novih tehnologija u proizvodnji i primjeni vodika kao alternativnog goriva, za očekivati je da će vodik postati energent šire uporabe u pomorskom prometu.

11. LITERATURA

[1] Nuchturee C, Li T, Xia H. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020; 134: 110145.

[2] Kontovas C A. Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation. Marine Policy. 2020; 113: 103815.

[3] https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php, [pristup 21.11.2020.].

[4] MEPC.203(62): Amendments to the Annex of Protocol of 1997 to amend the International convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI). 2011.

[5] MEPC.213(63): Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan. 2012.

[6] MEPC.214(63): Guidelines on the survey and certification of energy efficiency design index (EEDI). 2012.

[7] MEPC.224(64): Amendments to the 2012 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. 2014.

[8] MEPC.245(66): Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. 2014.

[9] MEPC.251(66): Amendments to MARPOL Annex VI and the 2008 NOX Technical Code. 2014.

[10] MEPC.215(63): Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI). 2012.

[11] https://www.marpol-annex-vi.com/eedi-seemp/, [pristup 21.11.2020.].

[12] MEPC.213(63): 2012 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP). 2012.

[13] https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/08/thought-leadership-shipping.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[14] https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php, [pristup 21.11.2020.].

[15] https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/cdb493bb-9b83-473e-9d6e-44069604fac8/sc09-02b.pdf?MOD=AJPERES, [pristup 21.11.2020.].

[16] https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/4fe7b6b0-65a3-4acf-ad3e-2ac759fc4953/sc09-02a.pdf?MOD=AJPERES, [pristup 21.11.2020.].

[17] http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx, [pristup 21.11.2020.].

[18] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vodik.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[19] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=65137, [pristup 21.11.2020.].

[20] Ustolin F, Paltrinieri N, Berto F. Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review. International Journal of Hydrogen Energy. 2020; 45(43): 23809-23480.

[21] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Jukic_Vodik_1%5B1%5D.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[22] Abe JO, Popoola API, Ajenifuja E, Popoola OM. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. International Journal of Hydrogen Energy. 2019; 44(29): 15072-15086.

[23] https://www.researchgate.net/publication/328037427/figure/fig1/AS:677456038096897@1538529514629/Schematic-overview-of-a-hydrogen-based-energy-economy.ppm, [pristup 21.11.2020.].

[24] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage, [pristup 21.11.2020.].

[25] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage, [pristup 21.11.2020.].

[26] https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/how-hydrogen-stored, [pristup 21.11.2020.].

[27] Ajanovic A, Haas R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. International Journal of Hydrogen Energy. 2020. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122.

[28] Kayfeci M, Keçebaş A, Bayat M. Chapter 3-Hydrogen production. Solar Hydrogen Production, Systems and Technologies. 2019; 45–83. doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5.

[29] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification, [pristup 21.11.2020.].

[30] https://www.lindeengineering.com/en/processplants/hydrogen_and_synthesis_gas_plants/gas_generation/steam_reforming/, [pristup 21.11.2020.].

[31] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming, [pristup 21.11.2020.].

[32] https://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/catalytic-steam-reforming-of-methanol-to-produce-hydrogen-on-supported-metal-catalysts, [pristup 21.11.2020.].

[33] https://www.athensjournals.gr/sciences/2016-3-1-1-Braga.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[34] https://www.engineering-airliquide.com/autothermal-reforming-atr-syngas-generation, [pristup 21.11.2020.].

[35] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis, [pristup 21.11.2020.].

[36] https://www.chemicool.com/images/electrolysis-water.png, [pristup 21.11.2020.].

[37] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification, [pristup 21.11.2020.].

[38] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/apsorpcija_plinova.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[39] https://www.seatrade-maritime.com/europe/havyard-makes-progress-hydrogen-powered-system-large-ships, [pristup 21.11.2020.].

[40] https://www.emedicalprep.com/study-material/chemistry/surface-chemistry/adsorption/, [pristup 21.11.2020.].

[41] Inal OB, Deniz C. Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis. Journal of Cleaner Production. 2020; 265: 121734.

[42] https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrogen-Fuel-Cells-for-Ship-Electric-Propulsion%3A-Shakeri-Zadeh/da02ccbf1d9e52f8c533b0477fd7bef6cacdfb23/figure/0, [pristup 21.11.2020.].

[43] Wu P, Bucknall R. Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry. International Journal of Hydrogen Energy. 2020; 45(4): 3193-3208.

[44] https://www.gencellenergy.com/news/afc-vs-pem/, [pristup 21.11.2020.].

[45] https://www.researchgate.net/profile/Hoda_Jafarizadeh2/publication/268811074/figure/fig2/AS:295442085629956@1447450290171/Schematic-representation-of-an-alkaline-fuel-cell-AFC-2.png, [pristup 21.11.2020.].

[46] https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/pafc/, [pristup 21.11.2020.].

[47] https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780128134474000054-f05-04-9780128134474.jpg, [pristup 21.11.2020.].

[48] https://cosia.ca/initiatives/greenhouse-gases/projects/molten-carbonate-fuel-cells, [pristup 21.11.2020.].

[49] https://www.researchgate.net/profile/Hoda_Jafarizadeh2/publication/268811074/figure/fig3/AS:295442085629957@1447450290863/Schematic-representation-of-a-molten-carbonate-fuel-cell-MCFC-2.png, [pristup 21.11.2020].

[50] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Solid_oxide_fuel_cell.svg, [pristup 21.11.2020.].

[51] Ruffini E, Wei M. Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach. Energy. 2018; 150: 329 – 341.

[52] Le Duigou A, Smatti A. On the comparison and complementarity of batteries and fuel cells for electric driving. International Journal of Hydrogen Energy. 2014; 39(31): 17873 –17883.

[53] Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy. 2010; 38(1): 24 – 29.

[54] http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF_OBNOVLJIVI_COM/URH_T5_4.FB_Usporedba_FC_vs_baterije-Vodice.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[55] https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=9c69d8a2_4, [pristup 21.11.2020.].

[56] https://electrotechnical-officer.com/all-about-ships-electrical-motors-for-drives-propulsion-and-thrusters/, [pristup 21.11.2020.].

[57] https://www.maritime-executive.com/article/new-technology-facilitates-hydrogen-storage, [pristup 21.11.2020.].

[58] https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_04_46_1135.html,[pristup 21.11.2020.].

[59] https://www.plovput.hr/pomorska-signalizacija/plovna-podrucja, [pristup 21.11.2020.].

[60] Latinac J. Hrvatsko putničko brodarstvo jučer, danas, sutra [diplomski rad]. Split: Pomorski fakultet; 2019.

[61] http://agencija-zolpp.hr/wp-content/uploads/2020/02/PUTNICI_VOZILA_2018-2019.pdf, [pristup 21.11.2020.].

[62] Kramarić M. Analiza putničkog brodarstva na području Republike Hrvatske [završni rad]. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2017.

[63] https://zadardaytrips.com/tour/exclusive-boat-tour-to-kornati-telascica-national-park-from-zaton-holiday-resort/, [pristup 21.11.2020.].

[64] http://www.057info.hr/vijesti/2015-02-15/na-trajektu-kornati-pred-zoru-rodena-djevojcica, [pristup 21.11.2020.].

[65] Ančić I, Perčić M, Vladimir N. Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: A case study of Croatia. Journal of Cleaner Production. 2020; 27: 122638.

[66] https://www.jadrolinija.hr/images/defaultsource/slike/bijelaflota/katamarani/silba/silba.jpg?sfvrsn=8, [pristup 21.11.2020.].

[67] https://www.jadrolinija.hr/o-nama/brodovi/trajekti/trajekti-lokalnih-linija/prizna, [pristup 21.11.2020.].

[68] http://report.crs.hr/hrbwebreports/Default.aspx, [pristup 21.11.2020.].

[69] Perčić M, Vladimir N, Fan A. Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia. Applied Energy. 2020; 279: 115848.

[70] https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/greet-greenhouse-gases-regulated-emissions-and-energy-use-transportation, [pristup 21.11.2020].

[71] https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf , [pristup 21.11.2020.].

[72] https://www.hydrocarbons-technology.com/, [pristup 21.11.2020.].

[73] https://www.rechargenews.com/transition/world-s-first-liquid-hydrogen-fuel-cell-cruise-ship-planned-for-norway-s-fjords/2-1-749070, [pristup 21.11.2020.].

[74] Garraín D, Lech´on Y. Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy. 2014; 39(4): 1769–1774.

[75] https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/, [pristup: 21.11.2020.].

[76] Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. Energy Policy. 2012; 40: 204–218.

PRILOZI

I. CD-R disc