

Analiza cjeloživotnih emisija i troškova različitih konfiguracija energetskega sustava putničkog broda

Trogrlić, Juraj

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:235:893989>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Juraj Trogrlić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Student:

Juraj Trogrlić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru na pruženoj podršci i razumijevanju prilikom pisanja ovog rada.

Juraj Trogrlić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Juraj Trogrlić** Mat. br.: 0035185926

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA CJELOŽIVOTNIH EMISIJA I TROŠKOVA RAZLIČITIH KONFIGURACIJA ENERGETSKOGA SUSTAVA PUTNIČKOG BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **LIFE CYCLE AND COST ASSESSMENT OF DIFFERENT POWER SYSTEM CONFIGURATIONS OF A PASSENGER SHIP**

Opis zadatka:

Ekološki kriteriji postaju sve važniji čimbenik u osnivanju, gradnji i eksploataciji svih tipova brodova. Pri analizi utjecaja broda na okoliš, određivanje njegova cjeloživotnog ugljičnog otiska predstavlja neizostavan korak, pri čemu je za preinake brodskoga energetskeg sustava u cilju smanjenja navedenih emisija potrebno voditi računa o ukupnim troškovima. U diplomskom radu potrebno je provesti analizu cjeloživotnih emisija ugljičnoga otiska višenamjenskog putničkog broda kapaciteta 150 putnika (30 u kabinskom smještaju), predviđenog za plovidbu u akvatoriju sjevernog Jadrana. Uz osnovnu konfiguraciju energetskeg sustava, koja uključuje motor s unutarnjim izgaranjem, potrebno je analizirati i alternativne konfiguracije. Navedena rješenja energetskeg sustava potrebno je usporediti i prema ekonomskim kriterijima, vodeći računa o mogućnostima implementacije *karbonske takse* u pomorski sektor.

Zadatak treba sadržavati:

1. opis problematike utjecaja broda na okoliš s osvrtom na brodove u priobalnoj plovidbi,
2. opis proračunske metodologije i korištene programske podrške,
3. tehnički opis analiziranoga broda i različitih konfiguracija energetskeg sustava,
4. proračun cjeloživotnih emisija različitih energetskeg konfiguracija broda i s njima povezanih troškova,
5. analizu rezultata s osvrtom na tehničke i operativne mjere za smanjenje utjecaja broda na okoliš.

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

Zadatak zadan:
30. travnja 2020.

Datum predaje rada:
2. srpnja 2020.

Predviđeni datumi obrane:
6. – 10.7.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPIS PROBLEMATIKE UTJECAJA BRODA NA OKOLIŠ	3
2.1. Postojeće odredbe o ograničenju emisije stakleničkih plinova.....	4
2.2. Statistička analiza izračunatih vrijednosti EEDI-a kod novogradnji	6
2.3. Strategija za smanjenje emisija stakleničkih plinova.....	9
2.4. Struktura trgovačke flote s obzirom na emitirane količine stakleničkih plinova.....	11
2.5. Priobalna plovidba	12
3. OPIS PRORAČUNSKE METODOLOGIJE I RAČUNALNE PODRŠKE	15
3.1. Proračunska metodologija.....	15
3.2. Ciklus goriva.....	17
3.2.1. Izračun potrošnje energije u fazi 1	17
3.2.2. Izračun emisija ispušnih plinova i čestica u fazi 1	18
3.2.3. Specifičnosti prilikom izračuna utroška energije i emisija unutar faze 1	21
3.2.4. Sumiranje utroška energije i emisija pojedinih segmenata faze 1	22
3.2.5. Utrošak energije i emisije za vrijeme plovidbe.....	23
3.2.6. Ukupne i lokalizirane emisije glavnih zagađivača.....	24
4. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOGA BRODA	25
4.1. Konfiguracija hibridnog energetskog sustava.....	25
4.1.1. Dizelski motor.....	26
4.1.2. Prijenosnik snage	28
4.1.3. Pogonski elektromotori	29
4.1.4. Gorivni članci.....	31
4.1.5. Baterije	34
4.1.6. Spremnici goriva za rad dizelskog motora i gorivnih članaka.....	36

4.2. Konfiguracija energetskog sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	37
4.3. Konfiguracija energetskog sustava broda na gorivne članke	39
4.4. Konfiguracija brodskog energetskog sustava na električni pogon (baterije)	41
4.5. Usporedba energetskih konfiguracija	43
5. PRORAČUN CJELOŽIVOTNIH EMISIJA ENERGETSKIH KONFIGURACIJA BRODA	46
5.1. Dizelsko gorivo	47
5.2. LNG	50
5.3. Električna energija	50
5.4. Ulazni podaci za energetske konfiguracije broda	52
5.4.1. Konfiguracija hibridnog energetskog sustava	52
5.4.1.1. Potrošnja dizelskih motora	52
5.4.1.2. Potrošnja LNG goriva	53
5.4.1.3. Potrošnja električne energije pohranjene u baterijama	53
5.4.2. Konfiguracija energetskog sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	55
5.4.2.1. Potrošnja dizelskih motora	55
5.4.2.2. Potrošnja dizel generatora	55
5.4.3. Konfiguracija energetskog sustava broda na gorivne članke	56
5.5. Analiza rezultata za različite energetske konfiguracije	56
5.6. Metode poboljšanja energetske učinkovitosti broda	59
6. IZRAČUN TROŠKOVA POVEZANIH UZ ENERGETSKE KONFIGURACIJE	61
6.1. Konfiguracija hibridnog energetskog sustava	62
6.2. Konfiguracija energetskog sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	63
6.3. Konfiguracija energetskog sustava broda na gorivne članke	64
6.4. Usporedba troškova različitih energetskih konfiguracija	65
7. ZAKLJUČAK	67
LITERATURA	68
PRILOZI	72

POPIS SLIKA

Slika 1.	Potrošnja goriva po godinama IEA, IMO, ICCT [3].....	3
Slika 2.	Grafički prikaz zahtijevanog EEDI-a po fazama	6
Slika 3.	CO ₂ emisije na globalnoj razini po vrsti brodova [6].....	7
Slika 4.	EEDI za kontejnerske brodove u usporedbi sa referentnom vrijednosti i fazom 3 [6]	8
Slika 5.	Udio brodova koji već zadovoljavaju EEDI zahtjeve za 2025. godinu (faza 3) [6] 9	
Slika 6.	Udio emitiranog CO ₂ po tipu broda i zastavi, 2013-2015 [6]	11
Slika 7.	Promjene u emisijama i intenzitetu CO ₂ po glavnim klasama brodova	12
Slika 8.	Globalna raspodjela emitiranog CO ₂ iz pomorskog sektora u 2015. godini	13
Slika 9.	Emisije CO ₂ po pojedinim fazama djelovanja brodova	14
Slika 10.	Faze uzete u obzir prilikom izračuna cjeloživotnog ugljičnog otiska	16
Slika 11.	Primjer izračuna utroška energije i emisija u fazi 1	22
Slika 12.	Mjerna skica dizelskog motora Caterpillar C18 ACERT.....	27
Slika 13.	Mjerna skica reduktora Mekanord 350HS	29
Slika 14.	Mjerna skica elektromotora 7ABZ 315LB-2	30
Slika 15.	Put nastanka dizelskog goriva (Well To Pump).....	48
Slika 16.	Mješavina sirove nafte za preradu u rafineriji.....	49
Slika 17.	Put nastanka LNG goriva (Well To Pump).....	50
Slika 18.	Put nastanka električne energije (Well To Pump).....	51
Slika 19.	Izvori električne energije u Europi	51
Slika 20.	Prikaz grafičkog sučelja programa GREET	54
Slika 21.	Ugljični otisak energetske konfiguracije.....	57
Slika 22.	Emisije CO ₂	58
Slika 23.	Emisije CH ₄	58
Slika 24.	Emisije N ₂ O.....	59
Slika 25.	Prosječna cijena LNG po regijama [28]	62
Slika 26.	Usporedba iznosa početnih ulaganja u energetske konfiguracije.....	65
Slika 27.	Usporedba troškova godišnjeg održavanja energetske konfiguracije	66
Slika 28.	Usporedba troškova goriva energetske konfiguracije	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba emisija CO ₂ u pomorskom sektoru i na globalnoj razini [3].....	4
Tablica 2. Prikaz zahtijevane snage brodskog energetskeg sustava	25
Tablica 3. Podaci o energetskej nezavisnosti plovidbe.....	26
Tablica 4. Tehničke karakteristike dizelskog motora.....	27
Tablica 5. Tehničke karakteristike reduktora	28
Tablica 6. Dimenzije elektromotora 7ABZ 315LB-2	30
Tablica 7. Tehničke karakteristike elektromotora.....	30
Tablica 8. Usporedba različitih tipova gorivnih članaka.....	33
Tablica 9. Tehničke karakteristike SOFC jedinice.....	34
Tablica 10. Usporedba baterijskih tehnologija na osnovi 1 MW predane energije	35
Tablica 11. Usporedba baterijskih tehnologija na osnovi gustoće energije i snage	35
Tablica 12. Tehničke karakteristike AT6500 Li-ionskih baterija	36
Tablica 13. Masa i volumen goriva za rad dizelskih motora pri plovidbi s 13 čv	37
Tablica 14. Masa i volumen prirodnog plina za rad gorivnih članaka	37
Tablica 15. Masa i volumen goriva za rad dizel generatora.....	38
Tablica 16. Ukupna masa i volumen goriva na brodu.....	38
Tablica 17. Tehničke specifikacije dizel generatora D13 MG / HCM534C-1.....	39
Tablica 18. Tehničke specifikacije dizelskog motora D13 MG.....	39
Tablica 19. Masa i volumen prirodnog plina za rad elektro potrošača	41
Tablica 20. Tablica masa.....	44
Tablica 21. Iznos GWP za pojedine ispušne plinove	46
Tablica 22. Emisije uslijed izgaranja goriva [4].....	47
Tablica 23. Emisije WTP, dizel.....	49
Tablica 24. Emisije WTP, LNG	50
Tablica 25. Emisije WTP, električna energija.....	52
Tablica 26. Ukupne emisije WTW	56
Tablica 27. Urbane emisije WTW.....	57
Tablica 28. Moguće smanjenje emisija CO ₂ upotrebom postojećih mjera i tehnologija [18]..	60
Tablica 29. Troškovnik pojedinih elemenata energetske konfiguracije	61
Tablica 30. Iznos početne investicije u hibridnu energetske konfiguraciju	63
Tablica 31. Iznos početne investicije energetske konfiguracije pogonjene isključivo dizelskim motorima	64
Tablica 32. Iznos početne investicije za energetske konfiguraciju s gorivnim člancima	64
Tablica 33. Usporedba troškova različitih energetske konfiguracije	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	MJ/nm	specifična potrošnja energije
b_e	kg/kWh	specifična potrošnja goriva
$CH_{4,j,k}$	g/kJ	emisijski faktor CH_4 koristeći tehnologiju k i gorivo j
$CO_{j,k}$	g/kJ	emisijski faktor CO koristeći tehnologiju k i gorivo j
$CO_{2,j,k}$	g/kJ	emisijski faktor CO_2 prilikom izgaranja koristeći tehnologiju k i gorivo j
$CO_{2,\$}$	kg/USD	emisije CO_2 za uloženi novčani ekvivalent
$C_{ratio,j}$	-	maseni udio ugljika u gorivu j
ρ_j	g/m^3	gustoća goriva j za tekuća goriva
ρ_j	$g/10^3kg$	gustoća goriva j za kruta goriva
EC	kJ/kJ	ukupna potrošnja energije za pojedinačan segment
EC_j	kJ/kJ	utrošak energije iz goriva j tokom pojedinog segmenta
$EC_{j,k}$	kJ/kJ	potrošnju procesnog goriva j sa tehnologijom izgaranja k
$EF_{up,i,j}$	g/kJ	emisije faze 1 goriva j za proizvodnju i distribuciju procesnog goriva za pojedini segment
$EM_{cm,i}$	g/kJ	emisije onečišćivača i nastale sagorijevanjem goriva
EM_i	g/kJ	emisije i od goriva utrošenog tokom segmenta
E_{NG}	kJ	energija prirodnog plina
E_{in}	kJ	ukupno uložena energija
E_{SOFC}	kWh	energija generirana jednom SOFC jedinicom
E_u	kWh	energija potrebna za djelovanje broda
$H_{d,d}$	MJ/m^3	donja ogrjevna moć dizelskog goriva
$H_{d,NG}$	kJ/m^3	donja ogrjevna moć prirodnog plina
$H_{d,LNG}$	MJ/m^3	donja ogrjevna moć LNG goriva
K_i	-	koeficijent gubitka goriva za segment i
LHV_j	kJ/m^3	donja ogrjevna vrijednost goriva j za tekuća goriva
LHV_j	$kJ/10^3kg$	donja ogrjevna vrijednost goriva j za kruta goriva
LS_i	-	udio izgubljenog goriva s obzirom na ukupnu uloženu energiju segmenta i
M_d	Wh/kg	specifična gustoća energije baterijskog modula
m_g	10^3kg	masa dizelskog goriva
m_{gdg}	10^3kg	masa goriva za pogon dizel generatora
$m_{gl,mot}$	kg/h	potrošnja goriva dizelskog motora
$m_{g,mot}$	kg/h	potrošnja dizel generatora
m_{LNG}	kg	masa LNG
m_m	kg	masa baterijskih modula
n_{SOFC}	-	broj SOFC jedinica
P_{el}	kW	električna snaga

P_{NG}	kW	snaga prirodnog plina
$P_{NG,jed}$	kW	snaga potrebna jednoj SOFC jedinici
P_{os}	kW	instalirana snaga ostalih potrošača na brodu
P_u	kW	potrebna snaga za djelovanje broda
P_{pro}	kW	instalirana snaga propulzijskih uređaja
P_{SCR}	kW	potrebna snaga dizelskog motora
P_{SOFC}	kW	snaga SOFC jedinice
$P_{SOFC,jed}$	kW	električna snaga SOFC jedinice
s	nm	doplov broda
$S_{fuel j}$	-	udio procesnog goriva j od sveukupne potrošnje procesnog goriva za pojedini segment
$S_{tech k,j}$	-	udio tehnologije k izgaranja od sveukupnih tehnologija izgaranja u pojedinom segmentu za pojedino gorivo j
$SO_{x,j}$	g/kJ	faktor emisija SO_x za proces sagorijevanja goriva j
$S_{ratio j}$	-	maseni udio sumpora u gorivu j
TEM_{up}	g/kJ	ukupne emisije faze 1 za zadani ciklus goriva
v	čv	brzina
$VOC_{j,k}$	g/kJ	emisijski faktor hlapljivih organskih spojeva koristeći tehnologiju k i gorivo j
V_g	m ³	volumen goriva
V_{gdg}	m ³	volumen goriva za pogon dizel generatora
V_{NG}	m ³	volumen prirodnog plina
V_{LNG}	m ³	volumen LNG
V_t	m ³	volumen spremnika
ρ	kg/m ³	gustoća
ρ_{LNG}	kg/m ³	gustoća LNG-a
η_{el}	-	stupanj djelovanja elektromotora i elektro potrošača
$\$_{eurodizel}$	USD/10 ⁻³ m ³	cijena eurodizela
$\$_{LNG}$	USD/m ³	cijena LNG-a

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analiziran je cjeloživotni ugljični otisak različitih energetske konfiguracije putničkog broda za plovidbu sjevernim Jadranom. Razmotrena je hibridna energetska konfiguracija koja se sastoji od dizelska motora, gorivnih članaka i baterija. Druga konfiguracija za zadovoljenje energetske potreba koristi isključivo dizelske motore. Treća podrazumijeva isključivo gorivne članke. U radu je analizirana i varijanta energetske sustava koji bi uključivao samo baterije ali , pri čemu je pokazano da za zadani brod takav sustav nije izvediv. Za svaku energetske konfiguraciju procijenjena je masa. Izračunat je cjeloživotni ugljični otisak koristeći računalni program GREET te je naposljetku napravljena analiza i usporedba troškova.

Ključne riječi: putnički brod, brodski energetske sustav, ugljični otisak, dizelski motor, gorivni članci, baterije, troškovi

SUMMARY

This thesis deals with the lifelong carbon footprint analysis of different energy configurations of a passenger ship, aimed for operations in north Adriatic Sea. A hybrid energy configuration consisting of diesel engines, fuel cells and batteries is considered as the basic one. The second configuration uses only diesel engines to meet the energy needs. The third one uses only fuel cells. In addition, all-electric ship is considered, but due to extremely high power needs required size of batteries makes this option not feasible. For each power system configuration, mass was estimated. The lifelong carbon footprint was calculated by means of GREET software and relevant cost assessments and comparative analyses have been performed.

Key words: cruise ship, ship power system, carbon footprint, diesel engine, fuel cells, batteries, costs

1. UVOD

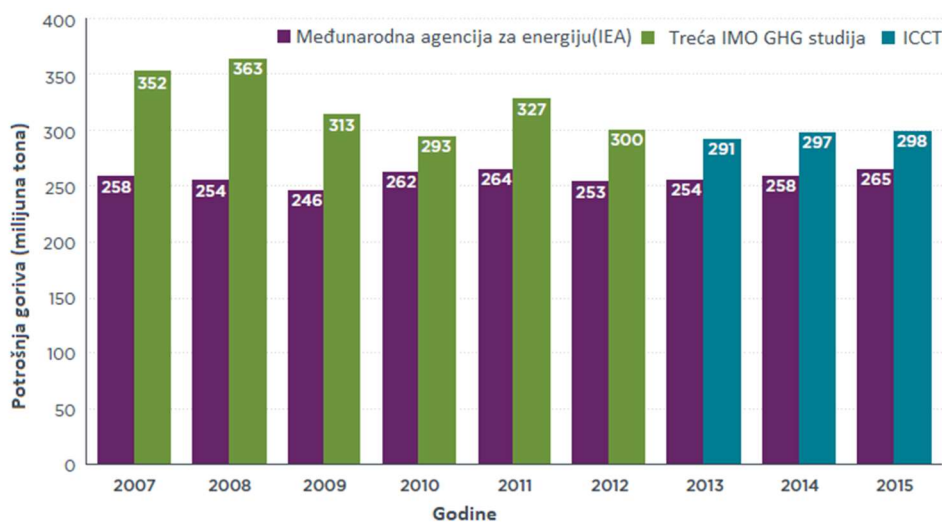
U novije vrijeme, u gotovo svim segmentima ljudskog života sve veći je naglasak na zaštitu okoliša. Takve težnje sve izraženije utječu na globalnu industriju u vidu implementacije alternativnih izvora energije. Tradicionalno se u industriji većinom koriste obnovljivi oblici energije koji najčešće podrazumijevaju fosilna goriva. Problem takvih goriva je što su ograničena količinom i njihovim se izgaranjem u atmosferu ispuštaju kemijski spojevi koji negativno djeluju na okoliš (CO_2 , NO_x i SO_x). Ugljikov dioksid (CO_2) smatra se najutjecajnijim stakleničkim plinom. Povećanjem njegove koncentracije u atmosferi, pogoduje se globalnom zatopljenju. Ostale dvije skupine kemijskih spojeva, NO_x i SO_x , nepovoljno djeluju na biljni i životinjski svijet. Rješenje ovog problema se pronalazi u postupnom prijelazu na nove, obnovljive izvore energije čijim korištenjem se u okoliš ne ispuštaju štetni spojevi. U nekim gospodarstvima, primjerice europskom, ulažu se značajni naponi kako bi se tradicionalni izvori energije gotovo u potpunosti zamijenili obnovljivima. Tako je na razini Europske unije donesen „Europski zeleni plan do 2050“ [1]. U tom dokumentu Europske komisije navodi se kako bi Europa do 2050. godine trebala postati prvi klimatski neutralan kontinent. Pokazalo se kako je smanjivanje emisija stakleničkih plinova jedini način da se izbjegnu katastrofalne posljedice klimatskih promjena. Međunarodna zajednica je spoznala ozbiljnost problema i složno su doneseni sporazumi kojima je svrha njegovo rješenje. Tako je donesen Pariški sporazum, čija je svrha ograničiti globalno zatopljenje na vrijednost uvećanu za 2°C u odnosu na temperaturu preindustrijskog razdoblja [2]. Međunarodna trgovina morem i utjecaj brodova na cjelokupno stanje nisu uzeti u obzir prilikom potpisivanja Pariškog sporazuma. Ulogu reguliranja pomorskog sektora preuzela je Međunarodna pomorska organizacija (IMO) donošenjem vlastitih strategija i pravila [3].

Ovaj rad obrađuje navedene probleme u području brodogradnje i pomorskog prometa. Glavni parametar koji je korišten je cjeloživotni ugljični otisak broda. Prilikom osnivanja, gradnje, preinaka i eksploatacije broda neizostavno je voditi računa o ukupnim troškovima nastalim uslijed smanjivanja emisija štetnih spojeva. U tom smislu, potrebno je procijeniti koliko će uvođenje novih tehnologija utjecati na cjeloživotni trošak broda. Kao primjer analiziran je višenamjenski putnički brod kapaciteta 150 putnika, predviđen za plovidbu u

akvatoriju sjevernog Jadrana. Uz osnovnu konfiguraciju broda koja uključuje motor s unutarnjim izgaranjem, razmatrane su i alternativne konfiguracije.

2. OPIS PROBLEMATIKE UTJECAJA BRODA NA OKOLIŠ

Brodovima se prevozi gotovo 90% roba na globalnoj razini. Procjenjuje se da sveukupni udio CO₂ kojeg emitira trgovačka flota na globalnoj razini iznosi 2,2% [4]. Predviđanja su da će se emisije stakleničkih plinova u pomorskom sektoru povećati kvantitativno i u globalnom udjelu emitiranih stakleničkih plinova u odnosu na sve ostale industrije. Predviđanja o apsolutnom povećanju udjela emitiranog CO₂ variraju. Neki autori smatraju da će se u razdoblju od 2012. do 2050. povećati za 50% - 250% dok su drugi optimističniji pa predviđaju povećanje od 20% - 120%. Neupitno je da će do drastičnog povećanja doći te će njegov konačni iznos ovisiti ponajviše o socijalnim i ekonomskim prilikama, ali i o tehničkim rješenjima u području brodske energetike. Druge industrije su u mogućnosti relativno jednostavno umanjiti svoj utjecaj u smislu emisija stakleničkih plinova dok je to pomorskom sektoru teže izvesti. Današnji dizelski motori su već dovedeni do gornjih granica iskoristivosti, sama tehnologija je usavršena i nema puno prostora za napredak. Značajne promjene su moguće ukoliko se pojavi novi način proizvodnje energije na brodovima što trenutno nije na vidiku. Ukoliko se ne ulože značajni naponi u razvoj novih tehnologija predviđa se da bi pomorski sektor mogao 2050. godine generirati 17% emitiranog CO₂ na globalnoj razini [3]. Sveukupna potrošnja goriva u pomorskom sektoru povećana je sa 291 milijuna tona na 298 milijuna tona od 2013. do 2015. godine, Slika 1. Za razdoblje od 2013. do 2015. godine korišteni su rezultati Međunarodnog vijeća za čisti prijevoz (ICCT). U istom razdoblju došlo je do povećanja prevezenih roba u iznosu od 7% gledano sa stajališta ukupne nosivosti.



Slika 1. Potrošnja goriva po godinama IEA, IMO, ICCT [3]

Emisije CO₂ povećane su sa 910 milijuna tona na 932 milijuna tona od 2013. do 2015. godine što predstavlja povećanje od 2,4%, Tablica 1. U 2015. godini udio emisija iz pomorskog sektora zauzimao je 2,6% od sveukupne globalne emisije CO₂. Međunarodna plovidba zauzima prvo mjesto sa 87% udjela emitiranog CO₂ u pomorskom sektoru. Ukoliko bi samo međunarodnu plovidbu promatrali kao cjelinu, nalazila bi se na 6. mjestu po emisiji CO₂ neposredno nakon Njemačke [5].

Tablica 1. Usporedba emisija CO₂ u pomorskom sektoru i na globalnoj razini [3]

	Treća IMO GHG studija (milijuna tona)						ICCT (milijuna tona)		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Globalne emisije CO ₂	31.959	32.133	31.822	33.661	34.726	34.968	35.672	36.084	36.062
Međunarodna plovidba	881	916	858	773	853	805	801	813	812
Nacionalna plovidba	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Ribarstvo	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Ukupno u pomorskom sektoru	1.100	1.135	997	914	1.021	942	910	930	932
Udio u globalnim emisijama	3,5%	3,5%	3,1%	2,7%	2,9%	2,6%	2,5%	2,6%	2,6%

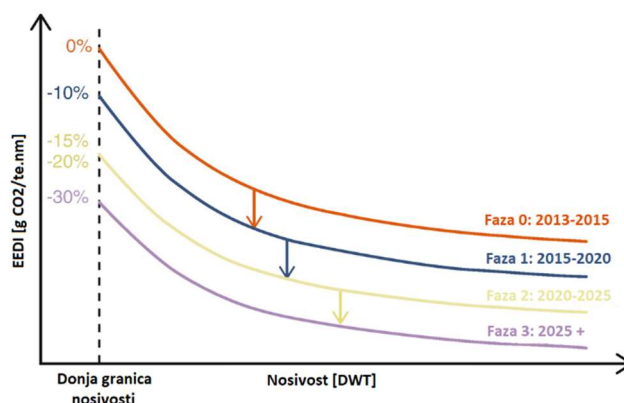
2.1. Postojeće odredbe o ograničenju emisije stakleničkih plinova

IMO regulira međunarodne pomorske aktivnosti. S ciljem očuvanja okoliša donio je složen skup pravila i ograničenja kojima je cilj smanjiti emisije CO₂. Najbitnija veličina unutar regulativa koje imaju za cilj unaprjeđenje energetske učinkovitosti brodskih sustava je Projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI). Ostale dvije regulative vezane su za Brodski plan upravljanja energetsom učinkovitošću (SEEMP) i Sustav za prikupljanje podataka o potrošnji goriva (DCS) nalažu savjesno planiranje operacija i sustava dok ne predstavljaju direktne zahtjeve koji moraju biti ispunjeni prilikom gradnje novih brodova [4]. EEDI nalaže da novogradnje moraju postajati energetski učinkovitije tijekom vremena. Ova regulativa stupila je na snagu 2013. godine. Primjenjiva je na sve trgovačke brodove preko 400 bruto registarskih tona (GT) u međunarodnoj plovidbi što predstavlja gotovo 95% flote. EEDI zahtjeva da novi brodovi emitiraju manje CO₂ po jedinici obavljenog gospodarskog učina izraženog kao g CO₂/dwt-nm. Propisano je da brodovi izgrađeni između 2015. do 2019. moraju ostvariti povećanje energetske učinkovitosti od 10% u odnosu na prosječnu vrijednost za brodove izgrađene između 1999. i 2009. koja je uzeta kao polazna vrijednost. Brodovi građeni između

2020. i 2024. moraju biti učinkovitiji za 20% dok brodovi građeni 2025. i nadalje moraju zadovoljiti povećanje učinkovitosti od 30%. 2017. godine postojali su dokazi da se postavljeni zahtjevi EEDI-a mogu za određene tipove brodova još pooštriti jer je polazna vrijednost nisko postavljena [6]. Neke članice IMO-a predložile su pooštavanje donesene regulative. Druge predlažu pomicanje faze 3 (30%) s 2025. na 2022. godinu i kreiranje nove faze 4 koja bi stupila 2025. god. U svakom slučaju EEDI se primjenjuje samo na novogradnju (i na brodove kod kojih se izvode veće preinake) tako da ne se ne može očekivati da će značajno utjecati na sveukupnu sliku emitiranih stakleničkih plinova u pomorskom sektoru u kratkom roku. Dugoročno gledano predviđa se da će ova regulativa smanjiti emisiju CO₂ za svega 3% u periodu od 2013. do 2050. Nažalost EEDI sam po sebi nije dovoljan da bi obrnuo trend povećanja ukupnih emisija stakleničkih plinova u pomorskom sektoru.

EEDI predstavlja najbitniju tehničku mjeru kojoj je cilj poticanje uvođenja energetske učinkovitijih sustava u pomorski sektor. To se ponajviše odnosi na brodske pomoćne sustave i glavni stroj. EEDI zahtijeva minimalne razine energetske učinkovitosti po milji prevezenog kapaciteta za različite vrste brodova. Sam EEDI je mehanizam koji se vrednuje prema učincima, a brodovlasnicima i projektantima prepušta na izbor odabir tehnologija i izvedbenih rješenja prilikom izrade samog broda unutar pojedine klase. Sve dok se zahtijevane razine energetske učinkovitosti zadovoljavaju moguće je koristiti sva dostupna rješenja i vrste pogonskih sustava. Što je EEDI manji, brod je energetski učinkovitiji. Sam EEDI se izračunava formulom koja se temelji na tehničkim parametrima za određenu vrstu broda [7].

Razina smanjenja CO₂ povećava se svakih 5 godina kako bi se pratio trend tehnološkog razvoja, novih mjera i učinkovitosti, Slika 2. EEDI je osmišljen za najveće i energetske najintenzivnije segmente svjetske trgovačke flote. Pokriva sljedeće tipove brodova: tankere, brodove za rasuti teret, LNG brodove, brodove za generalni teret, kontejnerske brodove, brodove za hladni teret, Ro-Pax, Ro-Ro teretne i putničke te brodove za krstarenje koji imaju nekonvencionalni pogon. Sagleda li se struktura trgovačke flote, EEDI obuhvaća brodove koji su zaslužni za 85% emisija CO₂ na razini čitave flote. Drugim riječima, flota zaslužna za 85% emisija je podložna međunarodnim pravilima i regulativama.



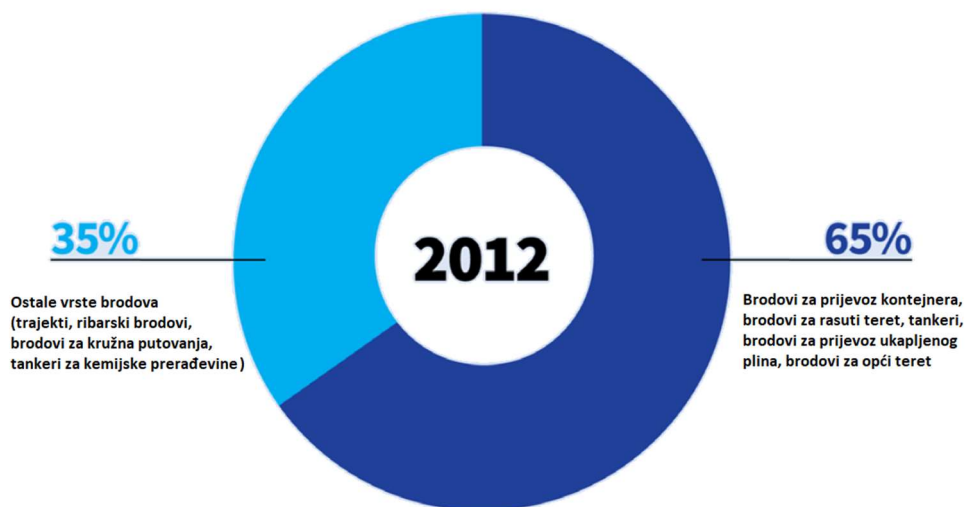
Slika 2. Grafički prikaz zahtijevanog EEDI-a po fazama

2.2. Statistička analiza izračunatih vrijednosti EEDI-a kod novogradnji

IMO kao donositelj EEDI regulative uključio je u samu regulativu klauzule kojima se provodi vrednovanje postignutih rezultata. One nalažu periodičko analiziranje stanja flote i postignutih rezultata nastalih provođenjem donesenih pravila. Svrha periodičkih analiza stanja je da se utvrdi u kojoj mjeri doneseni EEDI ima utjecaja na trenutno stanje. One daju temelj za razmatranje budućih faza i eventualno revidiranje postojećih. U sklopu ovog procesa IMO je osnovao različite dopisne skupine kojima je zadaća neovisno provoditi navedene analize i predlagati moguće promjene MEPC-u. Unatoč brojnim dokazima kako prekomjerman broj brodova građenih u fazi 0 i 1 zadovoljava standarde faze 2, dopisne grupe nisu izričito tražile pooštrenje pravila. Razlog koji se navodi za to je da bi se takvim djelovanjem ostavilo premalo vremena industriji za prilagodbu. Kao alternativa pooštrenju predloženo je da se faza 3 krene primjenjivati 2022. godine.

Europska federacija za prijevoz i okoliš (T&E), jedna od osnivačica koalicije za čisti transport morem (CSC) provela je statističku analizu brodova sadržanih u IMO EEDI bazi podataka. [6] Ona uključuje sve brodove za koje je EEDI obvezan i one koji su dobrovoljno uključeni u sustav. Sveukupno je 2452 brodova razvrstanih u 5 glavnih skupina zaslužnih za 65% emisija CO₂ u pomorskom sektoru, Slika 3. Međutim prilikom analize uzeti su u obzir samo brodovi za koje je EEDI obvezan. Analizirano je 2058 brodova u 5 različitih klasa. Od posebnog značaja navedene studije je analiza EEDI vrijednosti od 10% najboljih brodova u pojedinim klasama.

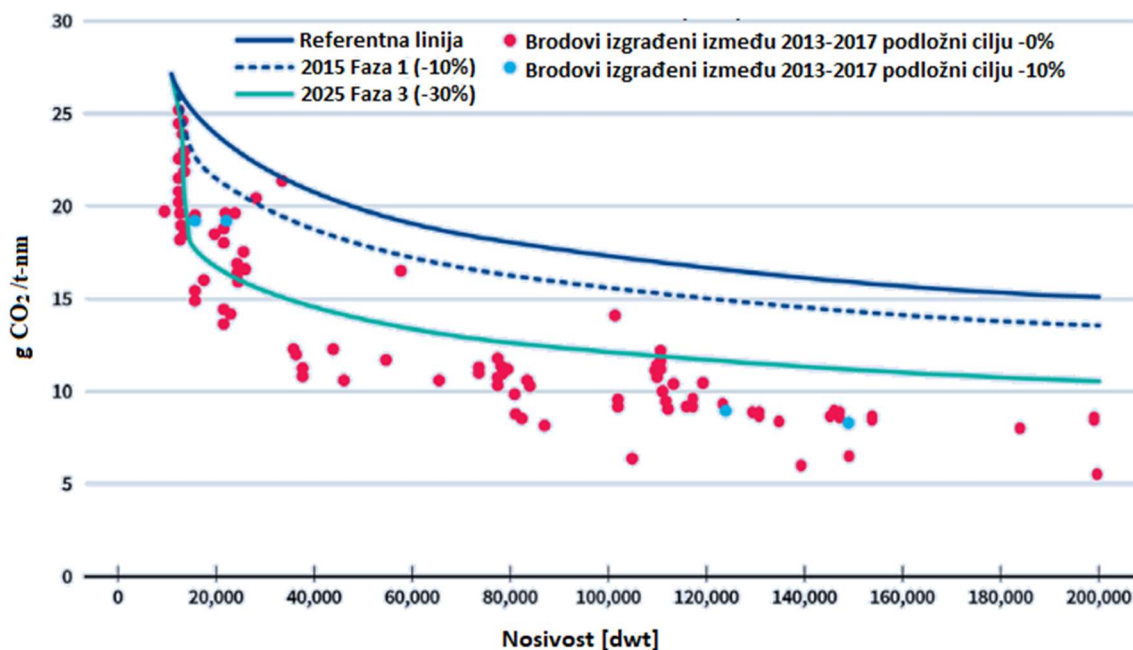
Emisije CO₂ u međunarodnoj plovidbi



Slika 3. CO₂ emisije na globalnoj razini po vrsti brodova [6]

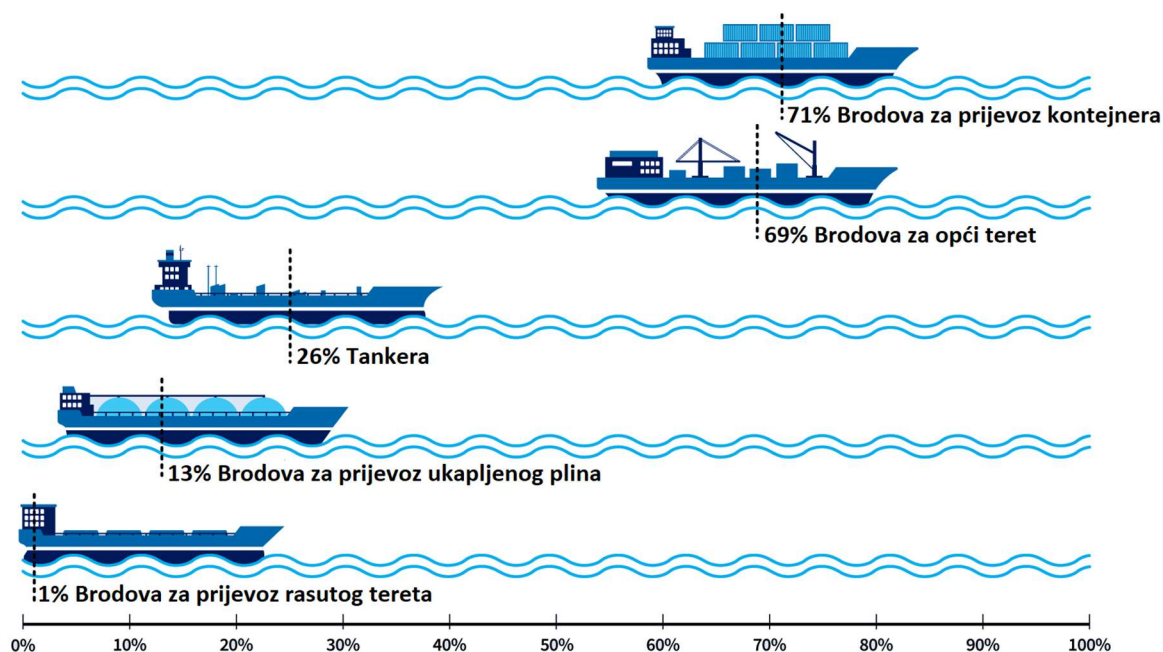
Pokazalo se kako je prosječna vrijednost EEDI od 10% najboljih brodova u pojedinim klasama čak 58% ispod referentne vrijednosti što je gotovo dva puta manje od zahtjeva u fazi 3, Slika 4. Navedene vrijednosti su postignute u prosjeku 10 godina prije nastupanja faze 3. Više od 71% brodova za prijevoz kontejnera izgrađenih između 2013. i 2017. godine već zadovoljava zahtjeve iz faze 3 [8]. Svega 9% iz te kategorije prijavilo je upotrebu inovativnih tehnologija za smanjenje EEDI, što upućuje na to da su moguća daljnja unaprjeđenja ukoliko se dostupne tehnologije primjene na veći opseg kontejnerskih brodova.

Vrijednosti EEDI brodova za prijevoz kontejnera



Slika 4. EEDI za kontejnerske brodove u usporedbi sa referentnom vrijednosti i fazom 3 [6]

Analiza navedene baze podataka pokazala je da uz iznimku kod brodova za prijevoz rasutog tereta, veliki dio brodova u svim klasama već zadovoljava zahtjeve faze 3 u prosjeku 10 godina prije njenog nastupanja. Manje od 1% brodova za prijevoz rasutog tereta udovoljava zahtjevima faze 3. Međutim vrijednosti EEDI od 10% najboljih brodova u skupini brodova za rasuti teret gotovo pa zadovoljavaju zahtjeve iz faze 3. Uzevši u obzir da ni jedan brod za rasuti teret nad kojim je rađena analiza nije prijavio uvođenje inovativnih tehnologija za smanjenje EEDI smatra se da postoji prostor za značajan napredak. Što se tiče uvođenja inovativnih tehnologija, situacija je slična i sa svim ostalim kategorijama brodova. Rezultati ove studije idu na ruku zagovarateljima oštrijih kriterija što se tiče uvođenja pojedinih faza. Trebalo bi dotični problem sagledati s više stajališta no čini se kao izgledan scenarij da bi se faza 3 mogla početi primjenjivati prije 2025. godine.



Slika 5. Udio brodova koji već zadovoljavaju EEDI zahtjeve za 2025. godinu (faza 3) [6]

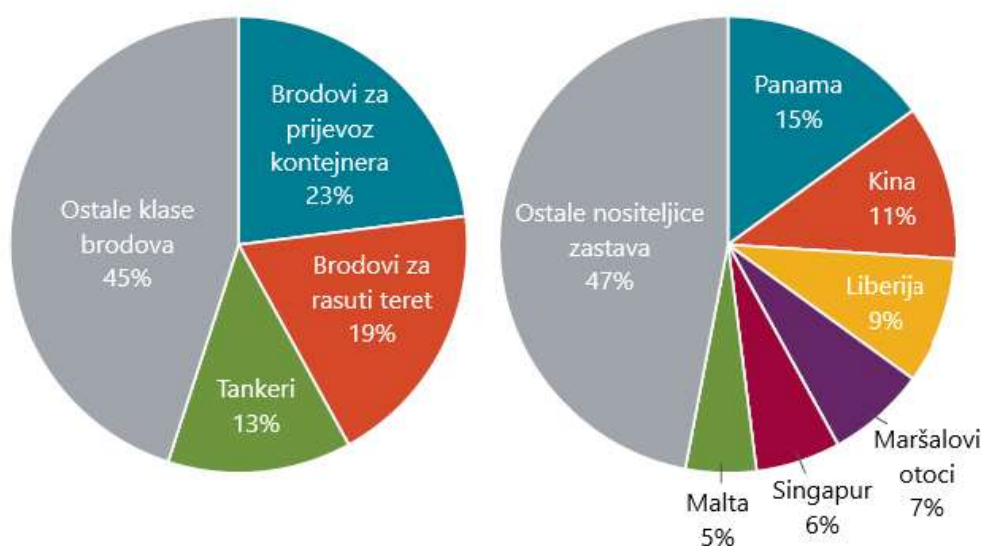
2.3. Strategija za smanjenje emisija stakleničkih plinova

IMO i njegove članice razvijaju smjernice i upute kako bi se odredile koje količine stakleničkih plinova treba smanjiti i optimalne načine za samu provedbu. Posebno se vodi računa o vremenskoj provedbi mjera kako ne bi drastično utjecale na ekonomske parametre. Bitno je osigurati ekonomski rast uz povećanje zahtjeva za energetske učinkovitost. Pomorski odbor za zaštitu okoliša (MEPC) koji je dio IMO-a donio je 2018. godine dokument pod nazivom: „Inicijalna IMO strategija za smanjenje emisija stakleničkih plinova s brodova“ [9]. Konačna verzija trebala bi biti donesena 2023. godine. Postoje različita stajališta vezano uz implementaciju i provedbu mjera. Primjerice Maršalovi otoci i Solomonovi otoci predložili su na 71. zasjedanju MEPC-a drastičnije mjere koje bi se trebale prihvatiti glede emisija stakleničkih plinova. Uključujući politiku jednakih udjela na globalnoj razini. Tom politikom bi se sektorski uspostavile mjere te bi članice imale različita pravila ovisno o tome u kojoj mjeri sudjeluju u međunarodnoj plovidbi. Suprotno tome druge države ne podržavaju taj pristup. Zagovaraju da se donese skup pravila koji bi vrijedio na globalnoj razini. Treći pristup kojeg zastupa Japan predlaže skup kratkoročnih i dugoročnih ciljeva za međunarodnu plovidbu. Konkretno zalaže se za reduciranje emisija CO₂ po godišnjem omjeru učinkovitosti (AER) za 40% u odnosu na 2008. godinu [3]. Članice IMO-a kontinuirano vode rasprave kako će konačna

verzija strategije izgledati. Sa sigurnošću se zna da će strategija uključivati kratkoročne, srednjoročne i dugoročne mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Kratkoročno ograničavanjem brzine za pojedine brodove može se trenutno smanjiti emisija stakleničkih plinova. Razlog tomu je što se otpor broda mijenja približno sa kvadratom brzine. Smanjivanjem brzine potrebna snaga za poriv broda pada još drastičnije a time i potrošnja goriva. Mnoge studije su pokazale da je smanjivanje brzine brodova isplativ način za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Srednjoročne i dugoročne strategije uključuju razvoj novih tehnologija. Potrebno je razviti nove propulzijske sustave s niskim emisijama ili bez emisija CO₂ kako bi se sektor mogao prebaciti s tradicionalnih goriva na čista i time onemogućiti emisije stakleničkih plinova prilikom eksploatacije broda. Treba voditi računa o emisijama koje se ispuštaju prilikom izrade tih vrsta pogona. Primjerice, pokazuje se da se danas prilikom izrade fotonaponskih modula proizvode značajne količine stakleničkih plinova iako su tijekom eksploatacije neutralni što se tiče emisija štetnih tvari. U studiji [10] objavljenoj od strane DNV-GL govori se kako bi korištenje *scrubbera* moglo biti financijski prihvatljivo i zadovoljiti kriterije vezane uz ispuštanje sumporovih spojeva. U suštini, oni su uređaji koji omogućuju prikupljanje krutih čestica iz ispušnih plinova prilikom kontakta sa kapljevnom koju sadrže u sebi. Primjerom tih tehnologija neće se značajnije utjecati na emisije stakleničkih plinova jer će brodovlasnici i dalje biti prisiljeni koristiti teško gorivo ukoliko se odluče na ugradnju *scrubbera*. Studija također govori kako bi biogorivo bilo zadovoljavajuća zamjena za teško gorivo. Proizvodnja biogoriva i njegovo izgaranje otpušta puno manje količine stakleničkih plinova. Problem biogoriva je što je njegova proizvodnja skuplja pa samim time i cijena te bez promjena zakonske regulative ne može konkurirati teškom gorivu. Trenutno se raspravlja o prijedlogu da se uvede porez na emitirane količine CO₂ u pomorskom sektoru [11]. Kroz njega bi bilo moguće prisiliti brodovlasnike da polako krenu prelaziti sa teškog goriva na čišće izvore i one sa nultim ugljičnim otiskom tijekom eksploatacije. Institut za pomorstvo, znanost i tehnologiju (IMarEST) i Kraljevska ustanova brodograđevnih inženjera (RINA) procjenjuju da se operativna učinkovitost izražena preko operativnog pokazatelja energetske učinkovitosti (EEOI) može povećati od 7,5% do 19,4% s obzirom na 2010. godinu primjenom postojećih tehnologija. Značajno povećanje od 50% do 90% moguće je isključivo promjenom korištenog goriva i uvođenjem alternativnih goriva. Kako bi do toga došlo neophodan je neki oblik poticaja. Najizglednije je da će se pojaviti u obliku karbonske takse preko koje će se prisiliti industrija da se prebaci s tradicionalnih izvora energije na one sa manjim cjeloživotnim ugljičnim otiskom.

2.4. Struktura trgovačke flote s obzirom na emitirane količine stakleničkih plinova

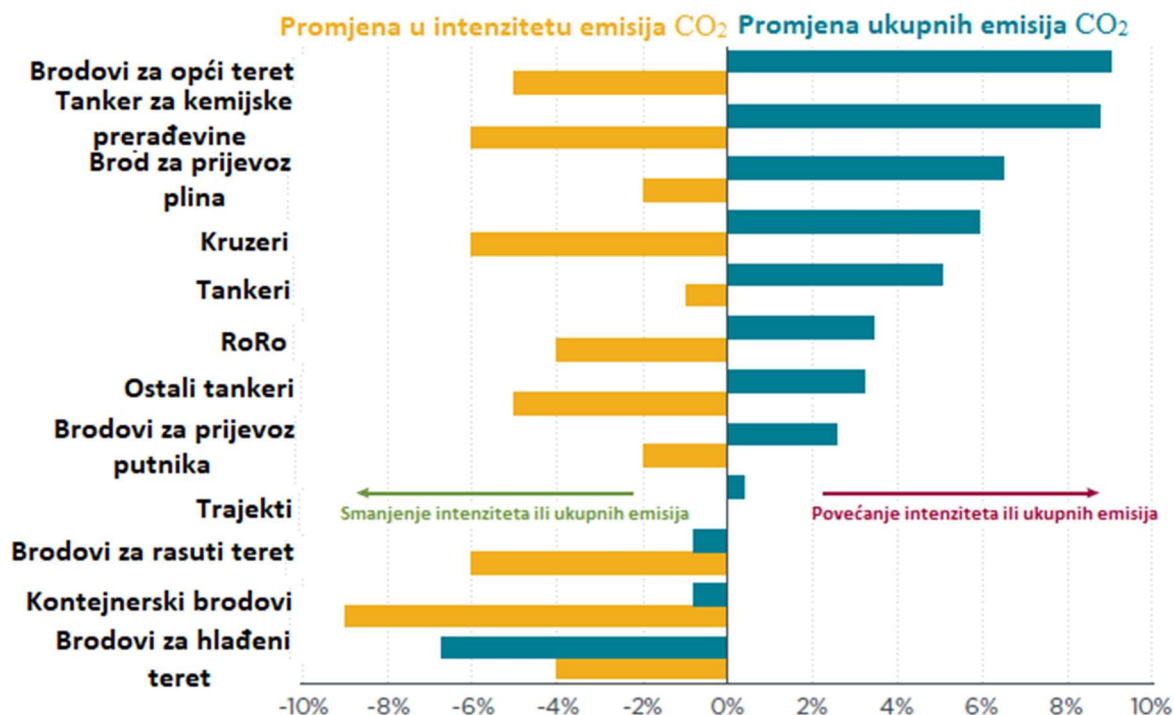
Tri klase brodova proizvode 55% emitiranog CO₂ u pomorskom sektoru. Kontejnerski brodovi 23%, brodovi za rasuti teret 19% i tankeri 13%, Slika 6. Navedena 3 tipa broda prevoze 84% ukupnog tereta. Kada gledamo emisije CO₂ po zastavama koje brodovi nose situacija je slična. Od ukupno 223 zastave, njih 6 je zaslužno za većinu emitiranog CO₂. Redom: Panama 15%, Kina 11%, Liberija 9%, Maršalovi otoci 7%, Singapur 6% i Malta 5%. Te zastave imaju registriranu većinu trgovačkih brodova sa ukupno 66% globalne nosivosti. Sve vrste brodova i države nositeljice zastava trebaju biti uključene u rješavanje problema vezano uz emisije stakleničkih plinova. Jasno je da će prethodne 3 klase brodova i navedene države nositeljice zastava imati najveću ulogu u donošenju regulativa i rješavanju ovog problema.



Slika 6. Udio emitiranog CO₂ po tipu broda i zastavi, 2013-2015 [6]

Iako se učinkovitost pogonskih sustava kod najzastupljenijih vrsta brodova povećala, ukupne količine emitiranog CO₂ su se povećale. U nekim slučajevima pojedine klase brodova su postale značajno učinkovitije, ali se ukupna emisija unatoč tomu povećala. Na primjer iako se intenzitet emisija CO₂ brodova za opći teret mjeran kao emisija CO₂ po jedinici prevezenog tereta smanjila za 5%, emisije CO₂ su se povećale za 9%, Slika 7. Vidljivo je da povećanje potražnje za prijevozom roba morskim putem nadmašuje učinke smanjenja operativne potrošnje uslijed unaprjeđenja pogonskih sustava. Kao sljedeći primjer možemo uzeti intenzitet emisija brodova za rasuti teret i kontejnerskih brodova. Njihov intenzitet se smanjio za 6% i 9%, drugim riječima ostvareno je smanjenje emisija dok su se sveukupne emisije CO₂ smanjile

za manje od 1% u periodu od 2013. do 2015. godine. U istom razdoblju povećana je potražnja za tim oblikom transporta. Od svih navedenih vrsta brodova jedino su brodovi za hlađeni teret smanjili ukupne emisije CO₂ za veći iznos nego što je smanjen intenzitet emisija. Razlog je globalno smanjene potražnje za ovim oblikom prijevoza od 5% u promatranom razdoblju.

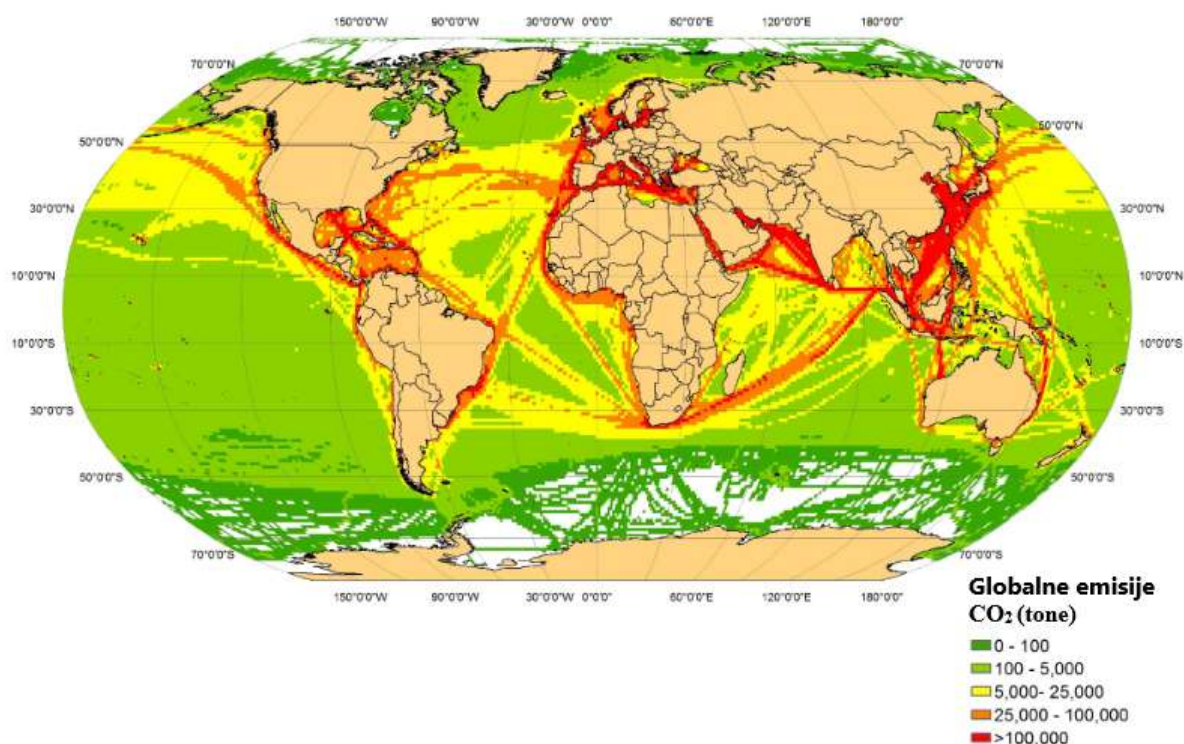


Slika 7. Promjene u emisijama i intenzitetu CO₂ po glavnim klasama brodova

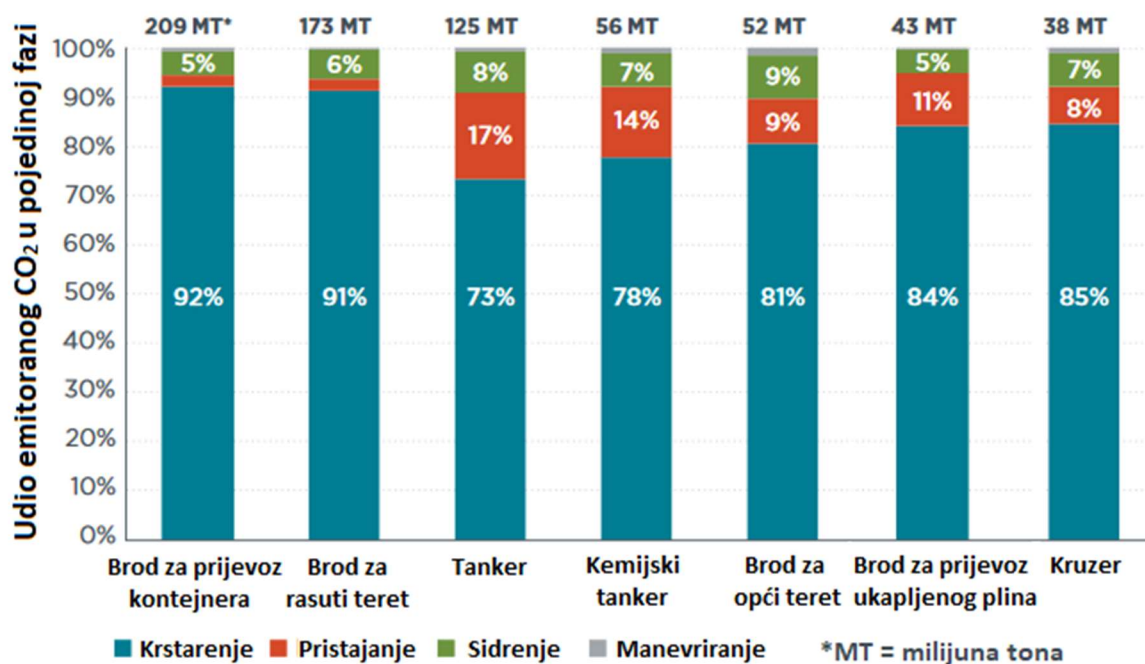
2.5. Priobalna plovidba

Većina studija vezanih uz utjecaje pomorskog sektora na okoliš odnosi se na najveće zagađivače. Pod tim se smatra da su analize provedene ponajviše nad bazom brodova za koje je EEDI obavezan. Pogledamo li Sliku 3 vidljivo je da velik udio emitiranog CO₂ dolazi od brodova za koje EEDI nije obavezan kriterij prilikom projektiranja. U tu skupinu spadaju trajekti, ribarska flota, tankeri za kemijske prerađevine, brodovi za prijevoz putnika, i općenito svi brodovi ispod 400 bruto registarskih tona. Pogledamo li Sliku 8 možemo zaključiti da velik dio brodova koji se intenzivno analiziraju u sklopu EEDI-a najviše vremena provode na otvorenom moru. Može se pretpostaviti da je ostatak flote ponajviše orijentiran na priobalnu i nacionalnu plovidbu. Ukoliko želimo detaljnije razmotriti utjecaj emisija ispušnih plinova na ljudsko zdravlje trebale bi se intenzivnije analizirati skupine brodova koje se svojim djelovanjem zadržavaju neposredno uz mjesta koje ljudi nastanjuju. Upravo tu spadaju trajekti,

putnički brodovi, ribarska flota i manji brodovi koji djeluju u priobalju. Također ne treba zanemariti utjecaj velikih brodova, no mjesta ukrcaja i iskrcaja velikih trgovačkih brodova su često locirana izdvojeno od samih gradskih središta i gusto naseljenih mjesta. Čak i u slučajevima kada su luke u samim gradovima, pogledamo li Sliku 9, vidljivo je da je većina životnog vijeka brodova izvan luka gdje i emitiraju većinu ispušnih plinova. Samo ispuštanje CO₂ nije se pokazalo kao izravno opasno po ljudsko zdravlje. Čak je poznato da povećane količine CO₂ pozitivno utječu na bujanje biljaka i vegetacije. Najveća opasnost prekomjernih emisija CO₂ dolazi uslijed doprinosa stvaranju efekta staklenika i povećanja globalne temperature. Direktna negativan utjecaj na ljudsko zdravlje predstavlja emisija NO_x, SO_x, čađe i stvaranje smoga zbog ispušnih plinova koji dolaze s brodova. Pretpostavka je da je opća populacija koja nastanjuje obalna područja ponajviše izložena utjecaju brodova kojima je područje djelovanja blizu obale, i u neposrednoj blizini samih naseljenih mjesta. Ti brodovi još uvijek nisu obuhvaćeni međunarodnim regulativama poput EEDI.



Slika 8. Globalna raspodjela emitiranog CO₂ iz pomorskog sektora u 2015. godini



Slika 9. Emisije CO₂ po pojedinim fazama djelovanja brodova

Valja imati na umu da brodovi u priobalnoj plovidbi češće imaju pogonske sustave koji koriste čišća goriva poput lakog dizelskog goriva umjesto teškog goriva te samim time emitiraju manje štetnih tvari direktno opasnih za ljudsko zdravlje poput NO_x, SO_x, čađa.

3. OPIS PRORAČUNSKE METODOLOGIJE I RAČUNALNE PODRŠKE

Danas postoji trend uvođenja novih tehnologija u brodski energetska sustav s ciljem povećanja učinkovitosti a samim time i smanjenjem njegova utjecaja na okoliš pa i ljudsko zdravlje. Prilikom razmatranja novih tehnologija često se govori o povećanju operativne učinkovitosti. Prezentiraju se podaci koji ilustriraju u kojoj se mjeri smanjila emisija stakleničkih plinova i štetnih tvari. Bitno je razmotriti kakav utjecaj ima primjena novih tehnologija od samog procesa nastanka, njene implementacije na proizvod i njezine eksploatacije tijekom životnog vijeka proizvoda. U ovom radu razmotrena je klasična izvedba broskog energetskog sustava s dizelskim motorom i alternativne konfiguracije s ciljem smanjenja cjeloživotnih emisija ugljičnog otiska, vodeći računa o ukupnim troškovima.

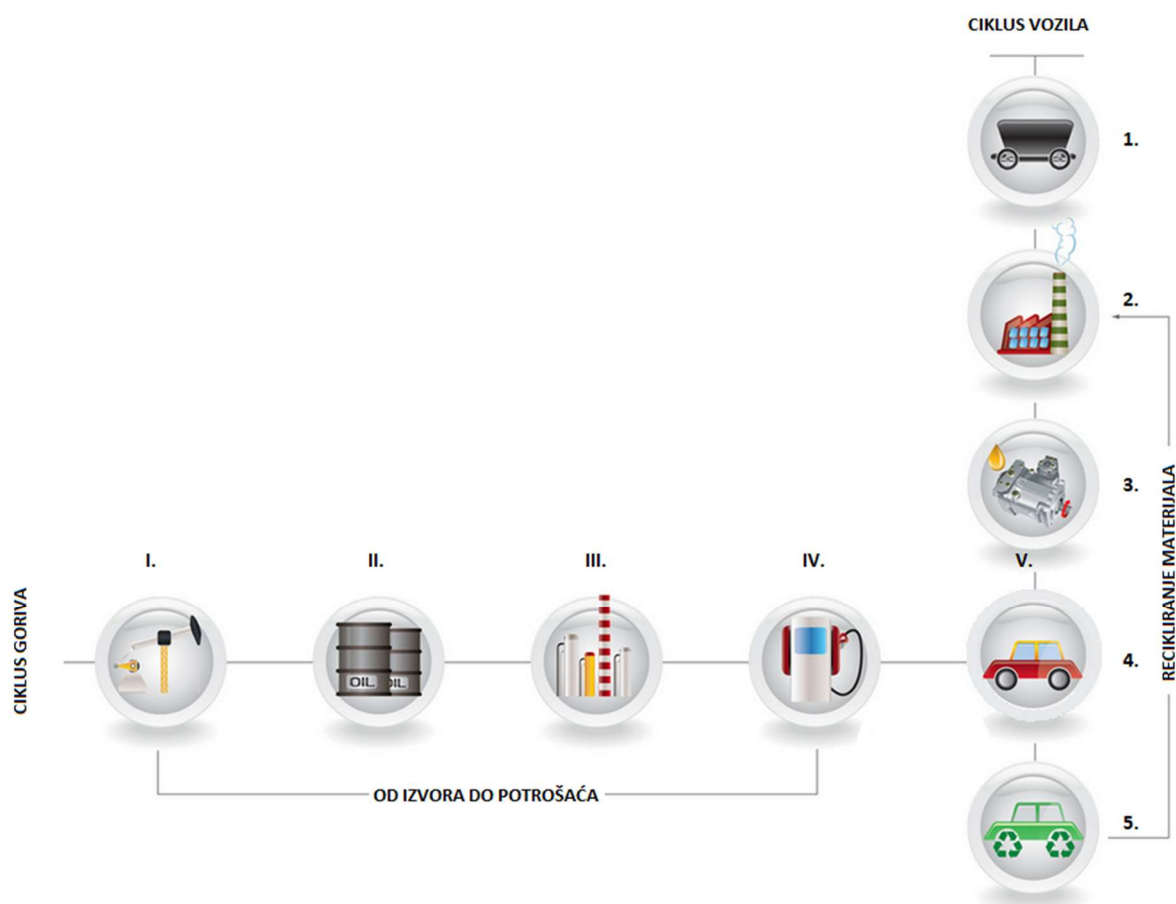
3.1. Proračunska metodologija

Kada razmatramo korištenje energije i emisiju stakleničkih plinova treba uzeti u obzir dva zasebna slučaja. Prvi je ciklus goriva, on uzima u obzir proizvodnju i korištenje goriva. Drugi ciklus vozila razmatra proces proizvodnje, korištenja i zbrinjavanja broda. Ciklus goriva za pojedini oblik goriva uključuje sljedeće procese: primarnu proizvodnju sirovine, transport i pohranu sirovine; proizvodnju goriva, transport, skladištenje i distribuciju goriva; korištenje goriva u brodu što podrazumijeva izgaranje goriva ili neki drugi oblik kemijskog procesa [12]. Ciklus vozila će u slučaju broda razmatrati brod i materijal od kojeg je brod izgrađen. Uzima u obzir sljedeće procese: iskop i nalaženje sirovih ruda, preradu materijala i oblikovanje, proizvodnju dijelova za brod, gradnju broda, zbrinjavanje iskorištenog broda te njegovo recikliranje. Kada uzmemo u obzir oba ciklusa moći će se izračunati cjeloživotni ugljični otisak. Prilikom analize broda s različitim energetska konfiguracijama moraju se uzeti u obzir oba ciklusa kako bi rezultati bili usporedivi. Prilikom promjene ili uvođenja nekog novog oblika pogonskog sustava često se mijenjaju parametri pojedinih ciklusa, samim time i cjeloživotni ugljični otisak. Na sljedećoj slici, prikazane su stavke koje su uzete u obzir prilikom izračuna cjeloživotnog ugljičnog otiska svih energetska konfiguracija, Slika 10.

Ciklus goriva

Ciklus vozila

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> I. Primarna proizvodnja sirovine II. Prijevoz i pohrana sirovine III. Proizvodnja goriva IV. Prijevoz, skladištenje i distribucija goriva V. Korištenje goriva u brodu | <ul style="list-style-type: none"> 1. Iskop i nalaženje sirovih ruda 2. Prerada materijala i oblikovanje 3. Proizvodnja dijelova za brod 4. Gradnja broda 5. Zbrinjavanje iskorištenog broda te njegovo recikliranje |
|--|---|



Slika 10. Faze uzete u obzir prilikom izračuna cjeloživotnog ugljičnog otiska

Prilikom razmatranja procesa koji se odvijaju tijekom životnog vijeka proizvoda radi bolje preglednosti razdvojeni su procesi koji se odvijaju prije samog operativnog djelovanja broda (faza 1) i procesi koji se odvijaju tijekom operativnog djelovanja broda (faza 2). U

daljnjem tekstu ovu podjelu ćemo koristiti i opisivati ih kao faza 1 i faza 2 radi bolje preglednosti.

3.2. Ciklus goriva

3.2.1. Izračun potrošnje energije u fazi 1

Prilikom procjene utroška energije i emisija u ciklusu goriva prvo se procjenjuje utrošak energije u kJ i emisija u gramima po kJ za pojedine segmente faze 1 ovisno o vrsti goriva [12]. Zatim se zbrajaju utrošci energije i emisije svih segmenata faze 1 kako bi se dobio ukupan iznos utrošene energije i emisija za čitavu fazu 1. Prilikom objedinjavanja pojedinih segmenata u fazu 1 između ostalih faktora uzima se u obzir gubitak goriva prilikom proizvodnje istog. Prilikom analize računa se ukupna potrošnja energije u ciklusu goriva i potrošnja samog goriva. Navedena potrošnja fosilnih goriva i emisija računa se kao potrošnja teškog goriva i lakog dizelskog goriva. Sveukupna energija uključuje energiju dobivenu iz fosilnih goriva i obnovljivih izvora energije. Stoga model može procijeniti količinu fosilnih goriva, tj. teškog goriva i lakog dizelskog goriva koji su zamijenjeni uvođenjem alternativnih izvora energije. Prilikom izračuna segmenata faze 1 ulaz energije po jedinici izlazne energije tj. dobivene energije se računa koristeći jednadžbu energetske učinkovitosti pojedinog segmenta. Ukupni unos energije sadrži same sirovine i procesna goriva. Kako bi se došlo do emisija pojedinih segmenata potrebno je razdvojiti sirovine i gorivo. Kako bi sagledali sve energetske čimbenike pojedinog segmenta potrebno je razmotriti oblike sirovina i dodatno uložene energije u pojedinom ciklusu za proizvodnju goriva ili neku drugu operaciju. Postoje 3 različita slučaja. Prvi slučaj podrazumijeva da se sav energetski potencijal pretvori u gorivo. U drugom slučaju dio energije se troši na proizvodnju korisnog goriva, a ostatak uključujući sporedni ulaz energije pretvara se u toplinu koja se može djelomično iskoristiti u samom procesu ili se proizvodi para. Prirodni plin koji se koristi kao gorivo uključen je u izračune potrošnje energije i emisija. Treći slučaj obuhvaća slučajeve kada nije bilo kemijskih procesa prilikom proizvodnje goriva. Od ukupnih energetske ulaza u sustav, jedinica energije u produktu goriva je dobivena iz jedinice energije sadržane u sirovini. Razlika između ukupne uložene energije i energije sadržane u dobivenom gorivu je procesna energija uložena prilikom dobivanja goriva. Primjer ovakvog procesa je dobivanje komprimiranog prirodnog plina (CNG) i ukapljenog prirodnog plina (LNG). U tom slučaju jednadžba (1) se koristi za procjenu količine goriva koje je potrebno uložiti tijekom proizvodnje.

$$p_f = \frac{1}{\eta} - 1 \quad (1)$$

p_f predstavlja količinu goriva koju je potrebno uložiti tijekom postupka kako bi se generirala jedinica energije za proizvodnju (kJ po kJ energije dobivenog goriva). η predstavlja učinkovitost pojedine faze (izlaz energije / ulaz energije). Izračunata potrošnja energije svih procesnih goriva za pojedinu fazu proizvodnje se razlaže na udjele svih prisutnih vrsta goriva koja su potrošena tokom pojedine faze. Na primjer, ako je MJ procesnog goriva potrošeno da bi se proizvelo GJ goriva za vrijeme faze 1. MJ energije procesnog goriva će se podijeliti u individualne vrste goriva odakle je energija došla (dizel, benzin, sirova nafta, LPG, ugljen, struja, biomasa). Razlaganje ukupne potrošene energije na njene izvore prilikom pojedinih procesa nužno je kako bi se mogle izračunati emisije ispušnih plinova i njihov sastav. Sastav emitiranih ispušnih plinova i čestica značajno ovisi o vrsti goriva koje je korišteno. Udio procesnih goriva značajno se razlikuje u ukupnoj količini procesnog goriva potrebnog za pojedini segment ciklusa goriva. Za postojeće industrije koje se bave proizvodnjom nafte, ugljena i električne energije količine i oblik procesnih goriva se obično procjenjuju na bazi povijesnih zapisa i evidencija. U tom slučaju koriste se rezultati dobiveni prethodnim istraživanjem [13]. Za nekonvencionalne industrije koje se bave proizvodnjom novih goriva i obnovljivih izvora energije udio procesnih goriva se izračunava uzimajući u obzir potrošnju procesnih goriva u sličnim industrijama za koje postoje povijesni podatci.

3.2.2. Izračun emisija ispušnih plinova i čestica u fazi 1

Emisije CO, NO_x, SO_x, CH₄, N₂O, CO₂ i ostalih spojeva za svaki segment faze 1 izračunavaju se u (g/kJ od goriva). Emisije nastale tijekom faze 1 uključuju emisije nastale tijekom pojedinih segmenata. Nastaju uslijed sagorijevanja procesnog goriva, kemijskih reakcija tijekom procesa, curenjem i isparavanjem goriva. Emisije nastale sagorijevanjem procesnog goriva u pojedinim segmentima se izračunavaju pomoću formule (2).

$$EM_{cm,i} = \frac{(\sum_i \sum_k EF_{i,j,k} \cdot EC_{j,k})}{10^6} \quad (2)$$

$EM_{cm,i}$ predstavlja emisije onečišćivača i nastale sagorijevanjem goriva u g / kJ. Član $EF_{i,j,k}$ je emisijski faktor od zagađivača i za procesno gorivo j sa načinom izgaranja k . $EC_{j,k}$ predstavlja

potrošnju procesnog goriva j s tehnologijom izgaranja k mjereno u kJ/kJ za zadanu količinu goriva. Izračunava se za svaki segment pomoću formule (3).

$$EC_{j,k} = EC \cdot S_{fuel\ j} \cdot S_{tech\ k,j} \quad (3)$$

EC je ukupna potrošnja energije za pojedinačan segment kJ/kJ. Član $S_{fuel\ j}$ predstavlja udio procesnog goriva j od sveukupne potrošnje procesnog goriva za pojedini segment i $S_{tech\ k,j}$ predstavlja udio tehnologije k izgaranja od sveukupnih tehnologija izgaranja u pojedinom segmentu za pojedino gorivo j .

$$\sum_k tech_{k,j} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_j fuel_j = 1 \quad (5)$$

Udjeli tehnologija izgaranja ($S_{tech\ k,j}$) za pojedino gorivo se razlikuju ovisno o načinu izgaranja, načinu tehnološkog procesa, troškovima tehnologije koja se koristi prilikom izgaranja i regulativama koje su propisane za stacionarne pogone (elektrane, rafinerije, itd.). Prilikom analize, udjeli tehnologija sagorijevanja su pretpostavljeni i dani kao početni uvjeti za svaki pojedini segment faze 1. U većini slučajeva za zadanu tehnologiju sagorijevanja postoje dva skupa parametara, sadašnji i oni budući. Sadašnji parametri se koriste za emisije koje su podložne regulativi za čisti zrak [14]. Budući parametri se koriste kako bi se model mogao koristiti u budućim razdobljima i zamjenjivati postojeće parametre koji više ne opisuju emisije na zadovoljavajući način. Program GREET koji je korišten u ovom radu funkcionira upravo na ovaj način. Prilikom korištenja programske podrške potrebno je voditi računa o ovim parametrima i ukoliko je potrebno uskladiti njihove vrijednosti. Emisijski koeficijenti $EF_{i,j,k}$ za CO, NO_x, CH₄, PM₁₀ i N₂O za različite tehnologije izgaranja te za različita goriva su uzeti iz [15]. SO_x emisijski faktori za pojedine tehnologije izgaranja u kojima se koriste sva goriva osim ugljena, sirove nafte i teškog goriva izračunavaju se uz pretpostavku da sav sumpor sadržan u gorivu prelazi u sumporov dioksid SO₂. Formula (6) koristi se za izračun emisija SO_x.

$$SO_{x,j} = \frac{\rho_j}{LHV_j} \cdot 10^6 \cdot S_{ratio,j} \cdot \frac{64}{32} \quad (6)$$

$SO_{x,j}$ je faktor emisija SO_x primarno SO_2 za proces sagorijevanja goriva j (g/kJ od utrošenog goriva j). ρ_j predstavlja gustoću goriva j . Izražava se u gramima po litri ($g/10^{-3}m^3$) za tekuća goriva i u gramima po toni ($g/10^3kg$) za kruta goriva poput ugljena i biomase. LHV_j predstavlja donju ogrjevnu vrijednost goriva (LHV) j . $kJ/10^{-3}m^3$ za tekuća goriva, $kJ/10^{-3}m^3$ za plinovita goriva, $kJ/10^3kg$ za kruta goriva. $S_{ratio,j}$ je maseni udio sumpora u gorivu j . Zadnji član jednadžbe (6) predstavlja omjer relativne molekulske mase SO_2 i elementarnog sumpora S. Iz jednadžbe (6) može se zaključiti da emisije SO_x za većinu goriva ovise o masenom udjelu sumpora u gorivu a ne o vrsti tehnologije koja se koristi. Međutim emisije SO_x spojeva značajno se razlikuju kada je u pitanju korištenje sirove nafte, teškog goriva i ugljena. Prilikom njihovog sagorijevanja dolazi u većoj mjeri do nastanka različitih SO_x spojeva a ne samo SO_2 . Različite metode odsumporavanja se koriste prilikom upotrebe ovih vrsta goriva kako bi se smanjile emisije SO_x do prihvatljivih razina. U tim slučajevima emisijski faktori za te oblike goriva i tehnologija su preuzeti iz već navedenog dokumenta [15]. Moguće su neke iznimke u metodologiji izračuna SO_x emisija.

Emisijski faktori CO_2 izraženi u g/kJ od iskorištenog goriva se računaju koristeći metodu ugljičnog otiska. Ova metoda podrazumijeva da ugljik sadržan u gorivu koje je sagorjelo umanjen za ugljik sadržan u emisijama CO, CH_4 i VOC je oslobođen u obliku CO_2 . Jednadžba (7) se koristi za izračun emitiranog CO_2 .

$$CO_{2,j,k} = \left[\frac{\rho_j}{LHV_j} \cdot 10^6 \cdot C_{ratio,j} - (VOC_{j,k} \cdot 0,85 + CO_{j,k} \cdot 0,43 + CH_{4,j,k} \cdot 0,75) \right] \cdot \frac{44}{12} \quad (7)$$

$CO_{2,j,k}$ predstavlja emisijski faktor CO_2 prilikom izgaranja koristeći tehnologiju k i gorivo j . ρ_j je gustoća goriva, LHV_j donja ogrjevna vrijednost goriva, $C_{ratio,j}$ maseni omjer ugljika u gorivu j , $VOC_{j,k}$ je emisijski faktor VOC koristeći tehnologiju k i gorivo j (g/kJ od goriva j), 0,85 predstavlja procijenjeni maseni omjer ugljika u emisijama VOC. Nadalje $CO_{j,k}$ je emisijski faktor CO koristeći tehnologiju k i gorivo j , 0,43 je maseni udio ugljika u CO. $CH_{4,j,k}$ je emisijski

faktor CH_4 koristeći tehnologiju k i gorivo j , 0,75 je maseni udio ugljika u CH_4 . Zadnji član jednadžbe predstavlja omjer relativne molekularne mase CO_2 i elementarnog ugljika C .

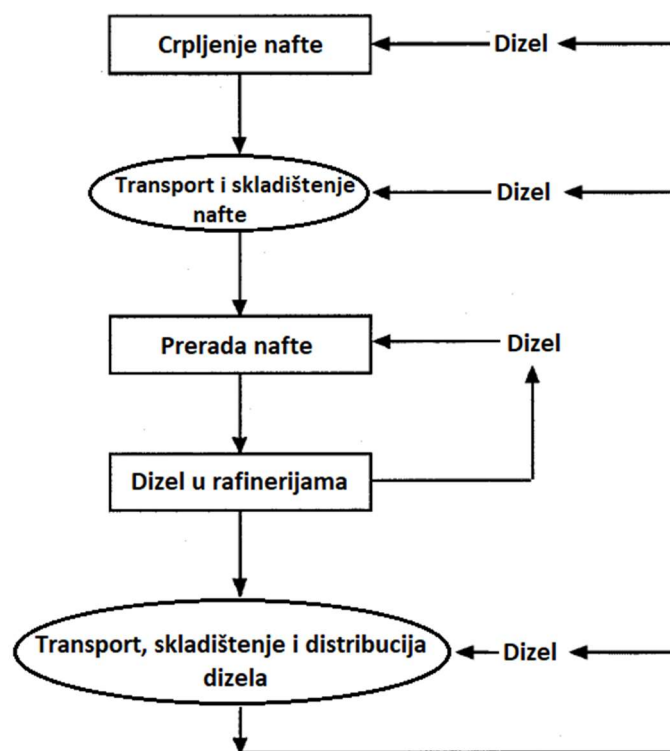
Jednadžba (7) prikazuje izračun emitiranog CO_2 na način da je ugljik sadržan u VOC, CO i CH_4 oduzet. S druge strane VOC i CO se zadržavaju u atmosferi manje od 10 dana nakon čega se pretvaraju u CO_2 . Prilikom izračuna sveukupnih emisija CO_2 koji nastaje iz CO i VOC se uzima u obzir. Jednadžbe (6) i (7) zahtijevaju podatke poput donje ogrjevne vrijednosti goriva, gustoću goriva, maseni udio ugljika i sumpora.

3.2.3. *Specifičnosti prilikom izračuna utroška energije i emisija unutar faze 1*

Za zadani ciklus goriva utrošci energije i emisije koji nastaju operativnim djelovanjem broda spadaju u fazu 2. Operacije koje je potrebno izvršiti prije samog operativnog djelovanja broda u koje spadaju proizvodnja i transport sirovine; prerada, skladištenje i distribucija goriva spadaju u fazu 1. Utrošak energije i emisije u fazi 1 nastaju uslijed izgaranja procesnog goriva, i tijekom proizvodnje i distribucije goriva do mjesta gdje će se koristiti. Energija i emisije za zadani segment faze 1 računaju se pomoću formule (8).

$$EM_i = \left[\sum_j (EM_{cm,i,j} + EF_{up,i,j}) \cdot EC_j \right] / 10^6 \quad (8)$$

EM_i predstavlja emisije i u g/kJ od goriva utrošenog tokom segmenta. $EM_{cm,i,j}$ su emisije uslijed sagorijevanja goriva j izražene u g/kJ od utrošenog goriva, izračunate pomoću jednadžbe (2). $EF_{up,i,j}$ predstavlja emisije faze 1 u g/kJ procesnog goriva j za proizvodnju i distribuciju procesnog goriva za pojedini segment. Naposljetku EC_j predstavlja utrošak energije iz goriva j tokom pojedinog segmenta. Uvođenjem člana $EF_{up,i,j}$ u jednadžbu (8) uzrokuje da jednadžba dobiva iterativan karakter. Svaki segment faze 1 zahtjeva upotrebu procesnog goriva za čiju proizvodnju je potencijalno potreban neki od prethodnih segmenata faze 1. Kao što prikazuje Slika 11 na primjeru potrošnje dizelskog goriva za ciklus goriva koji opisuje dobivanje dizelskog goriva. Iterativni proces služi kako bi se obuhvatili svi segmenti faze 1 prilikom izračuna utroška energije i emisija. Na grafičkom prikazu vidimo da za proizvodnju nafte koji je jedan segment trebamo dizelsko gorivo skupa sa ostalim gorivima koja nisu prikazana radi jednostavnosti, Slika 11.



Slika 11. Primjer izračuna utroška energije i emisija u fazi 1

Proizvodnja dizelskog goriva zahtijeva proizvodnju tj. crpljenje nafte uključujući i druge segmente poput prijevoza i skladištenja nafte, preradu nafte; transport, skladištenje i isporuku dizela do naftnih bušotina. Na Slici 11, ukupno su prikazana 4 zatvorena ciklusa prilikom izračuna koja zajedno čine ukupnu sumu utrošene energije i emisija faze 1 za dizelsko gorivo.

3.2.4. Sumiranje utrošaka energije i emisija pojedinih segmenata faze 1

Prethodna poglavlja opisuju izračun utroška energije i emisija za svaki pojedini segment faze 1. Sljedeći korak u izračunu je sumiranje iznosa svih segmenata kako bi dobili ukupne vrijednosti za utrošenu energiju i emisije unutar faze 1. Ukoliko nema gubitaka goriva unutar segmenata faze 1 izračunati iznosi utrošene energije i emisija mogu se jednostavno sumirati i dobiti konačnu vrijednost za čitavu fazu. Međutim ukoliko dolazi do gubitaka goriva tijekom segmenata faze, primjerice uslijed prolijevanja, isparavanja ili curenja. Potrebno je više kJ u fazi 1 da bi se dobio kJ u finalnom segmentu primjerice na stanici za isporuku goriva. Utrošak

energije i emisije za svaki pojedini segment faze 1 potrebno je korigirati za stvarni iznos goriva koji je viši od teoretskog uslijed gubitaka kako bi se dobila stvarna vrijednost. Prethodna istraživanja [14] precizno opisuju na koji način bi se spomenuti gubici trebali uzeti u obzir kako bi se prilikom izračuna dobile realne vrijednosti. Na temelju tih istraživanja program koristi jednadžbu (9) za izračun ukupnih emisija faze 1.

$$TEM_{up} = \sum_i EM_i \cdot K_{i-1} \cdot K_{i-2} \cdot \dots \cdot K_1 \cdot K_0 \quad (9)$$

TEM_{up} su ukupne emisije faze 1 za zadani ciklus goriva. EM_i su emisije od segmenta i , računane pomoću jednadžbe (8). K_i predstavlja koeficijent gubitka goriva za segment i . Za zadani segment koeficijent gubitka goriva se računa pomoću jednadžbe (10).

$$K_i = 1 + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \cdot LS_i \quad (10)$$

η je energetska učinkovitost segmenta i , koja je izračunata kao izlazna količina goriva podijeljena sa totalnim energetskim ulazom segmenta. LS_i je udio izgubljenog goriva s obzirom na ukupni energetski ulaz segmenta i . Udio izgubljenog goriva s obzirom na ukupno korišteno gorivo je za mnoge segmente faze 1 približan ili jednak 0. Stoga koeficijent gubitka goriva je približno ili jednak 0 za mnoge slučajeve. Međutim, transport i skladištenje tekućih goriva pomoću brodova i transport plina pomoću cjevovoda su podložni isparivanju i curenju goriva. U većini slučajeva količine isparenog ili prolivenog goriva su sadržane u emisijama VOC. Valja napomenuti da utrošak energije i emisije izračunate u ovoj fazi uzimaju u obzir sve aktivnosti faze 1 koje su provedene da bi se dobilo kJ na stanici za isporuku goriva.

3.2.5. *Utrošak energije i emisije za vrijeme plovidbe*

Utrošak energije i emisije za vrijeme operativnog djelovanja broda se izračunavaju po prijedenoj udaljenosti. Emisije vozila s pogonom motorima s unutarnjim izgaranjem pomoću konvencionalnih goriva poput benzina i dizela su uključene u razmatranje zbog dva razloga. Prvo se cisterne pogonjene dizelom ili benzinom koriste tijekom faze 1 za transport i distribuciju sirovina i goriva te se njihove emisije trebaju uzeti u obzir prilikom izračuna sveukupnih utrošaka i emisija tokom faze 1. Emisije VOC, CO i NO_x pojedinih vozila

pogonjenih benzinom i dizelom se izračunavaju koristeći referentne vrijednosti EPA-inog modela za odabrano prijevozno sredstvo poput Mobile 6. Prilikom izračuna emisija SO_x pretpostavlja se da sav sumpor sadržan u dotičnom gorivu prilikom izgaranja prelazi u SO_2 osim za u vozilima na gorivne ćelije unutar kojih se pretpostavlja da sumpor ostaje zarobljen u obliku krutog otpada. EPA-ini Mobile modeli ne uzimaju u obzir emisije CH_4 i N_2O . Vrijednosti CH_4 dobivamo na temelju procijenjene ukupne potrošnje ugljikovodika. Emisije N_2O su procijenjene na temelju prethodnih istraživanja [14] i drugih publikacija. Emisije CO_2 nastale uslijed izgaranja goriva dobivamo pomoću već spomenute metode izračuna ugljičnog otiska opisane u poglavlju 3.2.2.

3.2.6. Ukupne i lokalizirane emisije glavnih zagađivača

Za 5 najvažnijih zagađivača VOC, CO, NO_x , PM_{10} i SO_x važno je razmotriti količinu koja je emitirana i lokaciju emitiranja. Lokacija je važna zato jer emisije često uzrokuju lokalno zagađenje. Primjerice emitirani SO_x spojevi utječu na stvaranje kiselih kiša i ostavljaju negativne posljedice po okoliš i ljude. Kako bi se uzela u obzir važnost lokalnih emisija naš model je izrađen na način da može pružiti podatke o sveukupnim emisijama i lokaliziranim urbanim emisijama za navedenih 5 zagađivača. Sveukupne emisije podrazumijevaju emisije ciklusa goriva koje se odvijaju podjednako na svim područjima pojedinih segmenata unutar faze 1 i 2. Lokalizirane emisije predstavljaju emisije koje se uistinu otpuštaju isključivo na nekom definiranom području. Razdvajanje emisija na ukupne i lokalizirane je jednostavno u korištenom modelu. Ono je prvi korak za procjene utjecaja emisija na ljudsko zdravlje i okoliš uslijed pojedinih segmenata i faza ciklusa goriva. Prilikom izračuna emisija pretpostavljamo da vozila na alternativne oblika pogona djeluju u urbanim sredinama. Prilikom procjena utjecaja alternativnih izvora goriva na emisije u urbanim područjima potrebno je uzeti u obzir strukturu i količine potrošača koji djeluju u urbanim sredinama i van njih kako bi se moglo doći do zaključaka o utjecaju primjene novih tehnologija na urbana područja.

4. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOGA BRODA

U sklopu ovog rada preuzeto je idejno rješenje hibridnog energetskeg sustava višenamjenskog putničkog broda iz [16], koje se sastoji od dizelskog motora koji koristi lako dizelsko gorivo i elektromotore, koji kao izvore električne energije koristi gorivne članke i baterije. Na temelju ovog rješenja razmotrene su alternativne konfiguracije pogonskog sustava kako bi se dobili različiti ali komparativni rezultati cjeloživotnih emisija pojedinih energetskeg konfiguracija i s njima povezani troškovi. Alternativne konfiguracije energetskeg sustava će kao glavni parametar u obzir uzimati ukupnu zahtijevanu snagu koja je definirana primarnim idejnim rješenjem. Definirat će se 3 alternativne energetske konfiguracije. Prva pretpostavlja da cjelokupna zahtijevana snaga dolazi od motora sa unutarnjim izgaranjem. Druga će razmotriti generiranje cjelokupne zahtijevane snage iz gorivnih članaka. Treća verzija pretpostavlja pogon broda isključivo baterijama koje se pune na pristaništu. U ovom radu zanimaju nas energetske aspekti pojedinih konfiguracija i povezani troškovi. Upravo iz tog razloga tehnički opisi će sadržavati samo specifikacije dijelova energetskeg sustava.

4.1. Konfiguracija hibridnog energetskeg sustava

Prilikom izrade idejnog rješenja hibridnog energetskeg sustava višenamjenskog putničkog broda [16], došlo se do zahtijevanih snaga za propulziju broda kao i potrebne snage za opskrbu svih električnih potrošača u različitim režimima plovidbe, Tablica 2. Prilikom analize razmatra se plovidba broda brzinom od 13 čv i krstarenje brzinom od 8 čv. Zahtijevane snage u ova dva režima plovidbe se koriste i prilikom razmatranja alternativnih energetskeg konfiguracija.

Tablica 2. Prikaz zahtijevane snage brodskog energetskeg sustava

	INSTALIRANA SNAGA (kW)	PLOVIDBA 13 čv	KRSTARENJE 8 čv	MIROVANJE LUKA - DAN	MIROVANJE LUKA - NOĆ
Propulzija		1.617,6	190,4	0	0
Ostali brodski sustavi		231,4	297	226,1	132,3
Dizelski motori	2 x 651	1302	0	0	0
SOFC gorivni članci	548	547	487,4	226,1	132,3
Li-ion baterije (kWh)	500	Pokrivaju vršna opterećenja i omogućuju autonomiju 1h pri 8čv			

Prilikom plovidbe brzinom od 13 čv, u ovoj konfiguraciji gorivni članci rade sa 100% kapaciteta. Djelomično proizvode energiju za propulziju broda te opskrbljuju čitavu potražnju za električnom energijom. Većinu energije potrebne za propulziju osiguravaju dizelski motori. Prilikom krstarenja brzinom 8 čv, dizelski motori su isključeni. Potrebna energija za pogon broda i opskrbu električne mreže se dobiva iz gorivnih članaka. Baterije se u oba slučaja koriste za pokrivanje vršnih opterećenja i osiguravaju autonomiju od 1h pri brzini 8 čv u slučaju havarije. Idejno rješenje broda pretpostavlja autonomiju od 144 h pri brzini plovidbe od 13 čv, Tablica 3. Ovu razinu autonomije moraju zadovoljiti preostale 3 konfiguracije koje će se razmatrati kako bi rezultati bili usporedivi.

Tablica 3. Podaci o energetskej nezavisnosti plovidbe

Brzina plovidbe (čv)	Trajanje energetskej nezavisne plovidbe (h)	Moguća duljina plovidbe (nm)
13	144	1.872
8	144	4.992

Kako bi nam bilo lakše definirati alternativne konfiguracije potrebno je izračunati koliko je energije potrebno da bi brod neometano djelovao 6 dana ili 144 radna sata pri brzini plovidbe od 13 čv. Potrebna snaga za rad broda izračunava se pomoću jednadžbe (11).

$$P_u = P_{propulzije} + P_{ostalih sustava} = 1.849 \text{ kW} \quad (11)$$

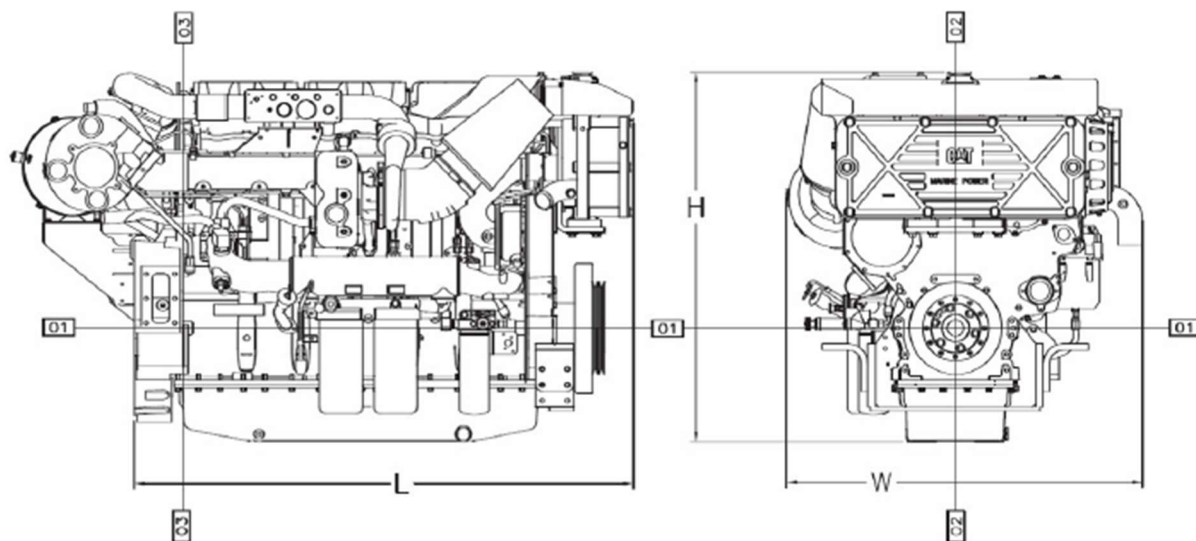
Energija koju je potrebno predati potrošačima tokom 144 h dobije se pomoću jednadžbe (12).

$$E_u = P_u \cdot t = 266.256 \text{ kWh} \quad (12)$$

4.1.1. Dizelski motor

Tijekom plovidbe brzinom od 13 čv veći dio snage poriva pokriva se radom dizelskog motora, a elektromotori napajani strujom iz gorivnih članaka ili baterija, prema potrebi, pokrivaju preostali dio potrebne snage. Prema proračunatoj snazi, brzini vrtnje i uvjetima rada

iz kataloga Caterpillar odabrana su dva brzohodna 4-taktna dizelska motora tipa C18 ACERT s elektroničkim kontrolnim sustavom, Tablica 4.



Slika 12. Mjerna skica dizelskog motora Caterpillar C18 ACERT

Ovaj tip motora predviđen je za povremeni rad na brodovima koji 16% radnog vremena (odnosno 2 od 12 sati) plove pri PMCR s promjenama opterećenja do 50%. Radi prigušenja vibracija motor je montiran na elastičnim nosačima, te niveliran mješavinom polimera [17]. Motor ima uljno korito, s oduškom za zrak, i u njemu pumpu ulja za podmazivanje, zupčaste izvedbe.

Tablica 4. Tehničke karakteristike dizelskog motora

Tip motora	Četverotaktni brzohodni dizelski
Vrsta pogona	1.000 – 3.000 h/god (D)
Oznaka motora	Caterpillar C18 ACERT
Maksimalna trajna snaga, P_{MCR}	651 kW
Broj okretaja, n_{MCR}	2.200 min ⁻¹
Specifična potrošnja goriva, q_{mg}	219,3 g/kWh
Moment M_{MCR}	2.826 Nm
Vanjske dimenzije $LxBxH$	1.505x1.077x1.144 mm
Masa suhog motora	1.673 kg

4.1.2. Prijenosnik snage

Proračunska brzina vrtnje vijka iznosi $492,9 \text{ min}^{-1}$, a brzina vrtnje izabranog porivnog stroja 2.200 min^{-1} . Potreban je prijenosnik snage (reduktor) s prijenosnim omjerom $i = n_m / n_v = 4,463$, koji prihvaća silu poriva $T = 59,75 \text{ kN}$. Zahtjevani moment motora se izračunava pomoću jednadžbe (13).

$$M_m = \frac{P_{MCR}}{\omega} = \frac{651}{2 \cdot \pi \cdot 2.200/60} = 2,827 \text{ kNm} \quad (13)$$

Faktor snage motora se izračunava pomoću jednadžbe (14).

$$\frac{P}{n_m} = \frac{651}{2.200} = 0,296 \quad (14)$$

Odabran je reduktor Mekanord 350HS. Podatke o reduktoru daje Tablica 5,a ugradbene dimenzije, Slika 13.

Tablica 5. Tehničke karakteristike reduktora

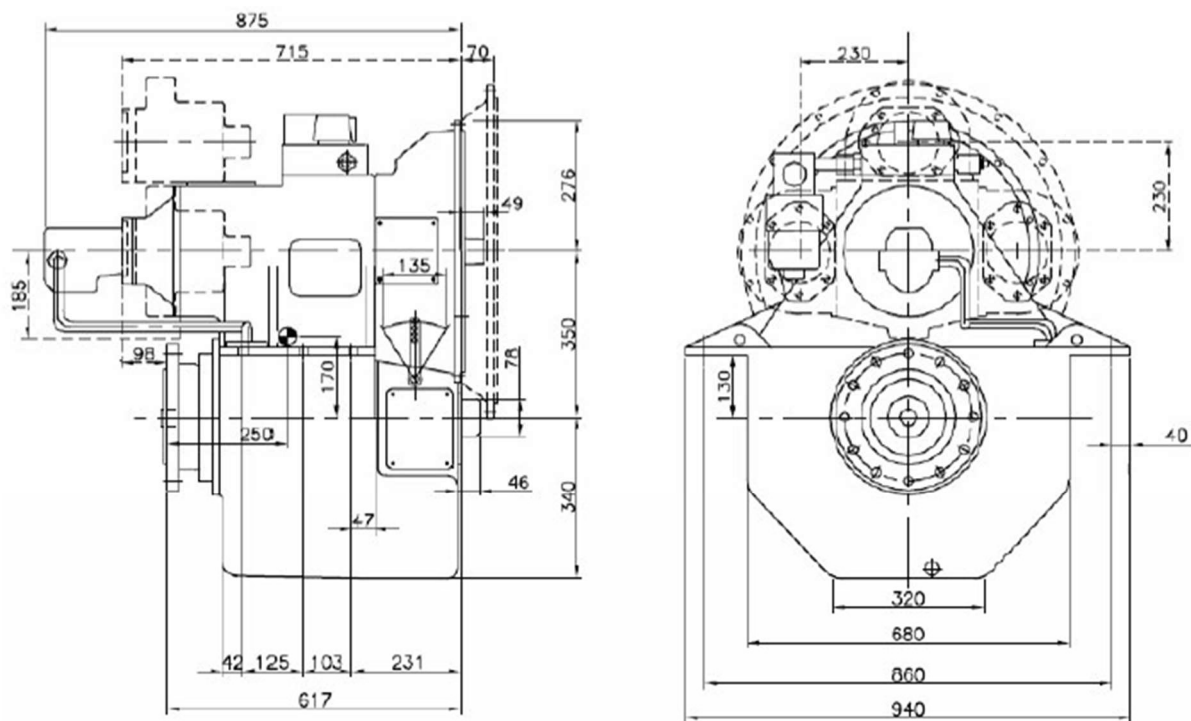
Oznaka reduktora	Mekanord 350 HS
Prijenosni omjer	4,65
Faktor snage	0,302 kW/min
Maksimalni moment	2.827 Nm
Maksimalna sila poriva	120 kN
Promjer vratila na ulazu	60 mm
Vanjske dimenzije	875x940x966 mm
Masa reduktora	600 kg

Tehničke karakteristike reduktora su:

- ugrađena hidraulički pokretana izvrstiva spojka osovinskog voda
- ugrađen hidraulički servo uređaj za upravljanje usponom krila CPP vijka mehaničkom vezom kroz šuplju osovinu vijka
- odrivni ležaj koji prihvaća maksimalnu silu poriva od 120 kN

- priključci za 3 PTO-a sa ugrađenim hidrauličkim spojka

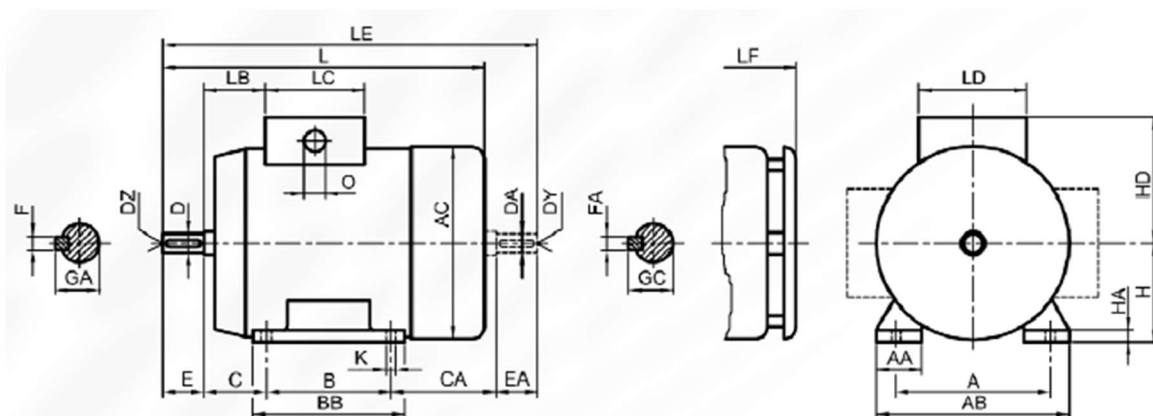
Sustav ulja obuhvaća pumpu ulja s direktnim pogonom, hladnjak, filtere, ventile.



Slika 13. Mjerna skica reduktora Mekanord 350HS

4.1.3. Pogonski elektromotori

Pogonski elektromotori koriste se u svim režimima plovidbe broda. Za vrijeme dok brod krstari brzinom od 8 čv u zaštićenim područjima nacionalnih parkova kao pogonski motori koriste se isključivo elektromotori radi smanjenog utjecaja na okoliš. Rad elektromotora mnogo je tiši, te su smanjene emisije u okoliš. Tijekom plovidbe broda brzinom od 13 čv elektromotori rade s maksimalnom snagom i za toliko se umanjuje potrebna snaga dizelskog motora za taj režim plovidbe. Tijekom boravka u luci danju i noću, kada je potreba za električnom energijom manja, elektromotori pokrivaju sve potrebe potrošača. Prema proračunatoj snazi, brzini vrtnje i uvjetima rada iz kataloga Končar – MES odabrana su dva trofazna kavezna asinkrona elektromotora zatvorene brodske izvedbe 7ABZ 132-315LB- 2, Tablica 7. Elektromotor je privješten na jednu od izlaznih prirubnica PTO-a na reduktoru. Ima posebnu hidraulički upravljaju izvrstivu spojku koja se nalazi u reduktoru. Na osnovi podataka o ispitivanjima dobivenih od proizvođača za ovaj tip elektromotora prethodno je provedena LCA analiza, radi dobivanja informacija o njegovom utjecaju na okoliš.



Slika 14. Mjerna skica elektromotora 7ABZ 315LB-2

Tablica 6. Dimenzije elektromotora 7ABZ 315LB-2

Dimenzije (mm)	AC	D/DA	DZ/DY	E/EA	F/FA	GA/GC	HD	L	LB	LC
7ABZ 315LB-2	611	80m6	M20	170	22	85	478	1.380	87	310
Dimenzije (mm)	LD	LE	LF	HA	A	AA	B	BB	C	H
7ABZ 315LB-2	310	1.555	1470	45	508	120	628	508	216	315

Tablica 7. Tehničke karakteristike elektromotora

Oznaka motora	7ABZ 315LB-2
Proizvođač	Končar-MES
Tip motora	Trofazni asinhroni motor
Izvedba	Brodsko
Maksimalna snaga, P	200 kW
Broj okretaja, n	2980 min ⁻¹
Korisnost, η	95 %
Nazivna jakost struje, I_n	340 A
Nazivni moment motora, M_n	640 Nm
Masa motora, m	1.000 kg
Vanjske dimenzije $LxBxH$	1.495x793x650 mm

4.1.4. Gorivni članci

Primjena tehnologije gorivnih članaka u procesu proizvodnje električne energije za brodske potrošače omogućuje veću energetska efikasnost zbog manje potrošnje goriva i smanjenje emisije plinova. Posebno u lukama i u plovidbi obalnim područjem gorivni članci dobar su izbor za opskrbu brodskih potrošača, i generator električne energije može se zamijeniti sustavom s 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. Razvijeno je više tipova gorivnih članaka, Tablica 8, a odabir prihvatljive tehnologije ovisi o njihovim karakteristikama i mogućnostima primjene na brodu.

- LT PEM (Niskotemperaturni $< 80^{\circ}\text{C}$) tehnologija zahtjeva upotrebu vodika vrlo čistog kemijskog sastava. Dobivanje vodika reformiranjem iz ugljikovodika nije praktično u brodskim uvjetima zbog kompliciranih procesa odsumporavanja i pročišćavanja reformata od ugljikovog monoksida (dozvoljeni udio mora biti $\text{CO} < 50 \text{ ppm}$). Upotreba ove tehnologije moguća je na brodu ukoliko se ugrade spremnici čistog vodika ili uz brižno praćenje procesa reformiranja.
- AFC tehnologija zahtjeva vrlo čisti vodik i kisik, pa je zbog toga još manje prihvatljiva za upotrebu na brodu od LT PEM.
- DMFC je danas najrazvijenija tehnologija za upotrebu kod malih potrošača energije kao što su mobilni telefoni i prijenosna računala, dok aplikacije koje proizvode nekoliko stotina kW nisu razvijane, pa bi upotreba DMFC gorivnih članaka na brodu predstavljala svojevrsan eksperiment.
- PAFC tehnologija najrazvijenija je za primjenu kod velikih aplikacija koje za rad trebaju više stotina kW energije. Na brodovima još nije korištena iako PAFC gorivni članci rade na temperaturi od oko 180°C i mogu koristiti reformirani vodik, slično kao i PEM FC.
- SOFC tehnologija je uz PEM najviše razvijana za mobilne potrošače, te je posebno zanimljiva za rad velikih stacionarnih sustava. Veliku prednost predstavljaju reducirane dimenzije SOFC postrojenja budući da prethodno reformiranje nije potrebno jer se ono odvija direktno na anodi gorivnog članka, što omogućuje i veću efikasnost sustava. Kao suprotnost PEM tehnologiji koja zahtjeva upotrebu vrlo čistog vodika, SOFC može

direktno koristiti reformirani vodik i neke ugljikovodike kao metanol ili prirodni plin (LNG). Zbog te fleksibilnosti tehnologija je pogodna za korištenje na brodovima.

- MCFC tehnologija u probnoj je fazi upotrebe na brodovima.
- HT PEM (Visokotemperaturni > 120 °C) tehnologija nudi mnoge prednosti za korištenje na brodovima jer je mnogo otpornija na nečistoće i zagađenja poput CO u odnosu na LT PEM. Gorivo se reformira u vodik i ugljik-dioksid putem parnog reformiranja i ne zahtjeva dalje pročišćavanje jer se proces odvija pri višim temperaturama. Nešto je manje razvijena u odnosu na niskotemperaturnu varijantu, ali ima dobre mogućnosti primjene budući da kao gorivo može koristiti vodik reformiran iz metanola.

Na osnovi navedenoga vidljivo je da najbolju zamjenu za dizel generator predstavljaju HT PEM i SOFC gorivni članci, koji kao gorivo na ulazu u proces proizvodnje energije mogu direktno koristiti prirodni plin ili metanol. HT PEM može biti vrlo fleksibilan u radu, jer mu promjene opterećenja i pokretanja/zaustavljanja ne predstavljaju veći problem. Mana mu je opasnost kod rukovanja metanolom te količina emitiranog CO₂ zbog male energetske efikasnosti pretvorbe energije goriva u električnu energiju mreže. SOFC na bazi metanola kao prednost ima visok stupanj energetske efikasnosti i fleksibilnost s obzirom na izbor goriva. Glavni problemi su stupanj razvijenosti tehnologije i komplikacije uzrokovane visokom radnom temperaturom od preko 700 °C. koja je s jedne strane razlog dobre efikasnosti i fleksibilnosti u izboru goriva, ali također utječe na teško pokretanje /zaustavljanje SOFC sustava. Osim toga to čini tehnologiju mnogo skupljom od HT PEM-a. Smanjenje emisije CO₂ moguće je postići samo s tehnologijom visoke efikasnosti, u što se gorivni članci općenito ne mogu ubrojiti. SOFC koji direktno, bez reformiranja, koristi metanol, može smanjiti emisije CO₂ za više od 20%. PEM tehnologija zbog svoje niske efikasnosti, uključujući i efikasnost reformera, čak povećava emisiju CO₂. Razvoj HT PEM tehnologije može pomoći u smanjenju emisija plinova u odnosu na dizelske motore.

Tablica 8. Usporedba različitih tipova gorivnih članaka

Tip gorivnog članka	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSSOFC
Elektrolit	Ionska membrana	KOH	H ₃ PO ₄	Rastaljeni ugljik (C)	Keramika	Keramika
Radna temperatura (°C)	80	65-220	205	650	600-800	800-1.000
Nositelj naboja	H ⁺	OH ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁺	O ⁺	O ⁺
Potreban reformer (vanjski)	Da	Da	Da	Ne	Ne	Ne
Materijal članka na bazi	Ugljik	Ugljik	Grafit	Nehrđajući čelik	Keramika	Keramika
Katalizator	Pt	Pt	Pt	Ni	CaTiO ₃	CaTiO ₃
Izlaz vode iz sustava	Isparavanje	Isparavanje	Isparavanje	Plinoviti produkti	Plinoviti produkti	Plinoviti produkti
Izlaz topline iz sustava	Procesni plin / Medij za hlađenje	Procesni plin / Elektroliti	Procesni plin / Medij za hlađenje	Unutarnje reformir. / Procesni plin	Unutarnje reformir. / Procesni plin	Unutarnje reformir. / Procesni plin
Gorivo	H ₂	H ₂	Reformat H ₂ + CO ₂	H ₂ , CO ₂	H ₂ , NG, CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂ , NG, CH ₄ , CH ₃ OH
Stupanj djelovanja (%)	35-60	40-50	40-45	45-60	45-65	45-65

Postoje specifični uvjeti za funkcioniranje sustava proizvodnje energije gorivnim člancima:

- Potrebno je čvrsto i kruto kućište postavljeno na vibracijskim amortizerima.
- Budući da brodovi plove u različitim klimatskim zonama treba paziti da gorivni članci ne budu smješteni u prostorima s temperaturom ispod 0°C. Potrebno je i pažljivo dimenzionirati sustav hlađenja svežnjeva gorivnih članaka vodom da bi se reakcije u člancima mogle odvijati pri odgovarajućim temperaturama.

- Koncentraciju soli u zraku treba regulirati filterima zraka da bi se izbjegli negativni utjecaji soli na dijelove polja kroz koje protječe te na periferne komponente sustava.

Prema proračunatoj bilanci energije za pokrivanje potreba propulzije i svih potrošača na brodu, te uvjetima rada, iz kataloga Wartsila odabrano je 10 modula s gorivnim člancima tipa SOFC (Solide Oxyde Fuel Cells) [16], svaki težine 6000 kg, koji kao gorivo koriste prirodni plin uskladišten u izoliranim spremnicima, Tablica 9.

Tablica 9. Tehničke karakteristike SOFC jedinice

Naziv modula	WFC50 mkII
Tip gorivnih članaka	SOFC
Tip goriva	NG /BG
Snaga goriva <i>LHV</i> (kW)	103
Snaga predana u mrežu (kW, AC)	54,8
Izlazna snaga svežnja gorivnih članaka (kW, DC)	67
Korisnost električne energije (<i>LHV</i>) (%)	53
Ukupna korisnost (<i>LHV</i>) (%)	69
Toplinska snaga (kW)	17
Dimenzije (<i>BxLxH</i>) (mm)	1.600x3.500x2.050
Masa (kg)	6.000
Radna temperatura (°C)	700 – 1.000
Emisija NO _x (ppm)	< 2
Emisija CO ₂ (g/kWh)	< 0,36
Emisija THC (ppm)	< 3
Buka (db)	< 65

4.1.5. Baterije

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. Postoje razne baterijske tehnologije koje su primjenjive u određenim

područjima rada. Usporedbu tipova baterija na osnovi 1 MWh predane energije daju Tablica 10 i Tablica 11.

Tablica 10. Usporedba baterijskih tehnologija na osnovi 1 MW predane energije

	Energija (MWh)	Snaga (MW)	Volumen (m ³)	Težina (t)	Broj ciklusa (80% DOD)
AGM Pb-Ac	1	2	40,4	73,9	400
HE NiMH	1	3	14,8	23,1	2.000
HP NiHM	1	29	21,1	38,5	2.000
Zebra	1	2,2	13,0	18,3	1.500
HE-MP Li-ion	1	4,4	5,9	9,4	3.000
HE-ME Li-ion	1	23,6	9,6	13,6	3.000

Tablica 11. Usporedba baterijskih tehnologija na osnovi gustoće energije i snage

	Gustoća snage (kW/l)	Spec. Snaga (kW/kg)	Gustoća energije (Wh/l)	Spec. gustoća energije (Wh/kg)
AGM Pb-Ac	0,12	0,08	90	44
NiMH		0,21-0,35		90-150
Zebra	0,24	0,16	167	114
NaS	0,021	0,17	170	117
HP-ME Li-ion	0,22	0,11	270	120

Na osnovi danih pokazatelja odabrana je Li-ion tehnologija baterija velike isporučene energije i srednjim snagama (HE-MP Li-ion). One u duljem periodu mogu isporučivati energiju, bez značajnog pada trajne snage. Broj ciklusa u životnom vijeku je dovoljno velik da ne treba brinuti o čestim zamjenama novima. Li-ion baterije 7 su puta lakše od Pb-A baterija i 2 puta lakše od Zebra i NiMH baterija za istu gustoću energije. Gustoća energije Li-ion baterija pokazuje mogućnost njihove praktične primijene na brodu, gdje je korištenje prostora bitno. Na osnovi proračunate potrebe za energijom prema režimima plovidbe i potrebe da se baterije koriste kad drugi izvori nisu dostatni, te da one mogu osigurati energiju potrebnu za propulziju i rad najnužnijih brodskih sustava za siguran povratak u luku kad brod plovi brzinom od svega

nekoliko čvorova, proračunata je potrebna energija baterija i broj jedinica koje će biti ugrađene. Iz kataloga CORVUS odabrani su Li-ionski baterijski moduli [16], Tablica 12.

Tablica 12. Tehničke karakteristike AT6500 Li-ionskih baterija

Tip	AT6500-250-48
Tehnologija	Litij NMC
Maksimalni napon	50,4 V
Nominalni napon	44,4 V
Minimalni napon	32,4 V
Kapacitet	150 Ah
Trajna struja	250 A
Energija	6,5 kWh
Težina	72 kg
Dimenzije	59x33x38 cm

Jedan modul sastavljen je od 24 baterije s temperaturnim senzorima, ukupne snage 6,5 kW. Za pokrivanje brodskih energetske potrebe od 500 kWh tijekom 1 sata plovidbe brzinom od 8 čv ili tijekom 2 sata plovidbe brzinom od 4 čv, potrebno je 755 kWh energije pohranjene u baterijama, jer korisnost Li-ionskih baterija tipa HE-MP (velike energije i male snage) iznosi oko 67%. 120 baterijskih modula svaki s 6,5 kWh energije pohranjene u 24 ćelije zadovoljiti će brodske potrebe u navedenim režimima. Zauzimaju volumen od 8,88 m³, odnosno teške su 8,64 tone. Raspoređene su u dva bloka s 8 x 6 modula i jedan blok od 4 x 6 modula.

4.1.6. Spremnici goriva za rad dizelskog motora i gorivnih članaka

Za ovu konfiguraciju i zadanu razinu autonomije proračunate su veličine tankova goriva i potrebne količine goriva kako bi brod mogao djelovati. Podaci o dizelskom gorivu dani su u Tablici 13. Podatci o količinama i spremnicima ukapljenog prirodnog plina za rad gorivnih članaka prikazani su u Tablici 14.

Tablica 13. Masa i volumen goriva za rad dizelskih motora pri plovidbi s 13 čv

v (čv)	P_{SCR} (kW)	$m_{gl.mot}$ (kg/h)	m_{uk} (kg/h)	t (h)	m_g (kg)	V_g (m ³)	V_t (m ³)
13	553,35	121,35	243	144	34.992	41,7	2 x 28
4	42,5	9,3	18,6	3	55,8	0,0664	

Tablica 14. Masa i volumen prirodnog plina za rad gorivnih članaka

v (čv)	P_{el} (kW)	P_{SOFC} (kW)	P_{NG} (kW)	t (h)	E_{NG} (kWh)	E_{NG} (MJ)	V_{NG} (m ³)	V_{LNG} (m ³)	$V_{LNG,t}$ (m ³)
13	493,2	548	927	144	133.488	480.566,8	13.319,2	22,2	5x4,4
8	493,2	548	927	144	133.488	480.566,8	13.319,2	22,2	5x4,4
v (čv)	m_{LNG} (kg)	$b_{e,LNG}$ (g/kWh)							
13	9.546	134,4							
8	9.546	134,4							

Na brodu je osigurano 5 spremnika pojedinačnog volumena 4,4 m³ za ukapljeni prirodni plin.

4.2. Konfiguracija energetskog sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima

Ova energetska konfiguracija se razlikuje od hibridne verzije u tomu što će se sva električna energija na brodu proizvoditi dizel generatorima. Da bi se zadovoljile potrebe za električnom energijom ugraditi će se dva dizel generatora D13 MG / HCM534C-1, Tablica 17. Za ovu konfiguraciju treba na već izračunatu masu i volumen dizelskog goriva u slučaju hibridnog energetskog sustava dodati masu i volumen dizelskog goriva koje je potrebno za proizvodnju električne energije.

Potrošnja goriva jednog dizel generatora:

$$m_{g,mot} = b_e \cdot P_{SCR} \quad (15)$$

Ukupna potrošnja dva dizel generatora:

$$m_{uk} = 2 \cdot m_{g,mot} \quad (16)$$

Za predviđeno vrijeme plovidbe na brod treba ukrcati gorivo mase i volumena:

$$m_{gdg} = t \cdot m_{uk} \quad (17)$$

$$V_{gdg} = m_{gdg} / \rho \quad (18)$$

Tablica 15. Masa i volumen goriva za rad dizel generatora

v (čv)	P_{SCR} (kW)	$m_{g,mot}$ (kg/h)	m_{uk} (kg/h)	t (h)	m_{gdg} (t)	V_{gdg} (m ³)
13	300	60,9	121,8	144	17,54	20,9

Gdje je:

- $b_e = 0,203$ kg/kWh - Specifična potrošnja goriva pri 1500 min⁻¹
 $\rho = 840$ kg/m³ - Gustoća goriva

Ukupna masa i volumen goriva koje je potrebno ukrcati na brod dobiva se zbrajanjem mase i volumena goriva potrebnog za rad dizelskog motora namijenjenih za propulziju i dizel generatora potrebnih za proizvodnju električne energije.

Tablica 16. Ukupna masa i volumen goriva na brodu

m_{gdg} (t)	V_{gdg} (m ³)	m_g (t)	V_g (m ³)	m_{ukupno} (t)	V_{ukupno} (m ³)	V_t (m ³)
17,54	20,9	34,992	41,7	52,532	62,6	2x32

Za dizelsko gorivo potrebno je ugraditi 2 spremnika, svaki volumena 32 m³.

Tablica 17. Tehničke specifikacije dizel generatora D13 MG / HCM534C-1

Oznaka	D13 MG/ HCM434C-1
Proizvođač	Volvo penta
Broj okretaja, n	1.500 min ⁻¹
Napon i frekvencija	400 V/ 50Hz
Mehanička snaga	300 kW
Električna snaga	284 kW
Vanjske dimenzije	2.739x1.174x1.814 mm
Masa	3.175 kg

Tablica 18. Tehničke specifikacije dizelskog motora D13 MG

Tip motora	Četverotaktni brzohodni dizelski
Oznaka motora	D 13 MG
Maksimalna trajna snaga P_{mcr}	300 kW
Potrošnja goriva	203 g/kWh
Broj cilindara	6
Broj okretaja, n_{MCR}	1.500 min ⁻¹

4.3. Konfiguracija energetskog sustava broda na gorivne članke

Ova energetska konfiguracija broda pretpostavlja da se za pogon broda koriste isključivo gorivni članci. Za izračun će se koristiti iste SOFC jedinice koje su korištene u konfiguraciji broda na hibridni pogon. Pomoću podataka iz Tablice 9 može se izračunati energija koju jedna SOFC jedinica preda tokom 144 h plovidbe.

$$E_{SOFC} = \text{Snaga predana u mrežu} \cdot t = 7.891,2 \text{ kWh} \quad (19)$$

Da bi dobili potreban broj SOFC jedinica za pogon broda moramo sveukupnu zahtijevanu energiju podijeliti sa energijom koju preda jedna jedinica pomnoženu sa korisnosti elektro potrošača.

$$n_{SOFC} = \frac{E_u}{E_{SOFC} \cdot \eta_{EL}} = 37,48 \quad (20)$$

Potreban broj SOFC jedinica zaokružuje se na prvi veći broj i iznosi 38. Maksimalna moguća električna snaga 38 SOFC jedinica gorivnih članaka za propulziju i brodske potrošače iznosi 2.082,4 kW.

Električna snaga koja se predaje potrošačima:

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot P_{SOFC} \quad (21)$$

Snaga prirodnog plina za 38 SOFC jedinica:

$$P_{NG} = \frac{P_{NG,jed}}{P_{SOFC,jed}} \cdot P_{SOFC} \quad (22)$$

Energija prirodnog plina za potrebni akcijski radijus:

$$E_{NG} = P_{NG} \cdot t \quad (23)$$

Volumen prirodnog plina u plinovitom stanju:

$$V_{NG} = \frac{E_{NG}}{H_{d,NG}} \quad (24)$$

Volumen ukapljenog prirodnog plina je manji oko 600 puta pri temperaturi 0°C i atmosferskom tlaku:

$$V_{LNG} = \frac{V_{NG}}{600} \quad (25)$$

Ukupna masa ukapljenog prirodnog plina iznosi:

$$m_{LNG} = V_{LNG} \cdot \rho_{LNG} \quad (26)$$

Tablica 19. Masa i volumen prirodnog plina za rad elektro potrošača

v (čv)	P_{EL} (kW)	P_{SOFC} (kW)	P_{NG} (kW)	t (h)	E_{NG} (MWh)	E_{NG} (MJ)	V_{NG} (m ³)	V_{LNG} (m ³)	$V_{LNG,t}$ (m ³)	m_{LNG} (kg)
13	2.082,4	1.874,2	3.914	144	563,6	2.028.960	6.235	93,7	22x4,4	40.291

Za opskrbu 38 SOFC jedinica potrebna su 22 spremnika volumena 4,4 m³ ukapljenog prirodnog plina (LNG).

Gdje je:

- $\eta_{el} = 0,90$ - Korisnost elektromotora i elektro potrošača
- $P_{NG,jed} = 103 \text{ kW}$ - Snaga goriva potrebna po jedinici SOFC
- $P_{SOFC,jed} = 54,8 \text{ kW}$ - Električna snaga jedinice SOFC
- $H_{d,NG} = 36.080 \text{ kJ/m}^3$ - Donja ogrjevna moć prirodnog plina
- $\rho_{LNG} = 430 \text{ kg/m}^3$ - Gustoća ukapljenog prirodnog plina

4.4. Konfiguracija broskog energetskog sustava na električni pogon (baterije)

Ovdje će se razmotriti mogućnost zadovoljenja svih energetskih potreba broda koristeći isključivo baterije. Poznat nam je iznos energije koja se treba uskladištiti u baterijama kako bi brod imao autonomiju od 144 h pri brzini plovidbe 13 čv. Potreba energija je izračunata pomoću jednadžbe (12) i iznosi 266.256 kWh. Za izračun će se koristiti baterijski modul koji je odabran i kod konfiguracije hibridnog pogona, Tablica 12. Treba napomenuti da se taj modul koristio 2016. godine. Do danas se tehnologija proizvodnje baterija i modula unaprijedila ali ne u značajnijoj mjeri. Specifična gustoća energije odabranog modula AT6500-250-48 se može izračunati pomoću jednadžbe (27).

$$M_d = \frac{\text{Energija}}{\text{Težina}} = 90,27 \text{ Wh/kg} \quad (27)$$

Valja voditi računa da se prilikom razmatranja treba razlikovati specifičnu gustoću energije ćelija i modula. Same ćelije danas postižu specifične gustoće energije od 247 Wh/kg poput Panasonic 2170 od kojih se izrađuju baterijski moduli za automobile Tesla model 3. Najbolje rješenje koje bi se moglo nabaviti za ugradnju u brodove postiže specifične gustoće energije od 110 Wh/kg poput tesla Powerpack. Vidimo da se ostvarilo unaprjeđenje od 20-ak % u protekle 4 godine. Ove specifične gustoće energije i dalje nisu dovoljno velike da bi se brodovi mogli pogoniti isključivo baterijama. Navedeno je opisano jednadžbom (28) koja daje iznos težine potrebnih modula kako bi se uskladištila potrebna energija za 144 h plovidbe brzinom 13 čv.

$$m_m = \frac{E_u \cdot 10^3}{M_d} = 2.949.551,3 \text{ kg} \quad (28)$$

Uz unaprjeđenje specifične gustoće energije modula od 20% masa bi iznosila 2.359.641 kg. Dobivena masa je više od 2,2 puta veća od istisnine ovakvog broda (1.035,6 t) što jasno pokazuje da je ovakvo tehničko rješenje nemoguće te se neće ni razmatrati.

Zanimljivo bi bilo pogledati koliku autonomiju bi brod pogonjen baterijama imao ukoliko bi instalirali masu baterija koja je približna masi energetskeg sustava hibridnog rješenja. Prilikom proračuna vrijede sljedeće pretpostavke:

- Masa elektromotora za pogon broda iznosi 4 t,
- Masa ugrađenih baterijskih modula (m_m) iznosi 115 t,
- Masa energetskeg sustava hibridnog broda iznosi oko 119 t.

Energija koja se može uskladištiti u baterijama iznosi:

$$E_u = m_m \cdot M_d = 10.381,05 \text{ kWh} \quad (29)$$

Autonomija broda izražena u satima iznosi:

$$t = \frac{E_u}{P_u} = 5,61 \text{ h} \quad (30)$$

Autonomija broda izražena u nautičkim miljama:

$$s = t \cdot 13\check{c}v = 72,8 \text{ nm} \quad (31)$$

Iz navedenog se jasno vidi da su energetske konfiguracije u kojima se energija pohranjuje isključivo u baterijama izvedive samo za kratke rute. Kod ovakve izvedbe brodova poželjne su manje brzine plovidbe zbog smanjenja otpora i bitno je osigurati da se brod može puniti na početku i kraju putovanja a poželjno je i u lukama gdje se kratkotrajno zadržava.

4.5. Usporedba energetskih konfiguracija

Ukoliko usporedimo podatke iz tablice može se zaključiti sljedeće, Tablica 20. Vidimo da se potrebna masa goriva smanjuje ukoliko eliminiramo dizelske motore. Energetska konfiguracija koja ovisi isključivo o upotrebi dizelskih motora zahtjeva najviše goriva. Sagledamo li samo masu vidimo da je hibridnoj energetskoj konfiguraciji potrebno 15,2% manje goriva. Izvedbi koja za pogon koristi isključivo gorivne članke potrebno je 23,3% manje goriva u odnosu na dizelsku izvedbu. Također hibridna energetska konfiguracija koristi dizelsko gorivo i LNG u omjeru 3,6:1. Dok izvedba samo sa gorivnim člancima koristi isključivo LNG. Poznato je da je LNG puno čišće gorivo od dizela te se njegovom upotrebom zasigurno smanjuju nepoželjne emisije.

Tablica 20. Tablica masa

Naziv	Masa (kg)
Konfiguracija hibridnog energetskeg sustava:	119.724
- 2 x dizelski motor (Caterpillar C18 ACERT)	3.346
- 2 x reduktor (Mekanord 350HS)	1.200
- Pogonski elektromotori (7ABZ 315LB-2)	2.000
- 10 x SOFC (WFC50 mkII)	60.000
- Baterijski modul	8.640
- Dizel gorivo	34.992
- LNG	9.546
Konfiguracija energetskeg sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima:	65.428
- 2 x dizelski motor (Caterpillar C18 ACERT)	3.346
- 2 x reduktor (Mekanord 350HS)	1.200
- Pogonski elektromotori (7ABZ 315LB-2)	2.000
- Dizel gorivo	52.532
- 2 x dizel generator (D13 MG / HCM534C-1)	6.350
Konfiguracija energetskeg sustava broda na gorivne članke:	272.291
- 38 x SOFC (WFC50 mkII)	228.000
- 2 x elektromotor	4.000 (pretpostavljeno)
- LNG	40.291
Konfiguracija broda na električni pogon (baterije):	2.953.551,3
- Baterijski moduli	2.949.551,3
- 2 x elektro motor	4.000 (pretpostavljeno)

S druge strane iznimno je bitno uzeti u obzir cjelokupne mase pojedinih konfiguracija. Čitava procjena je napravljena na temelju broda s hibridnom energetskeg konfiguracijom. Pokazalo se da bi se zahtijevana snaga i autonomija mogla postići sa 54% lakšom energetskeg

konfiguracijom ukoliko bi se koristili isključivo dizelski motori i agregati. Pogon broda isključivo gorivnim člancima bi rezultirao povećanjem mase energetske konfiguracije u odnosu na hibridno rješenje od 228%. Također, može se naslutiti da uvođenje tehnologija sa manjim utjecajem na okoliš ima smisla samo u slučaju kada se autonomija i brzina plovidbe značajno smanji. Primjer je energetska konfiguracija koja koristi isključivo baterije za pogon broda. Ukoliko se zahtjeva autonomija od 6 dana i brzina plovidbe 13 čv, vidimo da masa samih modula premašuje procijenjenu istisninu broda za 280 %. Ovakvo tehničko rješenje nije moguće. Izvedbe brodova pogonjenih baterijama su moguće samo na kratkim rutama 3-5 h nakon čega je potrebno puniti baterije.

5. PRORAČUN CJELOŽIVOTNIH EMISIJA ENERGETSKIH KONFIGURACIJA BRODA

Za izračun cjeloživotnih emisija energetske konfiguracije broda korišten je program GREET. Prvo su definirane emisije i karakteristike različitih goriva koje se koriste u našim energetskim konfiguracijama. Razlikujemo 3 vrste goriva koja se kreću na brod. To su dizelsko gorivo, LNG i električna energija. Pomoću programa GREET moguće je odrediti emisije koje su nastale uslijed proizvodnje, dopremanja goriva do broda i njegovog sagorijevanja. Proračun se sastoji od dvije osnovne faze:

- WTP (Well to Pump) faza uzima u obzir emisije nastale tijekom životnog ciklusa goriva od eksploatacije sirovina za proizvodnju goriva, prijevoza sirovina, prerade sirovina u konačni željeni oblik goriva, te prijevoza dobivenog goriva do crpke za konačnu uporabu
- WTW (Well to Wheel) faza uzima u obzir emisije ispuštene tijekom cijelog životnog ciklusa goriva, od eksploatacije do sagorijevanja u motoru tijekom kojih se ispuštaju ispušni plinovi i ta se faza označava kao PTW (Pump-to-Wheel). WTW faza se sastoji od WTP i PTW

Da bi mogli izračunati cjeloživotni ugljični otisak trebamo koristiti Potencijal globalnog zagrijavanja (GWP). GWP se uvodi iz razloga što pojedini plinovi ne doprinose podjednako globalnom zagrijavanju. Pomoću njega se opisuje koliko će energije apsorbirati 1 tona ispuštenog stakleničkog plina tijekom određenog vremena u usporedbi s tonom CO₂. Što je iznos GWP veći to staklenički plin više doprinosi globalnom zagrijavanju.

Tablica 21. Iznos GWP za pojedine ispušne plinove

	GWP
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Da bi izračunali cjeloživotni ugljični otisak CF dobivene emisije plinova TE (CO₂, CH₄ i N₂O) izražene u kg/100km množimo sa odgovarajućim GWP koeficijentom. Jednadžba (31).

$$C_f = GWP_{CO_2} \cdot TE_{CO_2} + GWP_{CH_4} \cdot TE_{CH_4} + GWP_{N_2O} \cdot TE_{N_2O} \quad (32)$$

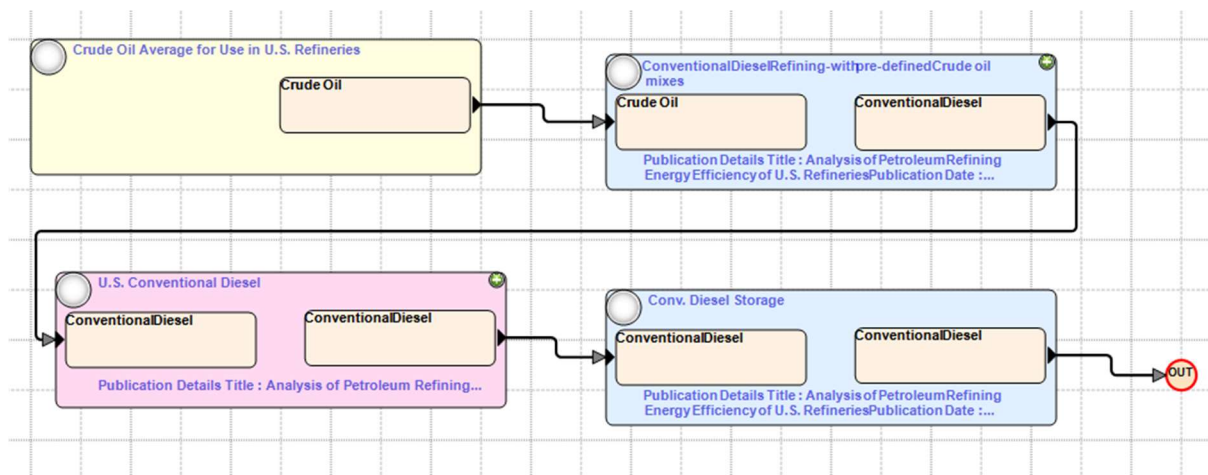
Prilikom izračuna emisija u WTW fazi morat ćemo definirati emisije CO₂, CH₄ i N₂O u kg/nmi pošto se u GREET ne mogu unijeti vrijednosti u g/kg goriva. Da bi mogli izračunati emisije uslijed izgaranja različitih goriva koristiti smo se podacima navedenim u Tablici 22.

Tablica 22. Emisije uslijed izgaranja goriva [4]

	Dizel (g/kg goriva)	LNG (g/kg goriva)
CO ₂	3.206,00	2.750,00
CH ₄	0,06	51,2
N ₂ O	0,15	0,11

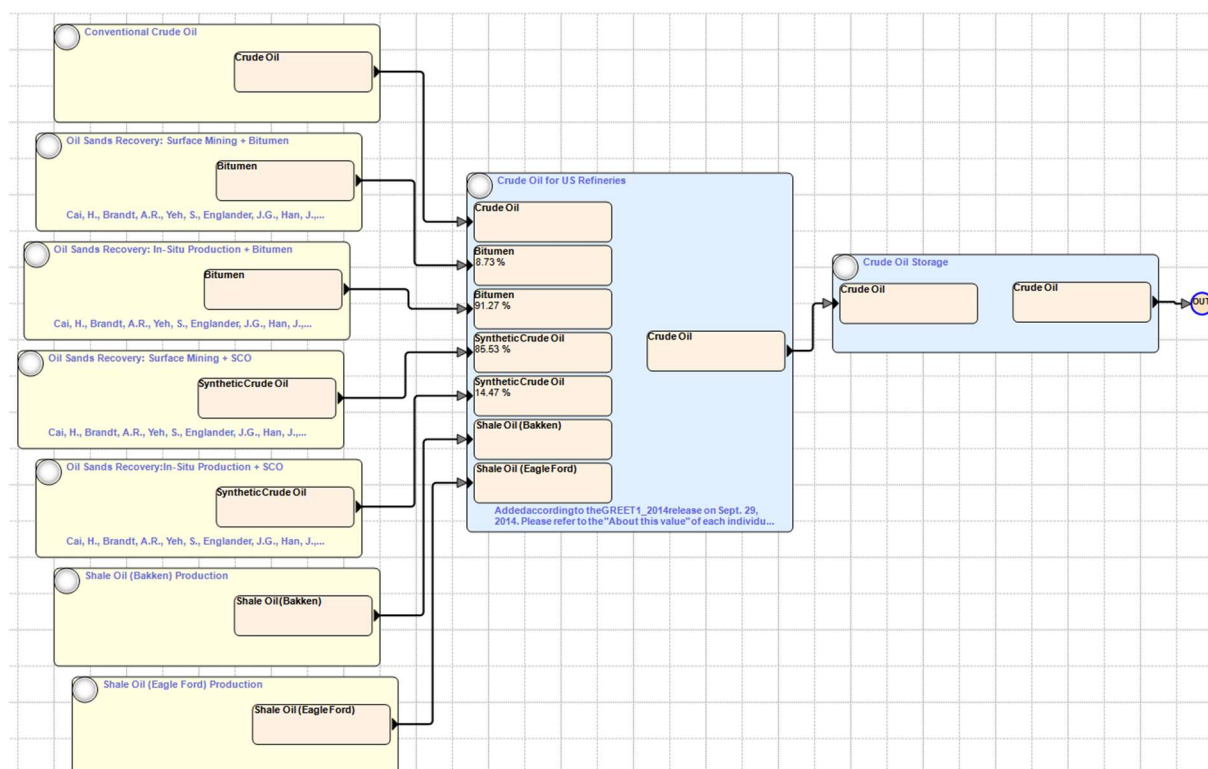
5.1. Dizelsko gorivo

Prilikom izračuna emisija CO₂ od dizelskog goriva unutar programa GREET koriste se podaci za klasično dizelsko gorivo dobiveno iz sirove nafte (kao dio osnovnih postavki alata). Put kojim nastaje razmatrano dizelsko gorivo sastoji se od 4 koraka, Slika 15. Prvi korak predstavlja proces kojim se dobiva mješavina sirove nafte različitog podrijetla koja je namijenjena za preradu u rafinerijama. Drugi korak uzima u obzir sve procese prilikom prerade definirane mješavine sirove nafte u dizelsko gorivo. Treći korak predstavlja procese koji se odvijaju prilikom prijevoza proizvedenog goriva do mjesta gdje će se predati potrošaču. Zadnji korak predstavlja proces skladištenja dizelskog goriva prije predaje krajnjem potrošaču. Unutar njega se mogu uzeti u obzir gubici koji nastaju curenjem ili isparivanjem goriva tokom skladištenja.



Slika 15. Put nastanka dizelskog goriva (Well To Pump)

Boja svakog koraka upućuje kakvi se procesi odvijaju u datom koraku. Žuta boja predstavlja procese koji su povezani s razmatranim putem te se može naknadno pojavljivati unutar pojedinih koraka. Ružičasta boja predstavlja mješavinu puteva kojima je izlazni parametar nama potrebni ulazni parametar za pojedini set procesa. Plava boja označava stacionarni proces koji ima jedan ili više ulaznih parametara koji se pretvaraju u jedan ili više izlaznih parametara što rezultira utroškom energije i emisijama. Ružičasta boja predstavlja procese transporta. Unutar tih procesa ulazni i izlazni parametri se ne mijenjaju ali se troši energija i ostvaruju se emisije zbog načina i tehnologija koje se koriste da bi se obavio transport. Svi putevi i procesi doprinose emisijama i utrošku energije. Prvi korak prikazan je na Slici 16. Ovdje se radi o mješavini puteva kojima nastaje mješavina sirove nafte. Vidimo da se sirova nafta dobiva na više načina. Svakom od puteva je izlazni parametar sirova nafta od koje se dobiva mješavina. Mješavinu karakteriziraju udjeli sirove nafte od svakog puta nastanka.



Slika 16. Mješavina sirove nafte za preradu u rafineriji

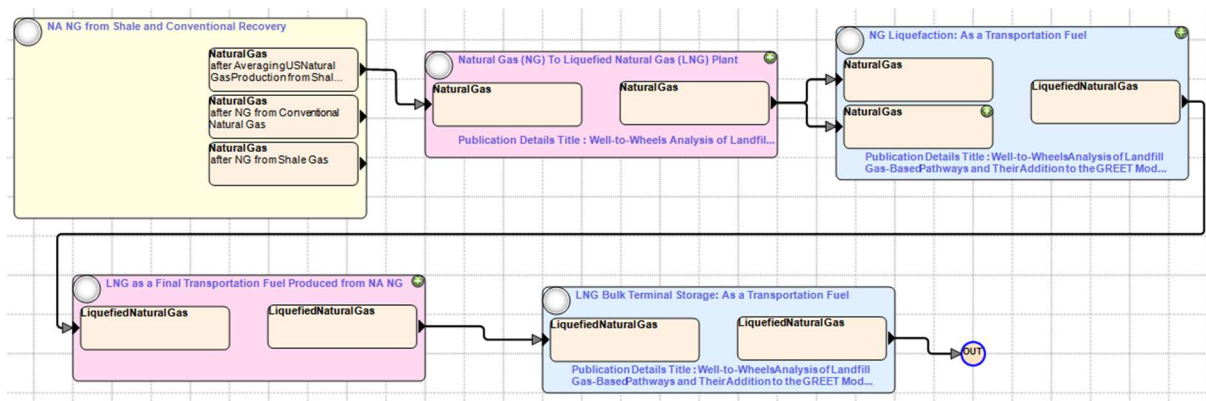
Svi koraci na putu nastanka dizelskog goriva se sastoje od više pod koraka i procesa. Zbog jednostavnosti i preglednosti nećemo opisivati sve pod korake i puteve. Program iterativno određuje koji su sve procesi potrebni i u kojim količinama da bi kao rezultat dobili 1 kJ energije iz dizelskog goriva spremnog za isporuku potrošaču. Kada su poznati svi procesi i njihovi udjeli program izračunava utrošenu količinu energije i emisije za zadani izlazni parametar, u ovom slučaju dizelsko gorivo. Za 1 MJ energije od dizelskog goriva koje je spremno za isporuku dobiveni su sljedeći rezultati, Tablica 23.

Tablica 23. Emisije WTP, dizel

	Ukupne emisije (g/MJ)	Urbane emisije (g/MJ)
CO ₂	12,82	5,05
CH ₄	0,11	0,00252
N ₂ O	0,00022	0,00005371

5.2. LNG

Prilikom izračuna emisija CO₂ od LGN goriva unutar programa GREET korišteni su podaci za LNG dobiven iz prirodnog plina. Put kojim nastaje razmatrano LNG gorivo prikazan je na Slici 17.



Slika 17. Put nastanka LNG goriva (Well To Pump)

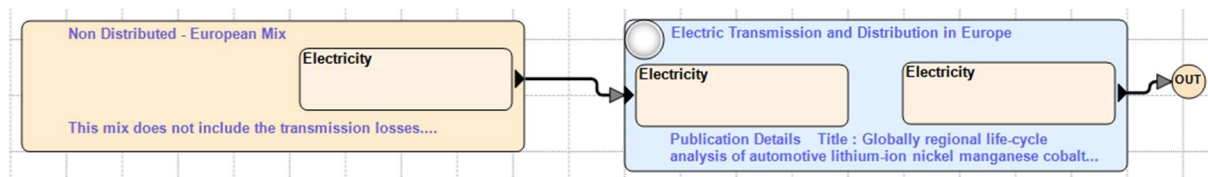
Metodologija izračuna emisija i utroška energije je ista kao i za dizelsko gorivo. Dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u Tablici 24.

Tablica 24. Emisije WTP, LNG

	Ukupne emisije (g/MJ)	Urbane emisije (g/MJ)
CO ₂	11,02	0,85
CH ₄	0,29	0,06465
N ₂ O	0,00016	0,00001983

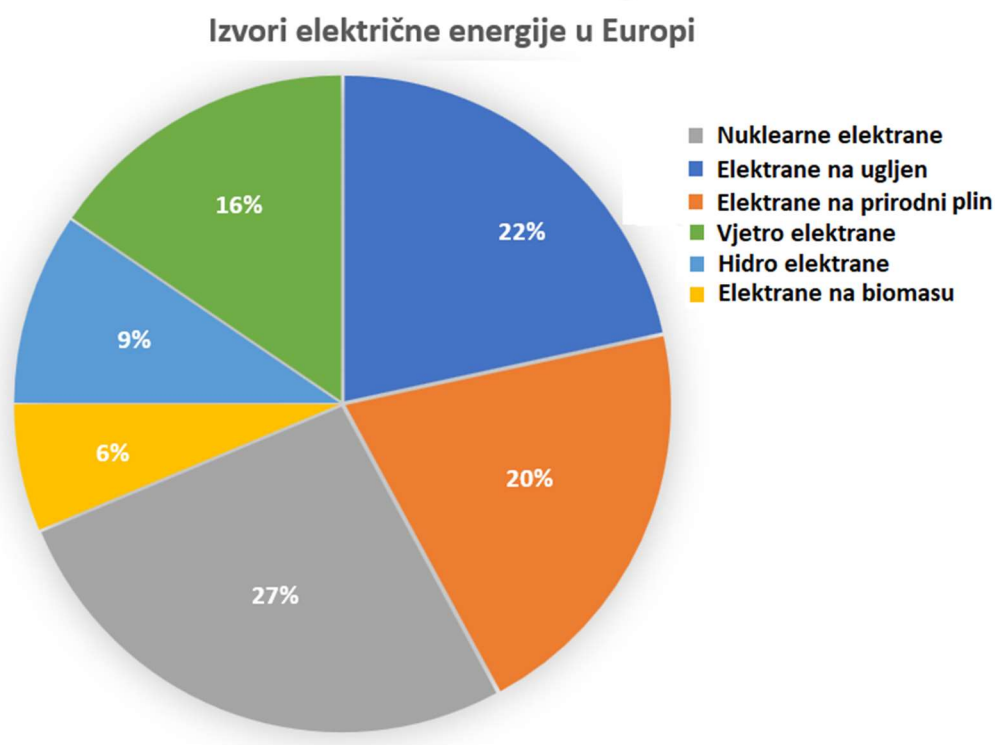
5.3. Električna energija

Prilikom izračuna emisija CO₂ uslijed proizvodnje električne energije unutar programa GREET koriste se podaci za električnu energiju generiranu na razini Europe. Put kojim nastaje električna energija prikazan je na Slici 18.



Slika 18. Put nastanka električne energije (Well To Pump)

Zanimljivo je pogledati prvi korak puta. On će nam dati uvid iz kojih se izvora električna energija dobiva na razini Europe, Slika 19.



Slika 19. Izvori električne energije u Europi

Slijede rezultati analize emisija i utrošenih resursa za MJ proizvedene električne energije, Tablica 25.

Tablica 25. Emisije WTP, električna energija

	Ukupne emisije (g/MJ)	Urbane emisije (g/MJ)
CO ₂	83,75	29,12
CH ₄	0,17	0,00162
N ₂ O	0,00243	0,000041

5.4. Ulazni podaci za energetske konfiguracije broda

U prethodnim poglavljima smo odredili emisije, utroške resursa i energije za MJ energije dobivene iz pojedinog goriva. Da bi mogli odrediti emisije energetskih konfiguracija broda moramo odrediti potrošnju goriva. Potrošnju goriva ćemo izraziti u energiji po prijađenom putu (MJ/nm). Potrošnju goriva izraženu na taj način možemo unijeti u GREET kojim izračunavamo emisije CO₂ u službi broda.

5.4.1. Konfiguracija hibridnog energetskog sustava

5.4.1.1. Potrošnja dizelskih motora

Pohranjena energija u spremnicima dizelskog goriva:

$$E = V_g \cdot H_{a,d} = 1.492.906 \text{ MJ} \quad (33)$$

Potrošnja dizelskog goriva:

$$b = \frac{E}{s} = 797,49 \text{ MJ/nm} \quad (34)$$

Gdje je :

- $V_g = 41,7 \text{ m}^3$ - Volumen pohranjenog dizelskog goriva
- $H_{a,d} = 35.801,1 \text{ MJ/m}^3$ - Donja ogrjevna moć dizelskog goriva
- $s = 1.872 \text{ nm}$ - Doplov broda

5.4.1.2. Potrošnja LNG goriva

Pohranjena energija u tankovima LNG goriva:

$$E = V_{g,LNG} \cdot H_{d,LNG} = 462.330,1 \text{ MJ} \quad (35)$$

Potrošnja LNG goriva:

$$b = \frac{E}{s} = 246,97 \text{ MJ/nm} \quad (36)$$

Gdje je :

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| $V_{g,LNG} = 22,2 \text{ m}^3$ | - Volumen pohranjenog LNG goriva |
| $H_{d,LNG} = 20.825,7 \text{ MJ/m}^3$ | - Donja ogrjevna moć LNG goriva |
| $s = 1.872 \text{ nm}$ | - Doplov broda. |

5.4.1.3. Potrošnja električne energije pohranjene u baterijama

Potrošnja električne energije:

$$b = \frac{E}{s} = 5,78 \text{ MJ/nm} \quad (37)$$

Gdje je :

- | | |
|------------------------|--|
| $E = 1.800 \text{ MJ}$ | - Energija pohranjena u baterijama |
| $s = 312 \text{ nm}$ | - Autonomija broda u nm (pretpostavlja se da se baterije kapaciteta 500 kWh mogu svaki dan napuniti u pristaništu) |

Regular
✦

VMT share
100 %
Calculate

Vehicle Powerplant

Plant Name ✦

Base Plant [Base is not set.](#)

Energy sources

Conventional Diesel

Consumption MPG-Gasoline MPG-Diesel

797.49 MJ/nmi 📈

Charging or Refueling efficiency

100 % 📈

Energy source (upstream pathway or mix)

Pathway: Conventional Diesel from Crude C

Tailpipe emissions

CO₂ 59.93 kg/nmi 📈

CH₄ 1.12 g/nmi 📈

NO₂ 2.80 g/nmi 📈

Vehicle Powerplant

Plant Name ✦

Base Plant [Base is not set.](#)

Energy sources

Liquefied Natural Gas

Consumption MPG-Gasoline MPG-Diesel

246.97 MJ/nmi 📈

Charging or Refueling efficiency

100 % 📈

Energy source (upstream pathway or mix)

Pathway: Liquefied Natural Gas (As a Trans

Tailpipe emissions

CO₂ 14.02 kg/nmi 📈

CH₄ 261.09 g/nmi 📈

N₂O 0.56 g/nmi 📈

Vehicle Powerplant

Plant Name ✦ ✕

Base Plant [Base is not set.](#)

Energy sources

Electricity

Consumption MPG-Gasoline MPG-Diesel

5.78 MJ/nmi 📈

Charging or Refueling efficiency

85 % 📈

Energy source (upstream pathway or mix)

Pathway: Distributed - European Electricity

Tailpipe emissions

Slika 20. Prikaz grafičkog sučelja programa GREET

5.4.2. Konfiguracija energetskeg sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima

5.4.2.1. Potrošnja dizelskih motora

Energetski potencijal u spremnicima dizelskog goriva:

$$E = V_g \cdot H_{d,d} = 1.492.906 \text{ MJ} \quad (38)$$

Potrošnja dizelskog goriva:

$$b = \frac{E}{s} = 797,49 \text{ MJ/nm} \quad (39)$$

Gdje je :

- | | |
|-------------------------------------|--|
| $V_g = 41,7 \text{ m}^3$ | - Volumen pohranjenog dizelskog goriva |
| $H_{d,d} = 35.801,1 \text{ MJ/m}^3$ | - Donja ogrjevna moć dizelskog goriva |
| $s = 1.872 \text{ nm}$ | - Doplov broda |

5.4.2.2. Potrošnja dizel generatora

Energetski potencijal u spremnicima dizelskog goriva:

$$E = V_g \cdot H_{d,d} = 748.243,10 \text{ MJ} \quad (40)$$

Potrošnja dizelskog goriva:

$$b = \frac{E}{s} = 399,70 \text{ MJ/nm} \quad (41)$$

Gdje je:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| $V_g = 20,9 \text{ m}^3$ | - Volumen pohranjenog dizelskog goriva |
| $H_{d,d} = 35.801,1 \text{ MJ/m}^3$ | - Donja ogrjevna moć dizelskog goriva |
| $s = 1.872 \text{ nm}$ | - Doplov broda |

5.4.3. Konfiguracija energetskeg sustava broda na gorivne članke

Pohranjena energija u tankovima LNG goriva:

$$E = V_{g,LNG} \cdot H_{d,LNG} = 1.951.366,19 \text{ MJ} \quad (42)$$

Potrošnja dizelskog goriva:

$$b = \frac{E}{s} = 1.042,39 \text{ MJ/nm} \quad (43)$$

Gdje je:

- $V_{g,LNG} = 93,7 \text{ m}^3$ - Volumen pohranjenog LNG goriva
- $H_{d,LNG} = 20.825,7 \text{ MJ/m}^3$ - Donja ogrjevna moć LNG goriva
- $s = 1.872 \text{ nm}$ - Autonomija broda u nm

5.5. Analiza rezultata za različite energetske konfiguracije

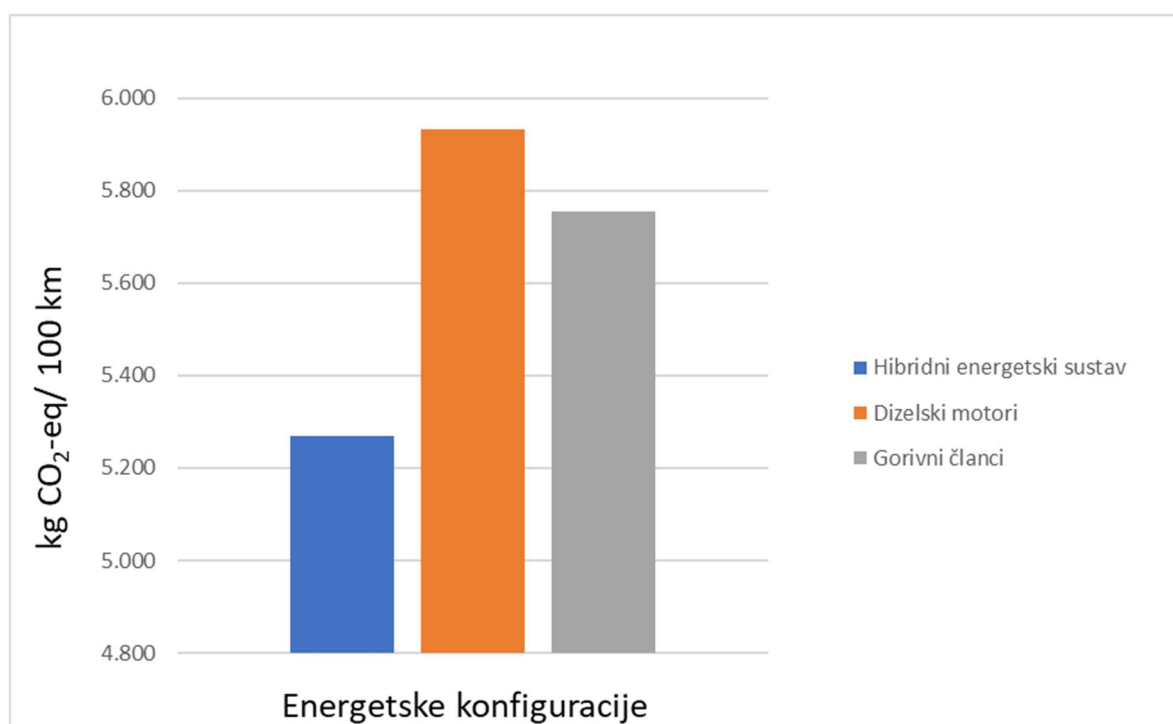
Upotrebom programa GREET dobiveni su sljedeći rezultati za analizirane energetske konfiguracije. Iskazani rezultati daju se na bazi prijeđenih 100 km. Rezultati uključuju emisije koje su nastale za vrijeme proizvodnje goriva i njegovim trošenjem na brodu.

Tablica 26. Ukupne emisije WTW

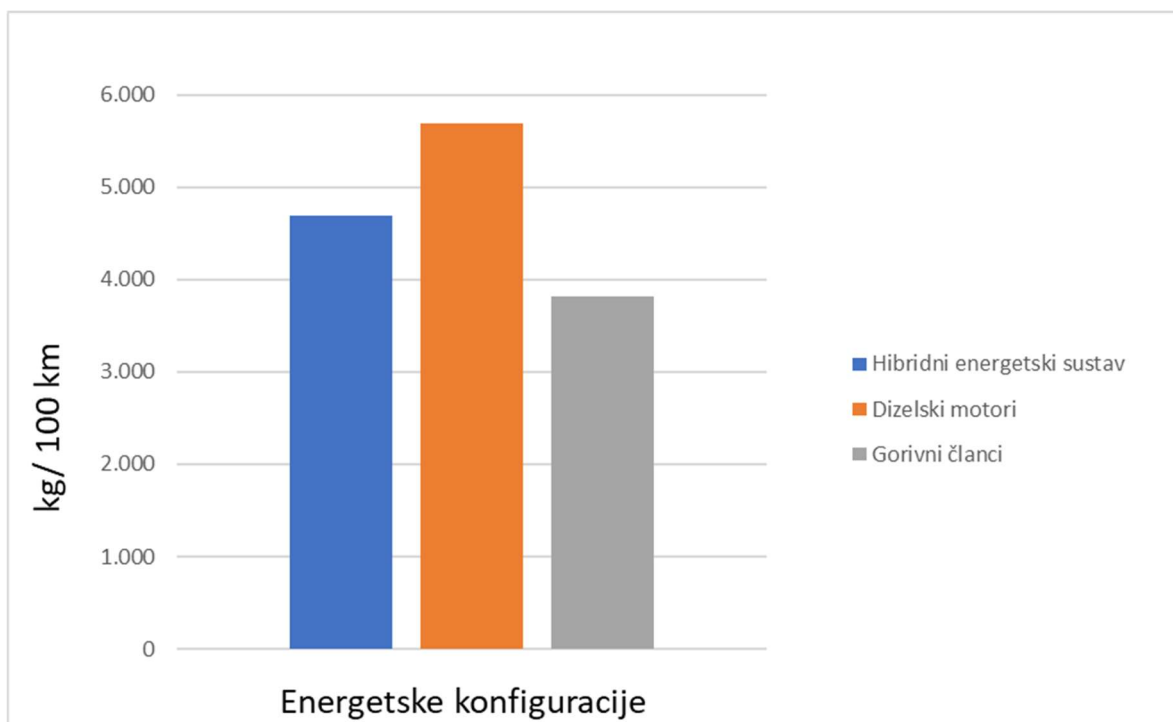
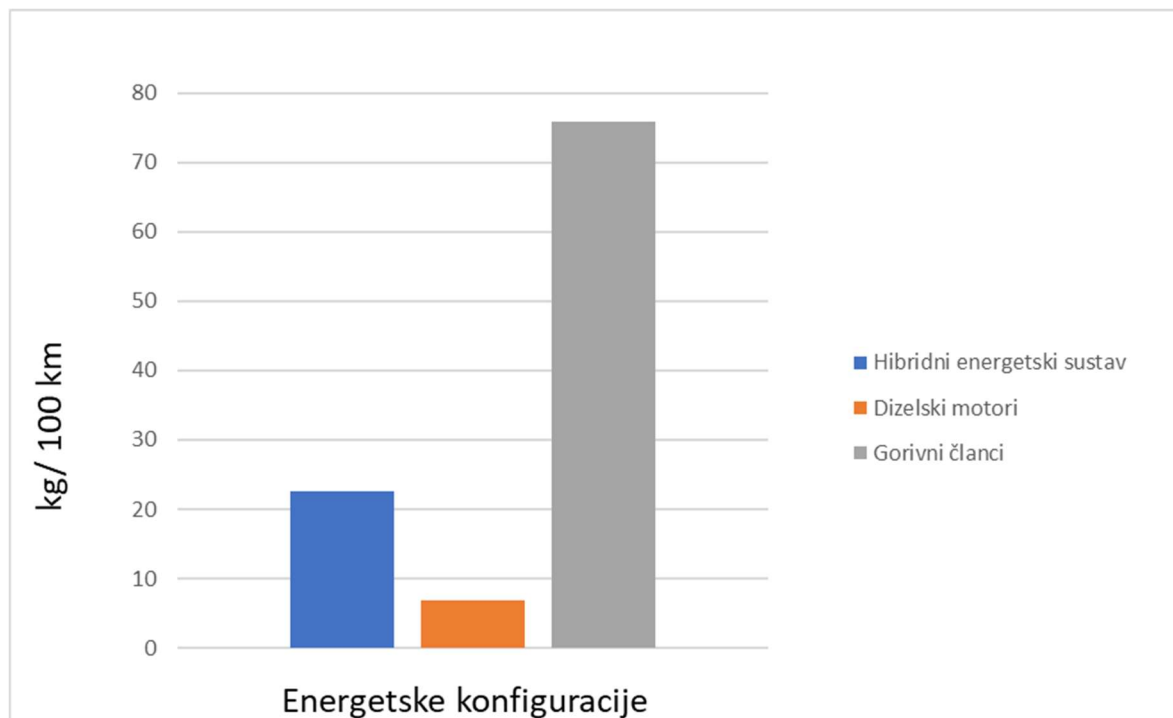
Energetska konfiguracija broda	CO ₂ (kg/100 km)	CH ₄ (kg/100 km)	N ₂ O (kg/100 km)	C _f (kgCO ₂ - eq/100 km)
Konfiguracija hibridnog energetskeg sustava	4.692,88	22,59	0,0418	5.270,08
Konfiguracija energetskeg sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	5.687,78	6,93	0,24	5.932,55
Konfiguracija energetskeg sustava broda na gorivne članke	3.816,31	75,87	0,14	5.754,78

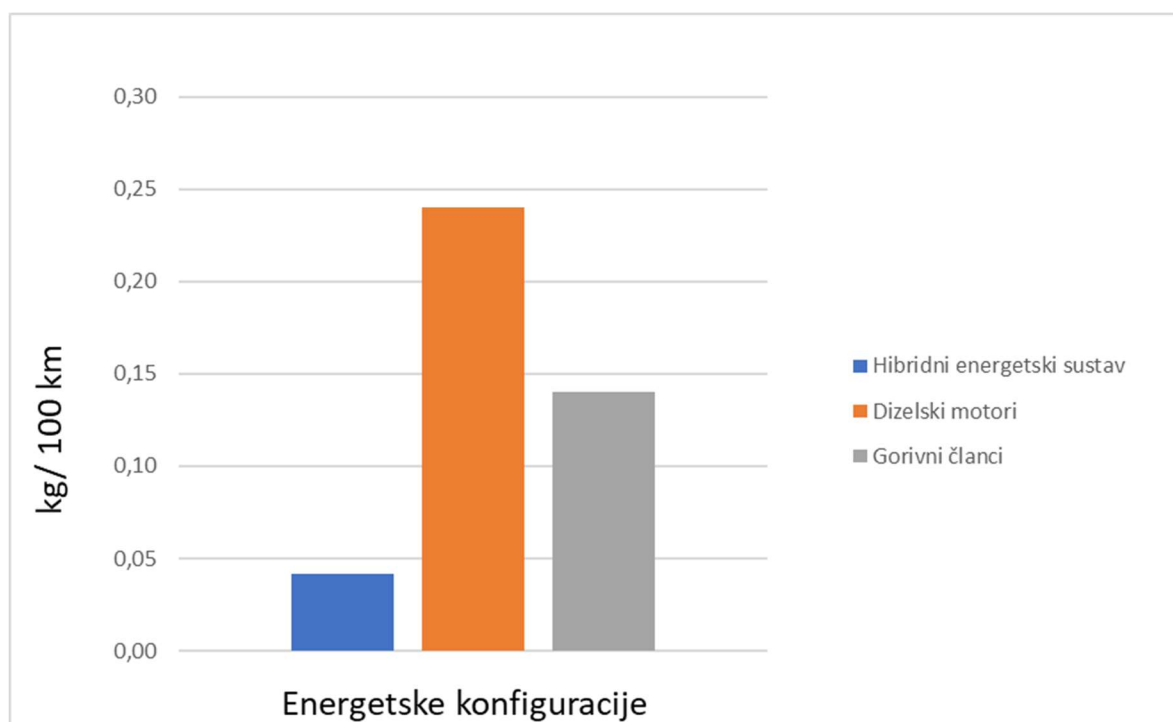
Tablica 27. Urbane emisije WTW

Energetska konfiguracija broda	CO ₂ (kg/100km)	CH ₄ (kg/100km)	N ₂ O (kg/100km)
Konfiguracija hibridnog energetskeg sustava	3.423,11	12,30	0,02681
Konfiguracija energetskeg sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	4.212,45	0,24	0,19
Konfiguracija energetskeg sustava broda na gorivne članke	2.604,84	51,24	0,10



Slika 21. Ugljični otisak energetske konfiguracije

Slika 22. Emisije CO₂Slika 23. Emisije CH₄

Slika 24. Emisije N₂O

5.6. Metode poboljšanja energetske učinkovitosti broda

Brodski energetske sustav identificiran je kao glavni zagađivač na brodu. Izgaranjem goriva na bazi ugljikovodika ispuštaju se staklenički plinovi u okoliš. U prethodnom poglavlju prikazani su rezultati provedene analize. Pokazalo se da se na količinu emisija može utjecati kombiniranjem različitih izvora energije. Naime sustavi koji koriste ugljikovodike kao izvor energije u velikoj su mjeri optimirani. Primjerice dizelski motori su se kroz svoju upotrebu tokom proteklih desetljeća toliko usavršili da ne preostaje puno prostora za napredak. Upravo zbog tog razloga sama upotreba hibridnih energetske konfiguracija nije dovoljna sama po sebi da bi se značajno smanjile emisije. U drugoj IMO studiji o stakleničkim plinovima [10] pokazano je da se poboljšanjima na trupu broda, glavnom porivnom stroju, konstrukciji broskog vijka i smanjenjem brzine plovidbe mogu postići znatna smanjenja, Tablica 28. Naj značajnije smanjenje se postiže ukoliko se smanjuje brzina plovidbe. Problem ove mjere je u tome što se time produljuje vrijeme plovidbe te se smanjuje količina prevezene robe. U studiji [3] pokazano je kako se na globalnoj razini dešava upravo suprotna pojava zbog sve većeg zahtjeva za transport roba kada su u pitanju najveći brodovi.

Tablica 28. Moguće smanjenje emisija CO₂ upotrebom postojećih mjera i tehnologija [18]

Konstrukcija novi brod	Ušteda CO ₂ /tona-milja	Zajedno	Sveukupno
Projekt i brzina	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 %		

6. IZRAČUN TROŠKOVA POVEZANIH UZ ENERGETSKE KONFIGURACIJE

Prilikom izračuna troškova pojedinih energetske konfiguracije pretpostavljen je životni vijek broda od 25 godina. U Tablici 29 prikazani su troškovi povezani uz pojedine elemente energetske konfiguracije.

Tablica 29. Troškovnik pojedinih elemenata energetske konfiguracije

	Početno ulaganje	Godišnje održavanje
Dizelski motor	300 USD/kW [19]	5,2 USD/kW [20]
Dizel generator	350 USD/kW [20]	5,2 USD/kW [20]
SOFC	1544 USD/kW [21]	1 % početnog ulaganja [22]
Elektromotor	135 USD/kW [23]	1 % početnog ulaganja [24]
Li-ion baterije	156 USD/kWh [22]	0,5 USD/kWh [25]

Nakon što smo odredili emisije pojedinih konfiguracija možemo odrediti koliko će jedinični novčani ekvivalent uloženi u pogon broda sa određenom energetske konfiguracijom emitirati CO₂. Da bi odredili navedeno koristiti ćemo se podacima o cijeni eurodizela (INA – industrija nafte d.d.) preuzetom sa stranica hrvatskog autokluba na dan 26. lipnja 2020. godine [26]. Cijena se kreće u rasponu od 7,64 do 8,83 HRK po litri. Računat će se sa srednjom vrijednosti cijene koja iznosi 8,24 HRK/l. Za cijenu LNG koristiti će se vrijednost za Europu očitana sa Slike 25. Za preračun HRK u USD koristiti ćemo se srednjim tečajem HNB na dan 26. lipnja 2020. godine [27]. Srednji tečaj za devize je iznosio 1 USD = 6,75 HRK.

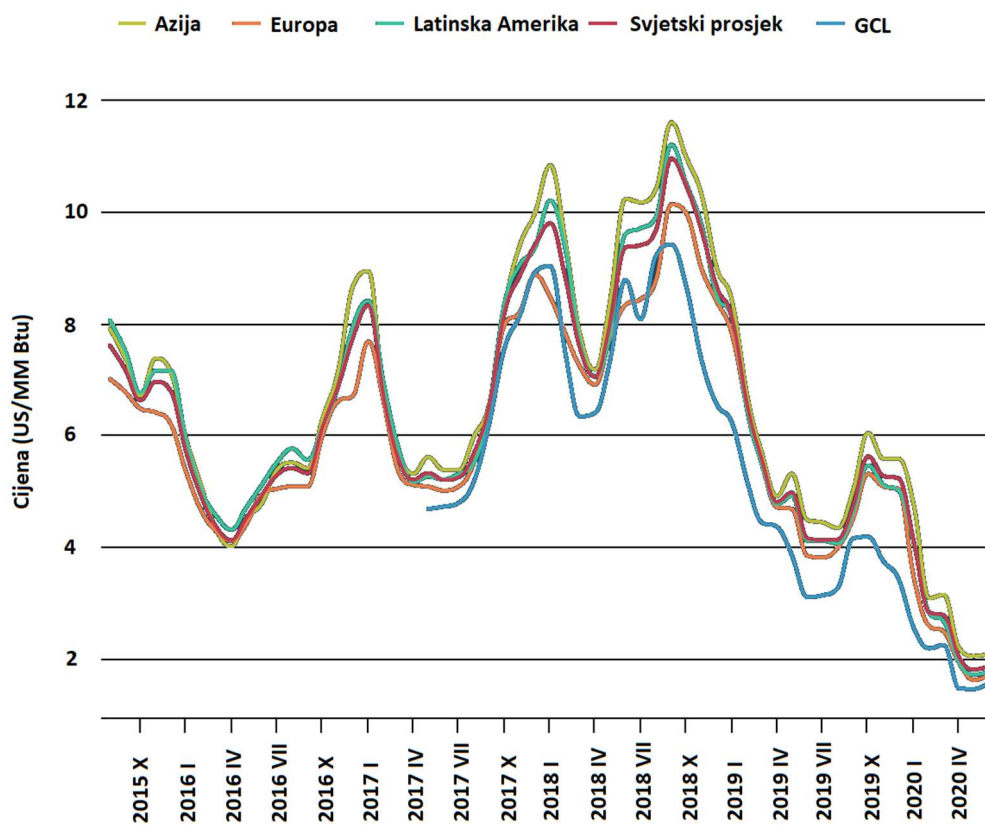
Cijena eurodizela u dolarima po litri:

$$\$_{eurodizel} = \frac{\text{srednja vrijednost cijene eurodizela}}{\text{srednji tečaj za devize}} = 1,22 \text{ USD/l} \quad (44)$$

Cijena LNG u dolarima po m³:

$$\$_{LNG} = \frac{H_{d,LNG}}{10^6} \cdot 1.7 = 33,56 \text{ USD/m}^3 \quad (45)$$

$$\frac{947,8171}{}$$



Slika 25. Prosječna cijena LNG po regijama [28]

6.1. Konfiguracija hibridnog energetskeg sustava

Cijena dizelskog goriva:

$$\$_{d,hibrid} = V_g \cdot 10^3 \cdot \$_{eurodizel} = 50.874 \text{ USD} \quad (46)$$

Cijena LNG goriva:

$$\$_{LNG,hibrid} = V_{LNG} \cdot \$_{LNG} = 745 \text{ USD} \quad (47)$$

Ukupna cijena goriva ove energetske konfiguracije:

$$\$_{u,hibrid} = \$_{d,hibrid} + \$_{LNG,hibrid} = 51.619 \text{ USD} \quad (48)$$

Za navedenu cijenu brod prevali 1.872 nautičke milje ili 3.466,94 km. Na prijeđenih 100 km brod potroši goriva u vrijednosti od:

$$\$_{u,hibrid/100km} = \frac{\$_{d,diesel}}{\frac{3466,94}{100}} = 1.488,89 \text{ USD} \quad (49)$$

Tablica 30. Iznos početne investicije u hibridnu energetska konfiguraciju

	Početna investicija (USD)	Godišnje održavanje (USD)
Dizelski motori (1302 kW)	390.600,00	6.770,40
Elektromotori (400 kW)	54.000,00	540,00
SOFC (548 kW)	846.112,00	8.461,12
Li-ion baterije (500 kWh)	78.000,00	250,00
Ukupno:	1.368.712,00	16.021,50

6.2. Konfiguracija energetskog sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima

Cijena dizelskog goriva:

$$\$_{d,diesel} = V_{ukupno} \cdot 10^3 \cdot \$_{eurodizel} = 76.372 \text{ USD} \quad (50)$$

Za navedenu cijenu brod prevali 1.872 nautičke milje ili 3.466,94 km. Na prijeđenih 100 km brod potroši goriva u iznosu od:

$$\$_{d,diesel/100km} = \frac{\$_{d,diesel}}{\frac{3.466,94}{100}} = 2.202,86 \text{ USD} \quad (51)$$

Tablica 31. Iznos početne investicije energetske konfiguracije pogonjene isključivo dizelskim motorima

	Početna investicija (USD)	Godišnje održavanje (USD)
Dizelski motori (1302 kW)	390.600,00	6.770,40
Elektromotori (400 kW)	54.000,00	540,00
Dizel generatori (568 kW)	198.800,00	2.953,60
Ukupno:	643.400,00	10.264,00

6.3. Konfiguracija energetskog sustava broda na gorivne članke

Cijena LNG goriva:

$$\$_{LNG,SOFC} = V_{LNG} \cdot \$_{LNG} = 3.144,6 \text{ USD} \quad (52)$$

Za navedenu cijenu brod prevali 1.872 nautičke milje ili 3.466,94 km. Na prijeđenih 100 km brod potroši goriva u iznosu od :

$$\$_{LNG,SOFC/100km} = \frac{\$_{LNG,SOFC}}{\frac{3.466,94}{100}} = 90,70 \text{ USD} \quad (53)$$

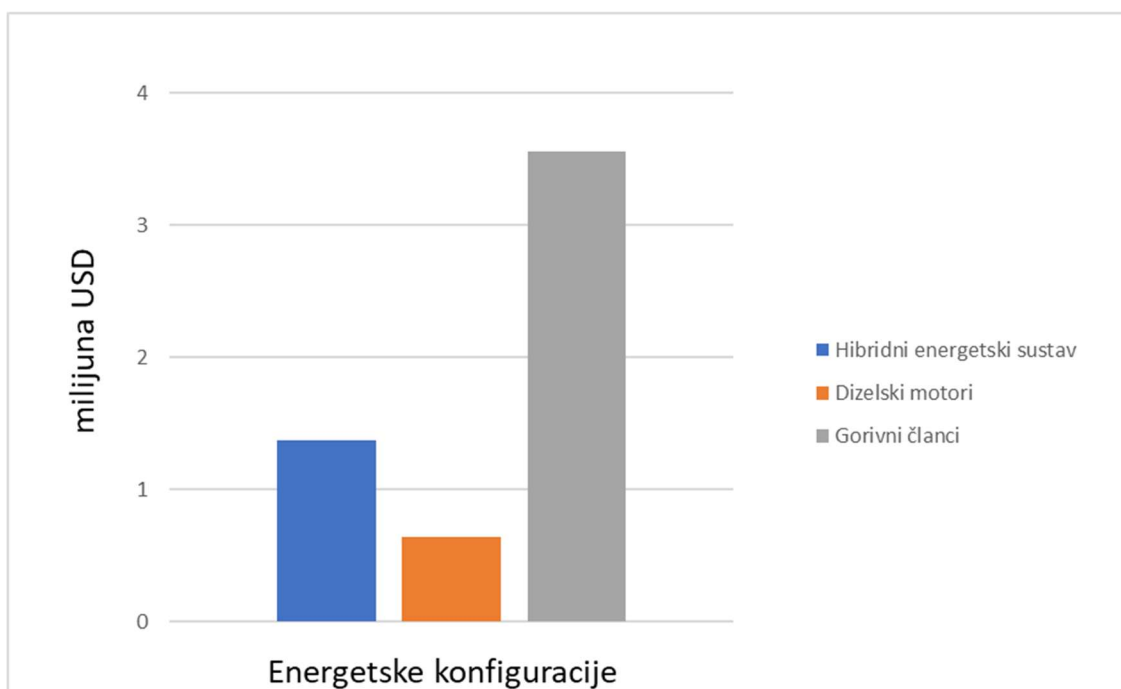
Tablica 32. Iznos početne investicije za energetska konfiguraciju s gorivnim člancima

	Početna investicija (USD)	Godišnje održavanje (USD)
SOFC (2158,4 kW)	3.332.570,00	33.325,70
Elektromotori (400 kW)	54.000,00	540,00
Ukupno:	3.386.570,00	33.865,70

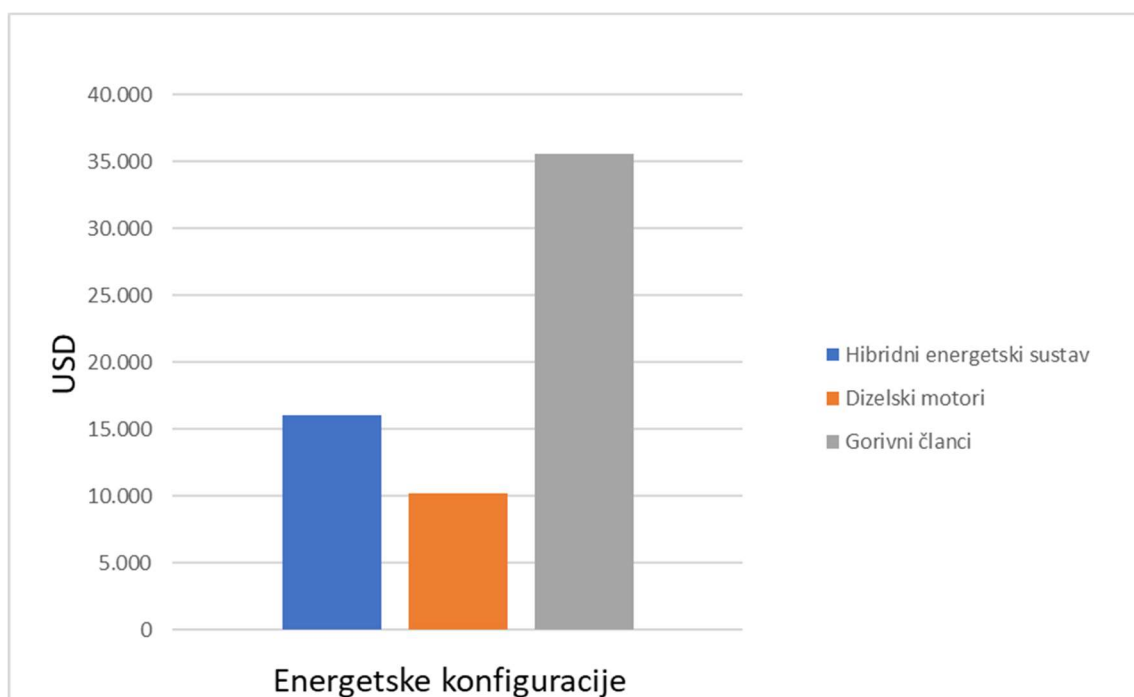
6.4. Usporedba troškova različitih energetske konfiguracije

Tablica 33. Usporedba troškova različitih energetske konfiguracije

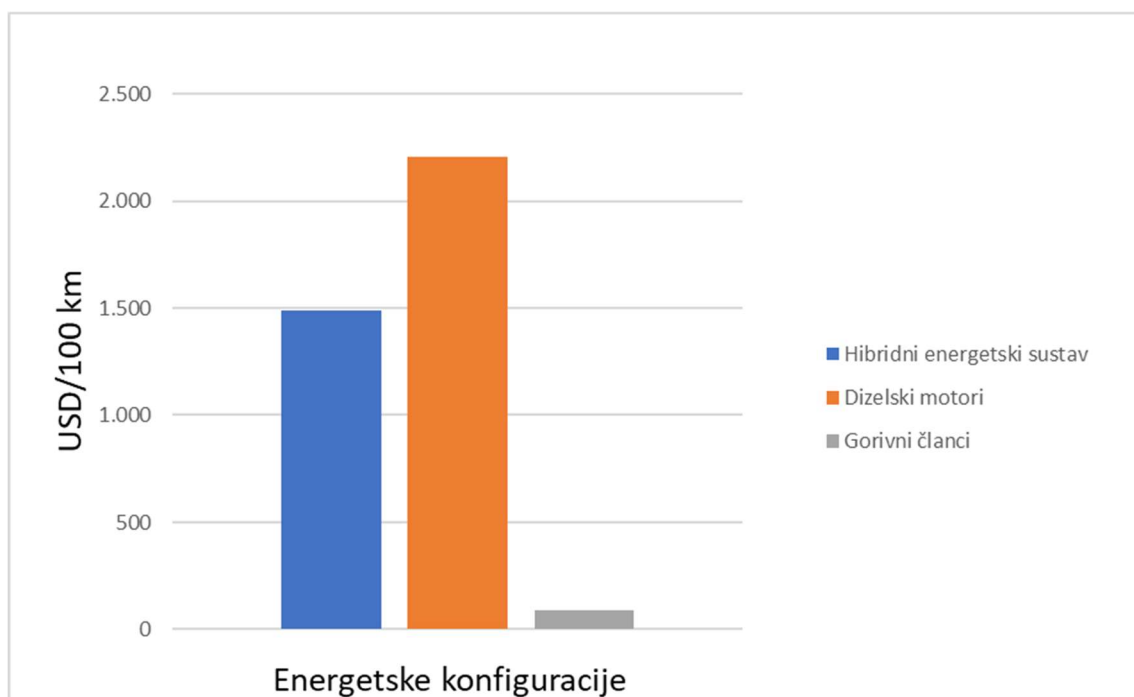
	Početna investicija (USD)	Godišnje održavanje (USD)	Trošak goriva (USD/100km)
Konfiguracija hibridnog energetske sustava	1.368.712,00	16.021,50	1.488,89
Konfiguracija energetske sustava broda pogonjenog isključivo dizelskim motorima	643.400,00	10.264,00	2.202,86
Konfiguracija energetske sustava broda na gorivne članke	3.555.319,60	35.553,10	90,70



Slika 26. Usporedba iznosa početnih ulaganja u energetske konfiguracije



Slika 27. Usporedba troškova godišnjeg održavanja energetskih konfiguracija



Slika 28. Usporedba troškova goriva energetskih konfiguracija

7. ZAKLJUČAK

U radu je obrađen problem utjecaja putničkog broda, namijenjenog za plovidbu sjevernim Jadranom, na okoliš. Razmotrene su različite energetske konfiguracije broda. Osnovni parametar u analizi bio je cjeloživotni ugljični otisak, uz njega su prikazani povezani troškovi i mase svake energetske konfiguracije. Pokazalo se da je hibridna energetska konfiguracija najpovoljnija u smislu utjecaja broda na okoliš. Iako je najpovoljnija u smislu zaštite okoliša postoje značajne prepreke za njenu primjenu. Njena masa je gotovo dvaput veća od konfiguracije koja koristi isključivo dizelske motore. Početna investicija je također gotovo dva puta veća, troškovi godišnjeg održavanja su značajno viši nego kod konfiguracije s dizelskim motorima. Troškovi goriva hibridne energetske konfiguracije su nešto manji u odnosu na konfiguraciju sa dizelskim motorima. Konfiguracija brodskog energetskog sustava s gorivnim člancima pokazala se kao neadekvatno rješenje. Suprotno očekivanom pokazalo se kako joj je i cjeloživotni ugljični otisak veći od hibridne energetske konfiguracije. Uzmemo li u obzir njenu masu koja je više od 4 puta veća nego energetska konfiguracija s dizelskim motorima jasno je da se takvo rješenje neće koristiti. Dodamo li na sve to i iznos početne investicije i godišnjeg održavanja koje daleko nadmašuje prethodne dvije konfiguracije možemo zaključiti da se rješenja ovog tipa neće primjenjivati u bližoj budućnosti za brodove sa sličnim operativnim profilom i s razmjerno velikom autonomijom. Vidljivo je da primjena alternativnih izvora energije u brodskim sustavima u određenim sustavima može biti prilično ograničena, osobito kod brodova koji nemaju ustaljen radni profil, kao što su primjerice trajekti. Glavni razlog je što inovativni izvori energije redom imaju malu specifičnu gustoću energije. To rezultira iznimno velikim masama energetskih konfiguracija. Najbolji primjer je energetska konfiguracija koja potrebnu energiju skladišti u baterijama. Pokazalo se da bi ovakvo rješenje imalo gotovo 3 puta veću masu od same istisnine broda. Stoga, može se zaključiti kako u ovim slučajevima cijena nije presudni faktor već tehnička izvedivost sustava. Prema trenutnom stanju razvoja, hibridna energetska rješenja pogodna su za manje putničke brodove koji ne zahtijevaju veliku autonomiju i koji imaju izrazito promjenjive radne režime.

LITERATURA

- [1] European Commission, The European Green Deal, Brussels, Belgija; 2019.
https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
(pristup 15. lipnja 2020.).
- [2] UN, Paris Agreement, New York, SAD; 2016.
https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (pristup 15. lipnja 2020.).
- [3] Olmer. N, Comer B, Roy B, Mao X, Rutherford D, Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015, ICCT, Washington, SAD; 2017.
https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf (pristup 15. lipnja 2020.).
- [4] IMO, Third IMO Greenhouse Gas study, Suffolk, Micropress Printers, UK; 2014.
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf> (pristup 15. lipnja 2020.).
- [5] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, Schaaf E, Olivier J, Peters J, Schure K, Fossil CO₂ & GHG emissions of all world countries, European Commission; 2017.
<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/fossil-co2-and-ghg-emissions-all-world-countries-0> (pristup 16. lipnja 2020.).
- [6] In house analysis by Transport & Environment, Statistical analysis of the energy efficiency performance (EEDI) of new ships built in 2013-2017, Transport & Environment; 2017.
<https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Statistical%20analysis%20of%20the%20energy%20efficiency%20performance%20%28EEDI%29%20of%20new%20ships.pdf> (pristup 16. lipnja 2020.).
- [7] Brečić H., Projektni indeks energetske učinkovitosti ultra velikog kontejnerskog broda tipa HHI SkyBench™ nosivosti 19000 TEU , Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2016.
<http://repositorij.fsb.hr/5184/> (pristup 20. lipnja 2020.).
- [8] Vladimir N.; Ančić I.; Šestan A., Effect of ship size on EEDI requirements for large container ships, Journal of marine science and technology (0948-4280) 23; 2018.

- <https://www.bib.irb.hr/928216> (pristup 5. srpnja 2020.).
- [9] MEPC, Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships; 2018.
<http://www.imo.org/en/OurWork/Documents/Resolution%20MEPC.304%2872%29%20on%20Initial%20IMO%20Strategy%20on%20reduction%20of%20GHG%20emissions%20from%20ships.pdf> (pristup 17 lipnja 2020.).
- [10] Chryssakis C, Hendrik W. B, André C. B, Pagaard Fuglseth T, Lande M, Laugen L, Longva T, Raeissi B, Anton Tvette H, Low Carbon Shipping Towards 2050, DNV-GI; 2017.
<https://www.mcst-rmiusp.org/index.php/resources/reference-library/send/12-international-shipping-emissions/106-dnv-gi-2017-low-carbon-shipping-towards-2050-2017-06> (pristup 19. lipnja 2020.).
- [11] Parry I, Heine D, Kizzier K, and Smith T, Carbon Taxation for International Maritime Fuels: Assessing the Options, Međunarodni monetarni fond (IMF); 2018.
<https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2018/09/11/Carbon-Taxation-for-International-Maritime-Fuels-Assessing-the-Options-46193> (pristup 17 lipnja 2020.).
- [12] Wang M.Q, GREET 1.5 — Transportation Fuel-Cycle Model, Methodology, Development, Use, and Results, Argonne national laboratory, SAD; 1999.
https://greet.es.anl.gov/publications#B_Technical%20Publications (pristup 15. lipnja 2020.).
- [13] Delluchi M, The Social Cost of Motor Vehicle Use, University of California, Berkeley, SAD; 1997.
- [14] Congress of the United States of America, Clean Air Act Amendment; 1990.
<https://www.congress.gov/bill/101st-congress/senate-bill/1630/text> (pristup 18. lipnja 2020.).
- [15] United States Environmental Protection Agency, AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, SAD; 2009.
<https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#Proposed/> (pristup 15. lipnja 2020.).
- [16] Galjanić A, Idejni projekt hibridnog energetskog sustava putničkog broda, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
<http://repozitorij.fsb.hr/4990/> (pristup 15. lipnja 2020.).
- [17] ITW Preformacne Polymers,

- <https://itwperformancepolymers.com/products/chockfast/chocking-compounds/chockfast-orange/> (pristup 26. lipnja 2020.).
- [18] IMO, Technical and operational measures to improve the energy efficiency of international shipping and assessment of their effect on future emissions; 2011.
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/COP%2017/Submissions/Final%20SBSTA%20EEDI%20SEEMP%20COP17.pdf> (pristup 4. srpnja 2020.).
- [19] California Air Resources Board (CARB), Technology Assessment: Ocean-Going Vessels, CARB, Sacramento, CA, SAD; 2018.
https://ww3.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/ogv_tech_report.pdf (pristup 22. lipnja 2020.).
- [20] TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research), PROMINENT project. In D2.8/D2.9 Standardized Model and Cost/Benefit Assessment for Right-Size Engines and Hybrid Configurations, European Commission: Brussels, Belgija; 2018.
https://www.verbrandingsmotor.nl/wp-content/uploads/2018/08/180313-Report_PROMINENT_Standardized_model_and-cost_benefit_assessment_for_right-size_engines_and_hybrid_configurations.pdf (pristup 22. lipnja 2020.).
- [21] Battelle Memorial Institute, Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications, Battelle Memorial Institute; 2016.
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_pp_chp_fc_systems.pdf (pristup 22. lipnja 2020.).
- [22] Kyunghwa K, Gilltae R, Wook K, Kangwoo C; A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments, Korean Register (KR), Pusan National University (PNU); 2020.
<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/3/183/htm> (pristup 22. lipnja 2020.).
- [23] Interreg Europe Danube Transnational Program-Grendel, Fact sheet N2—Diesel-Electric Propulsion, Interreg Europe, Lille, Francuska; 2019.
http://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_public/0001/39/2a29d38d0b7efeab00c5785a23489875baf855.pdf (pristup 22. lipnja 2020.).
- [24] The Crown (Department for Transport), Clean Maritime Plan, The Crown: London, 2019.

-
- https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/815664/clean-maritime-plan.pdf (pristup 22. lipnja 2020.).
- [25] Heinzmann, J, GE (General Electric), Energy Storage. In Proceedings of the Solar Power International, Las Vegas, NV, USA, 13–15; 2016.
- [26] Hrvatski autoklub
https://www.hak.hr/info/cijene-goriva/#li_eurodizel (pristup 26. lipnja 2020.).
- [27] Hrvatska narodna banka
<https://www.hnb.hr/temeljne-funkcije/monetarna-politika/tecajna-lista/tecajna-lista>
(pristup 26. lipnja 2020.).
- [28] Bluegold Research,
<https://bluegoldresearch.com/regional-lng-prices> (pristup 25. lipnja 2020.).

PRILOZI

- I. CD-R disc