

Analiza ugljičnog otiska trajekta

Fabris, Vinko

Undergraduate thesis / Završni 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:173048>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vinko Fabris

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Vinko Fabris

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru na pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada. Zahvalio bih se Maji Perčić, mag. ing. koja me uputila u korištenje programskog paketa GREET 2019 i dr. sc. Ivici Ančiću koji me podučio znanjima iz područja brodogradarstva.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija. Također, velika zahvala Dori na pruženoj ljubavi, podršci i strpljenju kroz sve godine studija.

Vinko Fabris



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Vinko Fabris

Mat. br.: 0035207485

Naslov rada na

hrvatskom jeziku: Analiza ugljičnog otiska trajekta

Naslov rada na

engleskom jeziku: Carbon footprint assessment of a ferry

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 brodskog energetskog sustava u cilju smanjenja navedenih emisija potrebno voditi računa o ukupnim troškovima. U završnom radu potrebno je provesti analizu ugljičnog otiska trajekta Sveti Krševan iz flote Jadrolinije koji se koristi na ruti Orebić-Dominče-Orebić, imajući u vidu tehničke značajke broda i realni eksploatacijski profil.

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 analiziranog broda s naglaskom na brodski energetski sustav,
4. Analizu operativnog profila broda tijekom ljetnog i zimskog plovidbenog reda,
5. Proračun cjeloživotnih emisija CO₂ trajekta za radni vijek od 30 godina,
6. Analizu smanjenja emisija CO₂ primjenom različitih tehničkih i operativnih mjera.

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

Zadatak zadan:

15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. PRORAČUNSKA METODOLOGIJA I KORIŠTENA PROGRAMSKA PODRŠKA	4
3. TEHNIČKI OPIS TRAJEKTA „SVETI KRŠEVAN“	7
3.1. Tehnički podaci.....	8
3.2. Podaci o energetsom postrojenju	9
4. ANALIZA OPERATIVNOG PROFILA BRODA	10
5. PRORAČUN UGLJIČNOG OTISKA TRAJEKTA	12
5.1. WTP faza.....	12
5.1.1. Analiza životnog ciklusa WTP faze.....	12
5.1.2. Proračun ugljičnog otiska WTP faze	13
5.2. PTW faza.....	14
5.2.1. Analiza životnog ciklusa PTW faze.....	14
5.2.2. Proračun ugljičnog otiska PTW faze	14
5.3. Sveukupni ugljični otisak - WTW faza.....	16
5.4. Proračun cjeloživotnih emisija CO ₂ trajekta.....	18
6. ANALIZA MOGUĆNOSTI SMANJENJA EMISIJA CO ₂	19
6.1. Alternativna goriva	20
6.1.1. Električna energija	22
6.1.1.1. Litij-ionska baterija.....	23
6.1.1.2. Hibrid.....	25
6.2. Operativne mjere.....	27
7. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA.....	31
PRILOZI.....	34

POPIS SLIKA

Slika 1.	Životni ciklus brodske energetske konfiguracije s dizelskim motorom.....	4
Slika 2.	Sučelje programske podrške GREET 2019.....	5
Slika 3.	Ilustracija svih faza procesa (Well-to-Wheel).....	5
Slika 4.	Trajekt Sveti Krševan u plovidbi.....	7
Slika 5.	Dizelski porivni stroj marke Caterpillar	9
Slika 6.	Simbolički prikaz rute plovidbe trajekta na relaciji Orebić (Pelješac) – Dominče (Korčula)	10
Slika 7.	Grafički prikaz brzine trajekta u čvorovima.....	11
Slika 8.	Ruta plovidbe tankera sa sirovom naftom iz Kuvajta u Hrvatsku.....	12
Slika 9.	Prikaz transporta sirove nafte od Kuvajta do rafinerije Rijeka u programskoj podršci GREET 2019	13
Slika 10.	Prikaz transporta dizel goriva od rafinerije Rijeka do trajekta u programskoj podršci GREET 2019	13
Slika 11.	Prikaz simulacije WTP faze u programskoj podršci GREET 2019	14
Slika 12.	Konfiguracija trajekta u programskoj podršci GREET 2019	15
Slika 13.	Dijagramski prikaz rezultata WTP faze	17
Slika 14.	Dijagramski prikaz rezultata PTW faze	17
Slika 15.	Dijagramski prikaz ugljičnog otiska u svakoj fazi pojedinačno.....	18
Slika 16.	Mjere za potencijalno smanjenje emisija CO ₂	19
Slika 17.	Raspodjela pojedinih izvora energije u prodanoj električnoj energiji u Republici Hrvatskoj	22
Slika 18.	Životni ciklus brodske energetske konfiguracije s litij ionskom baterijom	23
Slika 19.	Električna propulzija napajana isključivo litij ionskim baterijama	24
Slika 20.	Trajekt Aurora koji plovi između Švedske i Danske	25
Slika 21.	Hibridna dizel električna propulzija s baterijama u hibridnom sustavu.....	26
Slika 22.	Ugljični otisak prilikom različitih brzina plovidbe	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Brodska emisija CO ₂ u usporedbi sa svjetskom emisijom CO ₂	2
Tablica 2. Detalji o brodu	8
Tablica 3. Osnovni tehnički podaci	8
Tablica 4. Podaci o energetsom postrojenju	9
Tablica 5. Emisija stakleničkih plinova u WTP fazi (g/nmi)	14
Tablica 6. Emisijski faktori za pojedine plinove i emisija stakleničkih plinova u PTW fazi	16
Tablica 7. Sveukupni ugljični otisak trajekta Sveti Krševan (kg CO ₂ -eq/nmi)	16

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
WTP	-	Od crpilišta do pumpne stanice
WTW	-	Od crpilišta do kotača (propulzora)
PTW	-	Od pumpne stanice do kotača (propulzora)
t	h	Prosječno vrijeme plovidbe
s	km	Duljina rute plovidbe
v_1	km/h	Prosječna brzina kao omjer udaljenosti i prosječnog vremena plovidbe
v_{AIS}	km/h	Prosječna brzina prema automatskom identifikacijskom sustavu
v_{23}	km/h	Prosječna brzina koja uzima u obzir različitu brzinu u plovidbi i tijekom manevriranja
v	km/h	Proračunska prosječna brzina
P_{MCR}	kW	Maksimalna trajna snaga
P_{pros}	kW	Prosječna snaga pogonskih strojeva
$P_{80\%MCR}$	kW	Snaga pogonskih strojeva pri 80 % P_{MCR}
$v_{80\%MCR}$	km/h	Brzina prilikom korištenja 80 % P_{MCR}
EC	kWh/km	Potrošnja energije
$SFOC$	g/kWh	Specifična potrošnja goriva
FC	kg/km	Potrošnja goriva
TE	g/km	Emisija ispušnih plinova
EF	g/kg	Emisijski faktor
GWP	-	Potencijal globalnog zagrijavanja

SAŽETAK

Ovaj završni rad obrađuje temu ugljičnog otiska trajekta Sveti Krševan, u vlasništvu tvrtke Jadrolinija koji plovi na relaciji Orebić (poluotok Pelješac) - Dominče (otok Korčula). Ugljični otisak je zbroj svih ispuštenih količina različitih stakleničkih plinova tijekom životnog ciklusa nekog proizvoda bilo kakvom aktivnošću tog proizvoda ili vezanom za taj proizvod. S obzirom da su brodovi veliki proizvođači stakleničkih plinova ova obrađena tema je već neko vrijeme aktualna u pomorskim krugovima. Ljudska populacija svjedoči globalnom zatopljenju koje je posljedica prekomjernog ispuštanja stakleničkih plinova. Na brodove u priobalnoj plovidbi posebno se obraća pažnju jer oni prometuju u blizini obale, pa tako utječu na kvalitetu života u priobalnom području. Brodski energetska sustav ovog trajekta sastoji se od dizelskih strojeva koji se koriste za poriv i za pomoćne potrebe. Proračun ugljičnog otiska za takvu brodsku energetska konfiguraciju je za potrebe ovog završnog zadatka izrađen pomoću programskog alata GREET 2019 za cjeloživotno razdoblje trajekta. Nadalje, na temelju rezultata su analizirane različite tehničke i operativne mjere koje bi mogle pridonijeti smanjenju ugljičnog otiska.

Ključne riječi: ugljični otisak, trajekt, staklenički plinovi, globalno zatopljenje, priobalna plovidba, brodski energetska sustav

SUMMARY

This final paper deals with the topic of the carbon footprint of the ferry Sveti Krševan, owned by the company Jadrolinija, which sails on the route Orebić (peninsula Pelješac) - Dominče (island of Korčula). The carbon footprint is the sum of all the quantities of different greenhouse gases emitted during the life cycle of a product by any activity of or related to that product. Given that ships are large producers of greenhouse gases, this topic has been topical in maritime circles for some time. The human population is witnessing global warming as a result of excessive greenhouse gas emissions. Coastal ships are given special attention because they operate near the coast, thus affecting the quality of life in the coastal area. The ship's energy system of this ferry consists of diesel engines used for propulsion and auxiliary needs. The calculation of the carbon footprint for such a marine energy configuration was made for the purposes of this final task using the GREET 2019 software tool for the ferry life cycle. Furthermore, based on the results, various technical and operational measures that could contribute to reducing the carbon footprint were analysed.

Key words: carbon footprint, ferry, greenhouse gases, global warming, coastal navigation, ship's energy system

1. UVOD

Svjetska trgovačka flota u 2019. godini brojila je 96295 brodova te se prema brojevima iz prethodnih godina (2017.:93262 brodova; 2018.:94169 brodova) povećava [1]. Brodovi na razne načine onečišćuju more, zrak i obalu, odnosno cjelokupni okoliš, pri čemu je u okviru ovog završnog rada naglasak na onečišćenju zraka. Činjenica da se svake godine svjetska trgovačka flota brodova povećava navodi na zaključak da su brodovi veliki onečišćivači okoliša.

Plinovi koje brodovi ispuštaju u okoliš mogu se podijeliti u dvije kategorije: staklenički plinovi kao što su ugljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4) i didušikov oksid (N_2O) te štetni plinovi poput sumporovih oksida (SO_x) i dušikovih oksida (NO_x) [2]. Staklenički plinovi uzrokuju klimatske promjene, tj. globalno zatopljenje, dok ostali štetni plinovi narušavaju kvalitetu zraka i neizravno utječu na zagrijavanje zraka i stvaranje troposferskog ozona u pojedinim područjima te nastajanje kiselih kiša.

Prema Trećoj studiji Međunarodne pomorske organizacije (eng. *International Maritime Organization*, IMO) o stakleničkim plinovima iz 2012. godine emisija CO_2 koju su izazvali svi brodovi na svijetu iznosi 2,6 % od ukupne svjetske emisije CO_2 , dok postotak ekvivalentnog ugljikovog dioksida $\text{CO}_2\text{-eq}$ u koji se računavaju staklenički plinovi CO_2 , CH_4 i N_2O iznosi 2,5 % od ukupne svjetske emisije $\text{CO}_2\text{-eq}$. Tablica 1 detaljnije prikazuje količinu emisija. Ovisno o budućem ekenomskom i energetsom razvoju brodska emisija CO_2 bi do 2050. godine mogla porasti od 50 % do 250 % [3]. Globalna emisija NO_x svih brodova prema Petom izvješću o procjeni Međuvladine komisije za klimatske promjene (eng. *IPCC Fifth Assessment Report* (AR5)) iznosi 15 %, a zastupljenost globalne emisije SO_x svih brodova iznosi 13 % sveukupne svjetske antropogene emisije NO_x odnosno SO_x [3].

Međunarodna pomorska organizacija je 1997. prvo usvojila Prilog VI Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (MARPOL Annex VI) koji ograničava onečišćivače zraka u brodskim ispušnim plinovima, kao što su dušikovi i sumporovi oksidi. Nakon što je ta uredba stupila na snagu 2005. godine Odbor za zaštitu pomorskog okoliša (eng. *Marine Environment Protection Committee*, MEPC) je odlučio strože ograničiti emisije zbog tehnološkog napretka i implementacije dotadašnjeg iskustva. Revidirani MARPOL Annex VI je stupio na snagu 1.7.2010. te je donio strože progresivne mjere smanjenja emisija NO_x , SO_x i lebdećih čestica, i uvođenje područja kontrole emisija (eng. *Emission Control Areas*, ECAs) radi smanjenja emisija u određenim plovidbenim područjima. Sve ove mjere su uvedene kako

bi došlo do poboljšanja kvalitete zraka i smanjenja utjecaja pomorskog prometa na ljudsko zdravlje, pogotovo na ljude koji žive u lučkim gradovima i priobalnom području [4], te kako bi se povećala energetska učinkovitost brodova.

Tablica 1. Brodska emisija CO₂ u usporedbi sa svjetskom emisijom CO₂ [3]

Godina	Svjetska emisija CO ₂ -eq [$10^6 \cdot t$]	Sveukupna brodska emisija [$10^6 \cdot t$]	Postotak od ukupnih emisija na globalnoj razini
2007	34881	1121	3,2%
2008	35667	1157	3,2%
2009	35519	998	2,8%
2010	37085	935	2,5%
2011	38196	1,045	2,7%
2012	39113	961	2,5%
prosjek	36745	1036	2,8%

Hrvatska obala ima puno naseljenih otoka, koji zahtijevaju redovne trajektne, brodske i brzobrodske linije. Prema podacima Agencije za obalni linijski pomorski promet [5], u Hrvatskoj tijekom godine prometuje 51 državna linija s obvezom javne usluge, što čini velik broj raznih plovila, a u turističkoj sezoni broj linija se još povećava. Uz redovnu priobalnu plovidbu, neke pomorske luke u Hrvatskoj bilježe i značajni broj međunarodnih dolazaka teretnih brodova tijekom cijele godine kao što je slučaj u lukama Rijeka i Ploče, dok se tijekom ljetnih mjeseci povećava broj velikih kruzera koji najčešće pristaju u luke Dubrovnik, Split i Zadar. Posljednjih nekoliko godina povećao se broj mini kruzera koji tijekom turističke sezone plove na raznim relacijama po Jadranu.

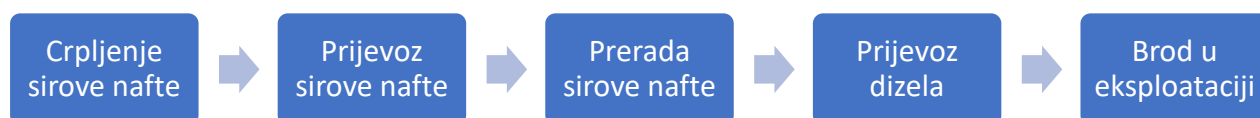
Svi ti brodovi doprinose onečišćenju okoliša, dok brodovi u lukama i priobalnoj plovidbi posebno negativno utječu na ljudsko zdravlje s obzirom da takvi brodovi provode puno vremena u blizini naseljenih područja.

Sve navedeno navodi na daljnja promišljanja o mogućnostima i svim segmentima zaštite okoliša kako bi imali što kvalitetniji i zdraviji život. Naposljetku, Hrvatska je turistička zemlja, čiji se turizam zasniva najviše na čistoj, netaknutoj prirodi pa i iz tog aspekta treba težiti smanjenju onečišćenja okoliša.

U ovom završnom radu cilj je odrediti ugljični otisak trajekta koji plovi na relaciji Orebić (poluotok Pelješac) - Dominče (otok Korčula), te analizirati mogućnosti smanjenja emisija CO₂. Ugljični otisak trajekta je ukupna emisija stakleničkih plinova nastala tijekom životnog ciklusa nekog proizvoda, njegovom aktivnošću ili vezanom za taj proizvod. Između ostalog, otok Korčula je jedan od 26 otoka Europske unije kojima će Europska komisija pomagati pri izradi plana energetske tranzicije i prelaska na obnovljive izvore energije [6], pa je i iz tog pogleda zanimljivo provesti analizu ugljičnog otiska trajekta, vjerojatno jednog od najvećih „proizvođača“ CO₂ na tom području.

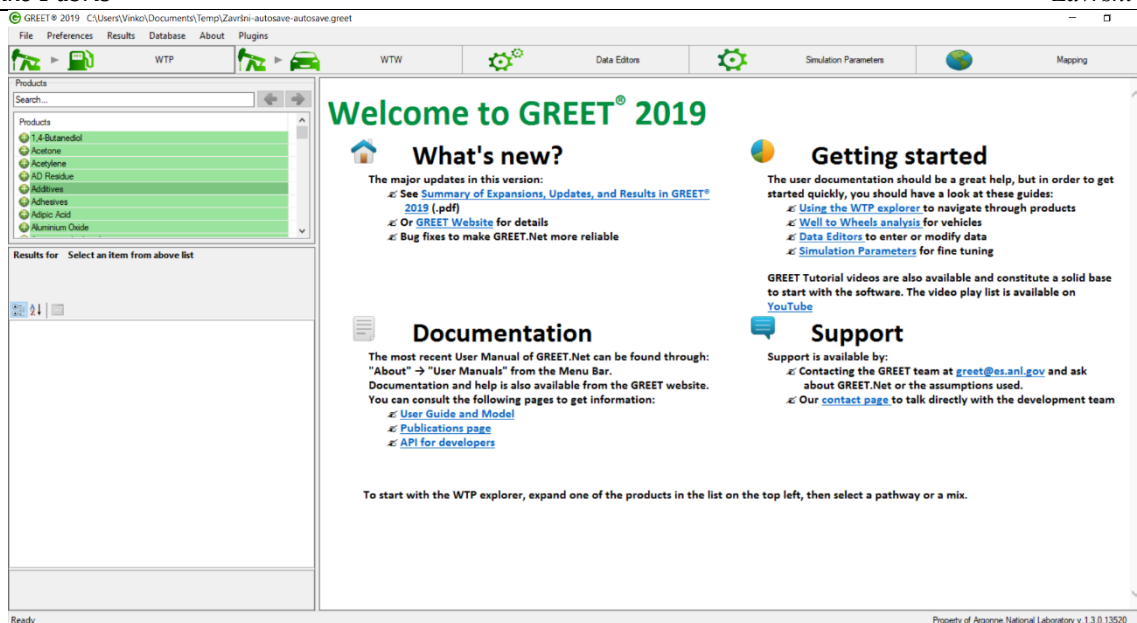
2. PRORAČUNSKA METODOLOGIJA I KORIŠTENA PROGRAMSKA PODRŠKA

Cilj ovog rada je izračun ugljičnog otiska trajekta Sveti Krševan u razdoblju od 30 godina odnosno u cijelom životnom vijeku broda. Ugljični otisak je ukupna količina CO₂ koja je nastala tijekom životnog ciklusa nekog proizvoda, bilo kakvom aktivnošću tog proizvoda ili vezanom za taj proizvod. Slika 1 prikazuje životni ciklus brodske energetske konfiguracije s dizelskim motorom. U ovom slučaju to je dizel gorivo koje je pogonsko gorivo trajekta Sveti Krševan. Proračun ugljičnog otiska obuhvaća sve ispuštene stakleničke plinove koji nastaju na naftnom crpilištu preko transporta sirovine i prerade do transporta prerađevine te samog broda u eksploataciji.



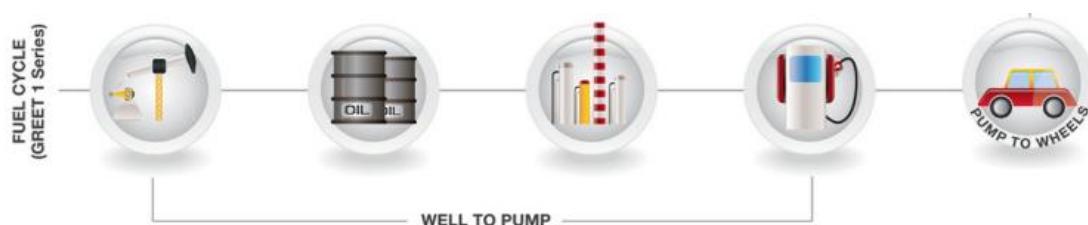
Slika 1. Životni ciklus brodske energetske konfiguracije s dizelskim motorom [7]

U provedbi proračuna je korišten programski paket GREET 2019. Programska podrška GREET 2019 primarno je napravljena za automobilsku industriju, međutim moguće ju je koristiti i za potrebe nekih drugih proizvoda. Ona omogućuje praćenje emisije svih ispušnih plinova pa tako i CO₂, koji nas u ovom konkretnom zadatku najviše zanima, tijekom svih procesa životnog ciklusa proizvoda. U samom sučelju programske podrške, kojeg prikazuje Slika 2, emisija svih procesa u životnom ciklusu proizvoda su podijeljene u dvije cjeline.



Slika 2. Sučelje programske podrške GREET 2019

Prvi dio čini faza od crpilišta do pumpne stanice odnosno Well-to-Pump (WTP) faza koja obuhvaća sve procese od eksploatacije naftnih polja do dolaska goriva na pumpnu stanicu. U tu fazu spada eksploatacija te prijevoz sirove nafte od naftnih polja do rafinerije, zatim prerada sirove nafte u rafineriji te na kraju i prijevoz prerađevine do željene pumpne stanice odnosno potrošača. Drugi dio je faza od crpilišta do kotača ili u ovom slučaju propulzora odnosno Well-to-Wheel (WTW) fazu koju prikazuje Slika 3, a koja obuhvaća sve procese u životnom ciklusu proizvoda, odnosno WTP fazi se pridodaje još faza od pumpne stanice do kotača (propulzora), Pump-to-Wheel (PTW) faza. Dakle, WTW faza je zbroj Well-to-Pump (WTP) faze i Pump-to-Wheel (PTW) faze.



Slika 3. Ilustracija svih faza procesa (Well-to-Wheel) [8]

Za WTP fazu je potrebno definirati koju vrstu goriva želimo i način njegova nastanka, te također sve načine transporta koji su se koristili od njegova nastanka do dolaska do pumpne stanice. Ukratko, potrebno je definirati put od eksploatacije naftnih polja do pumpne stanice

koji se promatra. Programska podrška u svojoj bazi podataka nudi dosta podataka koji se mogu iskoristiti prilikom definiranja dolaska goriva do potrošača, a također moguće je i samostalno konfiguriranje nekih podataka kao npr. vrstu goriva, procese transporta itd. Kada se željeni način transporta i procesi proizvodnje definiraju, moguće je utvrđivanje količine određene emisije za pojedini segment procesa.

Za definiranje PTW faze potrebno je odabrati vrstu potrošača. S obzirom da je ova programska podrška primarno napravljena za autoindustriju, u ovom slučaju je potrebno konfigurirati željeni trajekt. Prilikom konfiguracije može se definirati vrsta pogonskog stroja, potrošnja goriva, emisija plinova itd.

3. TEHNIČKI OPIS TRAJEKTA „SVETI KRŠEVAN“

Prema podacima iz Tablica 2. Detalji o brodu, odabrani brod je Ro-Ro putnički brod Sveti Krševan koji je u vlasništvu tvrtke Jadrolinija iz Rijeke. Duljina trajekta je 87,6 m, a širina 17,5 m prema podacima iz Tablica 3. Kapacitet osobnih vozila je 100, dok može primiti 600 putnika [9]. U nastavku su navedeni osnovni podaci o brodu. S obzirom na osnovni problem prema kojem je ovaj završni zadatak usmjeren, posebno su potrebni podaci o brodskom energetsom sustavu iz Tablica 4. Na Slika 4 je prikazan trajekt Sveti Krševan u plovidbi.



Slika 4. Trajekt Sveti Krševan u plovidbi [10]

3.1. Tehnički podaci

U Tablica 2 prikazani su osnovni podaci o gradnji broda te njegove općenite karakteristike.

Tablica 2. Detalji o brodu [11]

Ime broda	Sveti Krševan
IMO broj	9326562
Vrsta broda	Ro-Ro putnički
Datum gradnje	2.7.2004.
Mjesto gradnje	Brodogradilište Kraljevica
Područje plovidbe	6 – Nacionalna obalna plovidba
Vrsta poriva	Motor s unutarnjim izgaranjem
Materijal gradnje trupa	Čelik

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

Tablica 3. Osnovni tehnički podaci [11]

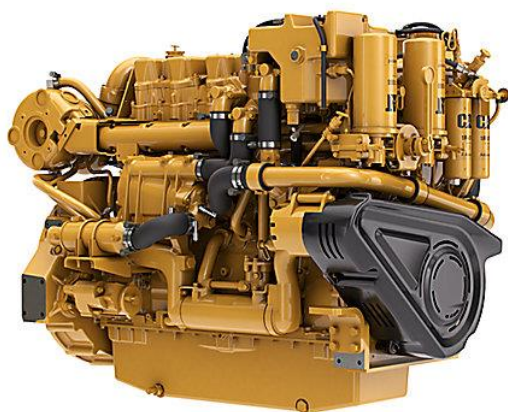
Duljina između okomica, L_{pp} (m)	80
Duljina preko svega, L_{oa} (m)	87,6
Širina (m)	17,5
Gaz (m)	2,4
Bruto tonaža, GT	2474
Neto tonaža, NT	781
Brzina (čv)	12

3.2. Podaci o energetsom postrojenju

Tablica 4. Podaci o energetsom postrojenju [11]

Vrsta i broj porivnih strojeva	Dizel četverotaktni, jednoradni, 4
Proizvođač stroja	Catepillar Inc.
Ukupna snaga (kW)	1790
Broj, ukupna snaga generatora (kW)	3, 444
Broj i vrsta vijaka	4, sa zakretnim krilima

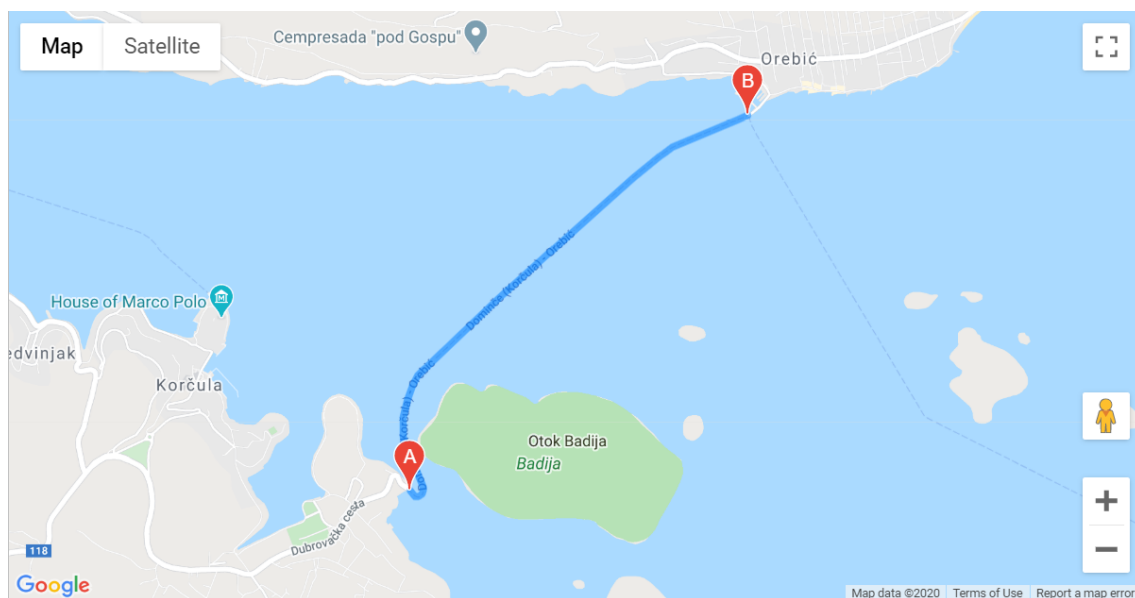
Prema dostupnim podacima iz Hrvatskog registra brodova [11], potrebe za snagom promatranog trajekta iznose 1790 kW za porivne potrebe i 444 kW za generatore odnosno pomoćne potrebe. Zbroj ta dva iznosa daje ukupnu potrebu za snagom koja iznosi 2234 kW. U eksploataciji se koriste sva 4 dizelska porivna stroja marke Caterpillar kao sa Slika 5 jer brod posjeduje azimutni propulzijski sustav pa prilikom pristajanja koristi mogućnost zakretanja pramčanih vijaka radi lakšeg manevriranja, dok se dva generatora koriste naizmjenično, a treći služi kao generator za hitne slučajeve (emergency generator).



Slika 5. Dizelski porivni stroj marke Caterpillar [12]

4. ANALIZA OPERATIVNOG PROFILA BRODA

Prema redu plovidbe [13], trajekt na liniji Orebić (Pelješac) - Dominče (Korčula) tijekom godine plovi 14 puta dnevno, odnosno 28 ako računamo da je jedna plovidba prijedeni put između kretanja i pristajanja broda, dok u ljetnim mjesecima (četiri mjeseca u godini) plovi 18, odnosno 36 puta dnevno.



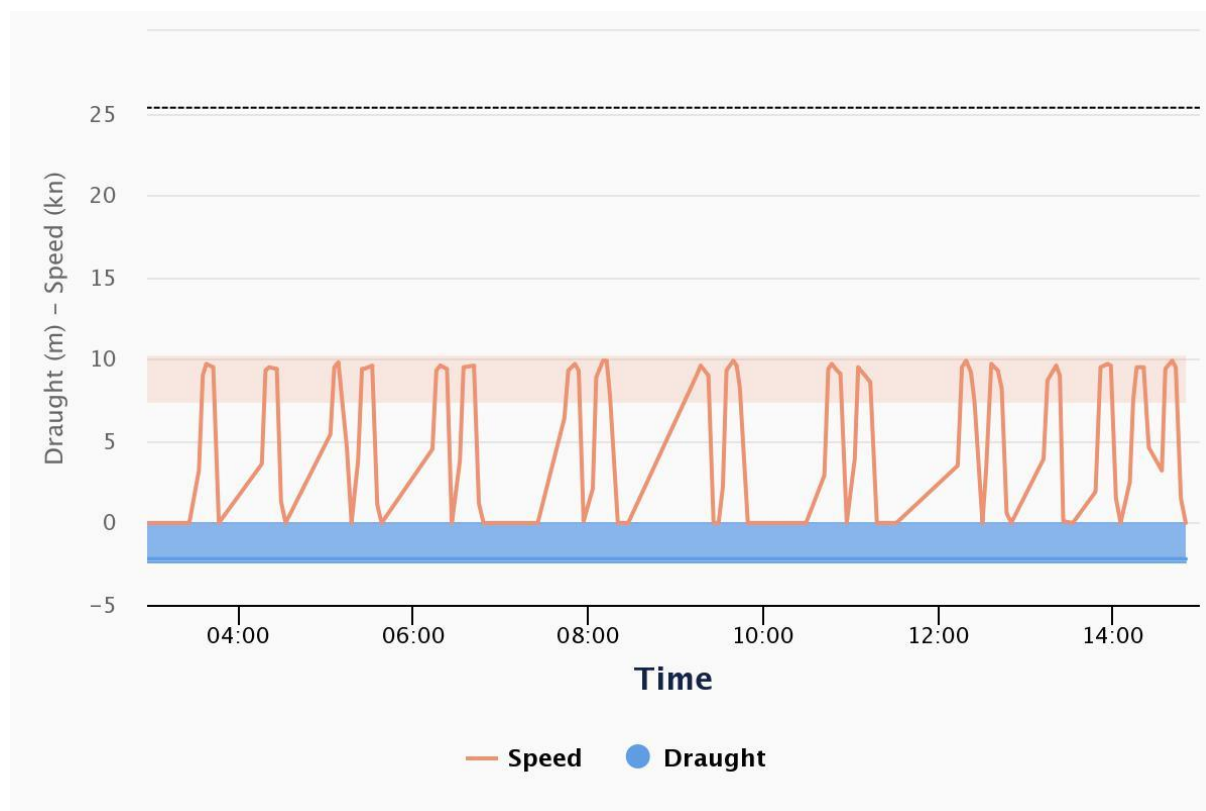
Slika 6. Simbolički prikaz rute plovidbe trajekta na relaciji Orebić (Pelješac) – Dominče (Korčula) [14]

Prosječno vrijeme plovidbe t je 15 minuta odnosno 0,25 h [13] i ne zavisi o dobu godine, a duljina rute s , koja je prikazana na Slika 6, između Dominča i Orebića je 4 km ili preračunato u nautičke milje 2,16 nmi (1 nmi=1,852 km). Kada se podijele te dvije vrijednosti (1) dobije se prosječna brzina v_1 od 16 km/h, što u čvorovima iznosi 8,64 čv. Iznos prosječne brzine v potvrđuju i podaci prikazani na Slika 7 s web stranice Marine Traffic koji su zasnovani na praćenju brodova preko automatskog identifikacijskog sustava (AIS). Prema tim podacima prosječna brzina v_{AIS} je nešto niža i iznosi 7,34 čv [15] odnosno 13,59 km/h, međutim u prethodnom proračunu nije uzeto u obzir da puno veći dio rute (3,6 km koji prijeđe za 12 min) trajekt plovi eksploatacijskom brzinom od oko 10 čv, nego malom brzinom prilikom manevriranja (0,4 km prijeđe za 3 min) pri kretanju i pristajanju.

Uzme li se u obzir prethodno navedene činjenice jednostavnim računom može se pokazati da će se izračunana prosječna brzina približno podudarati s prosječnom brzinom prema AIS-u. Prema takvom proračunu, prosječna brzina v_2 prilikom manevriranja iznosi 4,32 čv, dok

prosječna brzina v_3 prilikom plovidbe između dviju luka iznosi 9,72 čv. Prosječna vrijednost tih dviju brzina v_{23} približno se podudara s prosječnom brzinom prema AIS-u i iznosi 13 km/h ili 7,02 čv.

Prilikom proračuna u programskoj podršci GREET 2019, koristit će se prosječna brzina v koja označava prosječnu brzinu dviju izračunanih i jedne preuzete s web stranice Marine Traffic. Ta brzina v iznosi 14,2 km/h ili 7,67 čv (1).



Slika 7. Grafički prikaz brzine trajekta u čvorovima [15]

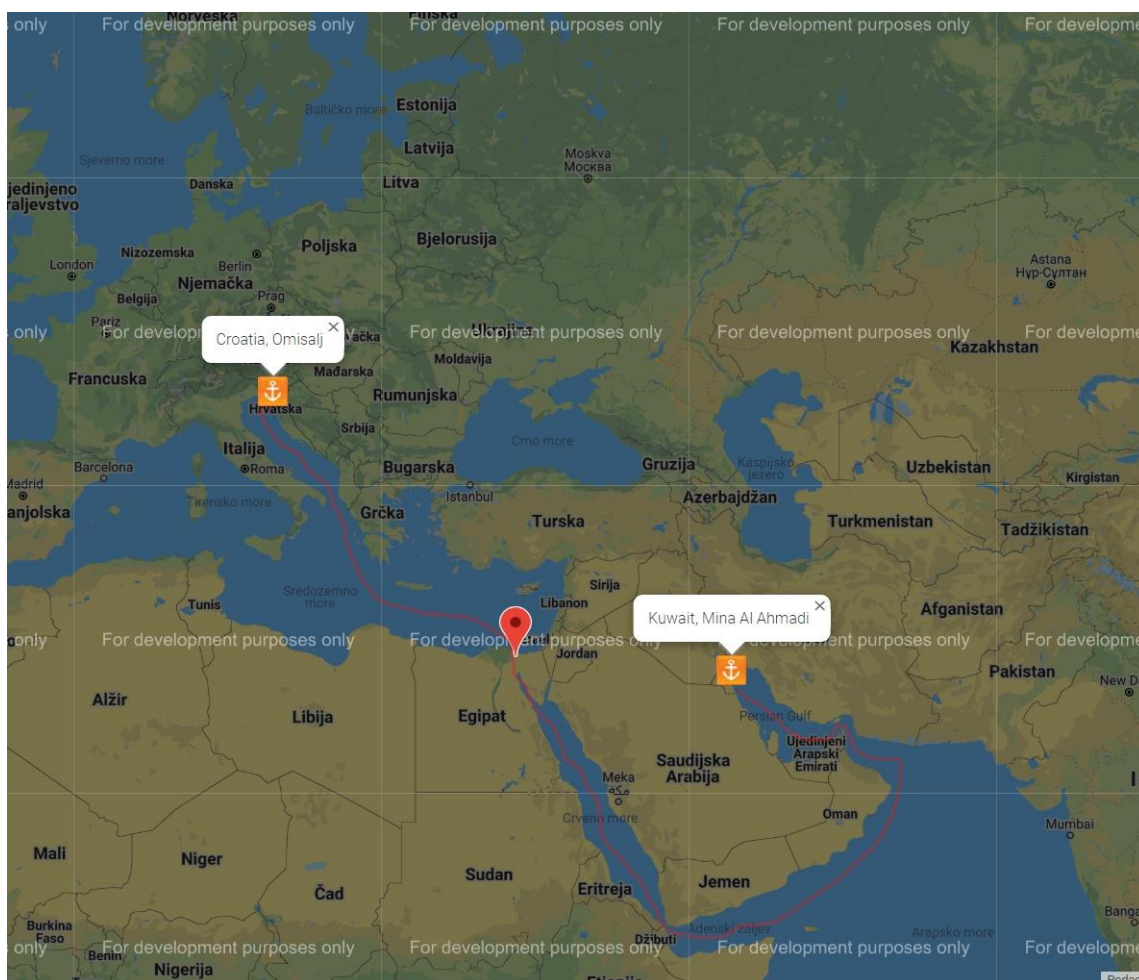
$$v = \frac{v_1 + v_{AIS} + v_{23}}{3} = \frac{16 + 13,59 + 13}{3} = 14,2 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 7,67 \text{ čv} \quad (1)$$

5. PRORAČUN UGLJIČNOG OTISKA TRAJEKTA

5.1. WTP faza

5.1.1. Analiza životnog ciklusa WTP faze

Životni ciklus goriva započinje eksploatacijom sirove nafte. Za potrebe ovog završnog rada pretpostavlja se da se sirova nafta crpi na Bliskom Istoku, u Kuvajtu. Nakon toga se tankerom za sirovu naftu prevozi do Hrvatske, u luku Omišalj na otoku Krku, a na Slika 8 možemo vidjeti rutu plovidbe tankera za sirovu naftu.



Slika 8. Ruta plovidbe tankera sa sirovom naftom iz Kuvajta u Hrvatsku [16]

Nafta se na Krku iskrcava, a potom se odatle naftovodom dugim 7,2 km [17] transportira u rafineriju nafte u Rijeci. Cijeli taj proces je simbolički prikazan na Slika 9. U rafineriji se sirova nafta prerađuje u naftne derivate, od kojih se za trajekt koristi dizelsko gorivo.



Slika 9. Prikaz transporta sirove nafte od Kuvajta do rafinerije Rijeka u programskoj podršci GREET 2019

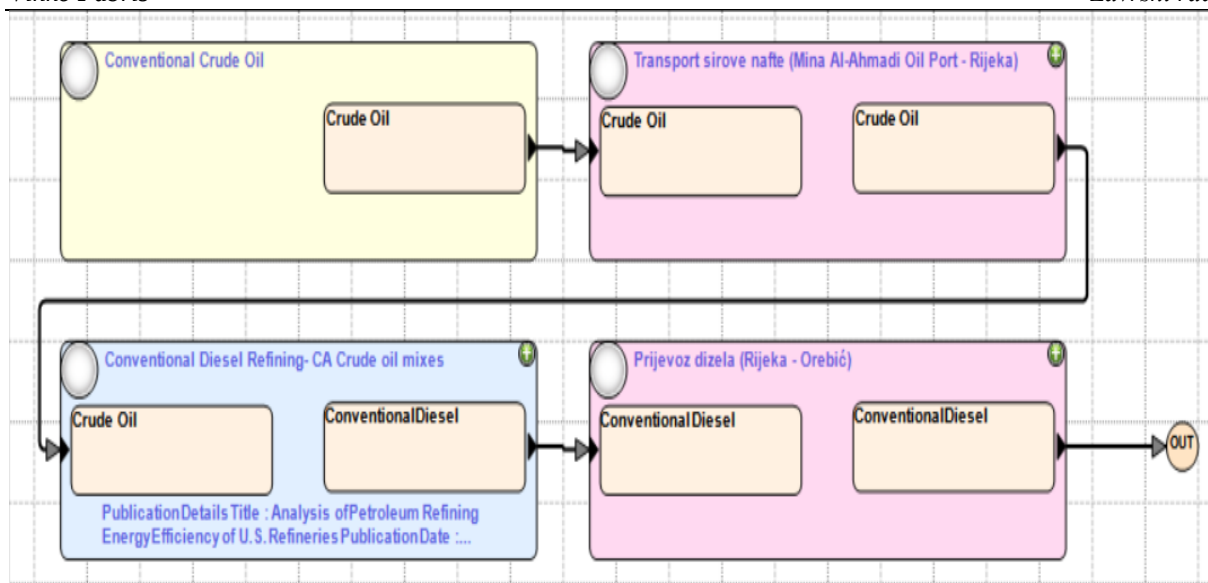
Kad se dizelsko gorivo dobije preradom u rafineriji, ono se cisternom prevozi do Orebića na poluotoku Pelješcu koji je udaljen od rafinerije u Rijeci 616 km. Potom se cisterna prevozi s trajektom na Korčulu gdje se vrši iskrcaj goriva u brod. Na Slika 10 je simbolički prikaz prijevoza od rafinerije Rijeka do trajekta.



Slika 10. Prikaz transporta dizel goriva od rafinerije Rijeka do trajekta u programskoj podršci GREET 2019

5.1.2. Proračun ugljičnog otiska WTP faze

U simulaciji WTP faze u programskoj podršci GREET 2019 koristili su se neki procesi koji postoje u samoj programskoj podršci (crpljenje sirove nafte na crpilištu i njeno skladištenje (Conventional Crude Oil) te prerada sirove nafte u dizel (Conventional Diesel Refining-CA Crude oil mixes)) dok je za neke bila potrebna samostalna konfiguracija (transportne procese). Slika 11 prikazuje simulaciju WTP faze u programskoj podršci, a rezultati proračuna WTP faze prikazani su u Tablica 5.



Slika 11. Prikaz simulacije WTP faze u programskoj podršci GREET 2019

Tablica 5. Emisija stakleničkih plinova u WTP fazi (g/nmi)

Rezultati WTP faza (g/nmi)	
CO ₂	7277,1
CH ₄	47,2
N ₂ O	0,138

5.2. PTW faza

5.2.1. Analiza životnog ciklusa PTW faze

Kako bi se u potpunosti definirao cjelokupni životni ciklus broda, potrebno je još konfigurirati PTW fazu. U PTW fazu se ubrajaju svi ispušteni plinovi prilikom eksploatacije broda, odnosno plinovi koji nastaju uslijed izgaranja dizela u pogonskim i pomoćnim strojevima.

5.2.2. Proračun ugljičnog otiska PTW faze

Prema podacima iz Tablica 4. Podaci o energetsom postrojenju Tablica 4 maksimalna trajna snaga P_{MCR} koja se može koristiti za poriv iznosi 1790 kW (*eng. Maximum Continuous Rating, MCR*), dok maksimalna snaga pomoćnih strojeva koji se koriste u eksploataciji iznosi 296 kW. Za proračun prosječne snage pogonskih strojeva koristi se formula (2) [7], u koju se uvrštava snag od 80 % MCR što je 1432 kW, u jednadžbi (1) izračunanu prosječnu brzinu i brzinu koju trajekt postiže prilikom vožnje snagom od 80 % MCR što je 9,6 čv. Prema tome, prosječna snaga pogonskih strojeva iznosi 730,3 kW.

$$P_{\text{pros}} = P_{80\% \text{MCR}} \cdot \left(\frac{v}{v_{80\% \text{MCR}}} \right)^3 \quad (2)$$

Generator radi u prosjeku na oko 70 % svoje maksimalne snage i njegova efikasnost je 95 % što nam daje iznos od 109,1 kW. Zbroj prosječne snage pogonskih i snage pomoćnog stroja dobije se ukupan iznos potrebne snage broda u eksploataciji od 839,4 kW koja se dalje koristi u konfiguraciji trajekta u programskoj podršci, što prikazuje Slika 12.

The screenshot shows the GREET 2019 software interface for configuring a vehicle powerplant. The interface includes a 'Vehicle Powerplant' section with the following details:

- Mode:** 47656987-0d69-476a-bd66-07e2a618d4b1
- VMT share:** 100 %
- Calculate** button
- Plant Name:** Internal Combustion Engine
- Base Plant:** Car: SI ICEV - E10 (Type 1 Conventional Material)=> Regular
- Energy sources:**
 - Conventional Diesel
 - ☒ Consumption ☐ MPG-Gasoline ☐ MPG-Diesel
 - 59.10 kWh/km
 - Charging or Refueling efficiency: 100 %
 - Energy source (upstream pathway or mix): Pathway: WTP-Završni_Vinko
- Tailpipe emissions:**
 - CO2: 39.91 kg/km
 - CH4: 2.29 g/km
 - N2O: 16.52 g/km

Slika 12. Konfiguracija trajekta u programskoj podršci GREET 2019

Dijeljenjem ukupne potrebne snage broda u eksploataciji 839,4 kW i prosječne brzine trajekta koja iznosi 14,2 km/h (1) izračunava se potrošnja energije (*eng. Energy Consumption, EC*), odnosno potreba za energijom koja iznosi 59,1 kWh/km. Množenjem *EC* i specifične potrošnje goriva (*eng. Specific Fuel Oil Consumption, SFOC*) koja iznosi 215 g/kWh izračunava se potrošnja goriva (*eng. Fuel Consumption, FC*) koja je 12,71 kg/km ili preračunato 23,53 kg/nmi, koja je potrebna za proračun emisije (*eng. Tailpipe Emission, TE*) stakleničkih plinova. Emisija stakleničkih plinova u PTW fazi se dobije množenjem potrošnje goriva *FC* s emisijskim faktorom (*eng. Emission factor, EF*) koji je različit za svaki plin [18]. Iznosi pojedinih emisijskih faktora i rezultati PTW su dani u Tablica 6 [18].

Tablica 6. Emisijski faktori za pojedine plinove i emisija stakleničkih plinova u PTW fazi

Staklenički plin	Emisijski faktori (g emisija/kg goriva)	Rezultati PTW faze (g/nmi)
CO ₂	3140	73905,6
CH ₄	0,18	4,2
N ₂ O	1,3	30,6

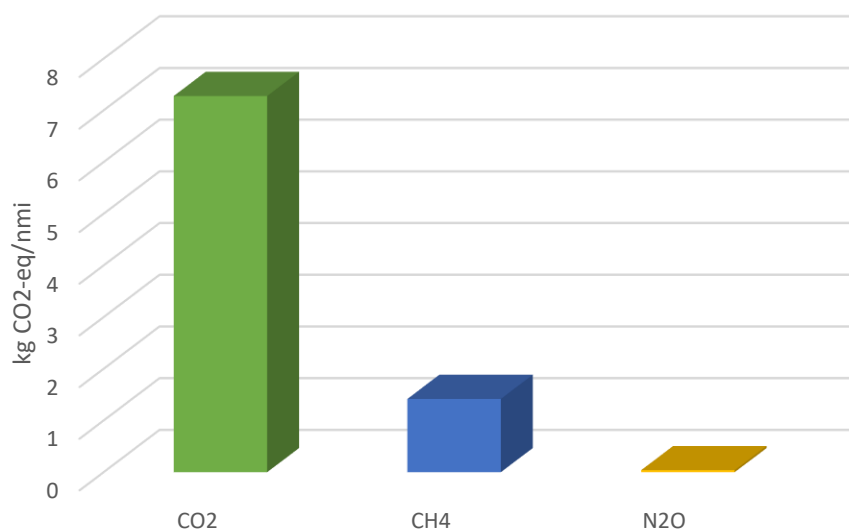
5.3. Sveukupni ugljični otisak - WTW faza

Kako bi se utjecaj svih stakleničkih plinova mogao međusobno uspoređivati uveden je pojam Potencijala globalnog zagrijavanja (*eng. Global Warming Potential, GWP*). On određuje koliko energije apsorbira jedna tona stakleničkog plina u određenom vremenu u usporedbi s ugljikovim dioksidom. Najčešće je to period od 100 godina. Viši GWP određenog plina znači da taj plin u usporedbi s CO₂ više zagrijava Zemlju u određenom periodu [19]. Množenjem GWP-a, koji je prikazan u Tablica 7, s rezultatima dobivenim za WTP iz Tablica 5 i PTW fazu iz Tablica 6 dobiju se iznosi ugljičnog otiska koji se mogu međusobno zbrajati i uspoređivati jer su izraženi u mjernim jedinicama ekvivalentnog ugljikovog dioksida (CO₂-eq). Takvi rezultati izraženi u CO₂-eq su prikazani u Tablica 7. Ukupni ugljični otisak iznosi 91,33 kg CO₂-eq/nmi.

Tablica 7. Sveukupni ugljični otisak trajekta Sveti Krševan (kg CO₂-eq/nmi)

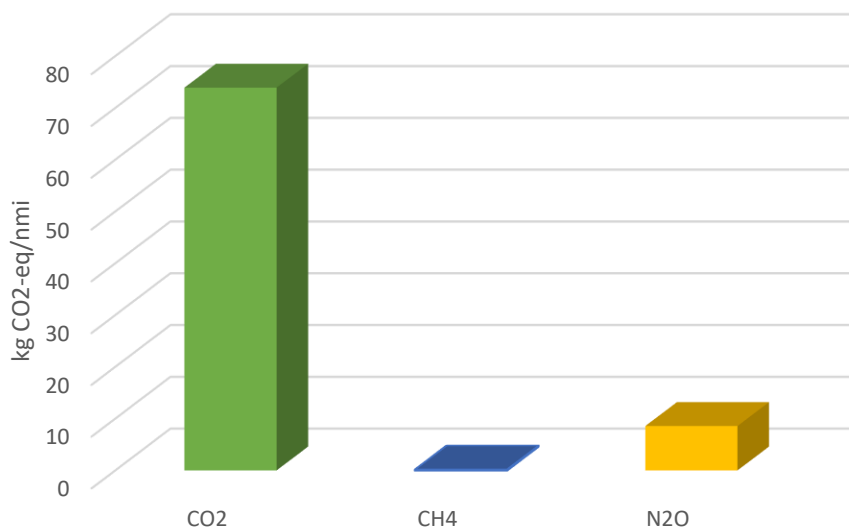
Staklenički plin	GWP	WTP	PTW	WTW
CO ₂	1	7,28	73,91	152,86
CH ₄	30	1,42	0,127	2,906
N ₂ O	280	0,039	8,57	16,2
Ukupno		8,73	82,6	91,33

Na Sliku 13 su dijagramski prikazani rezultati ugljičnog otiska WTP faze.



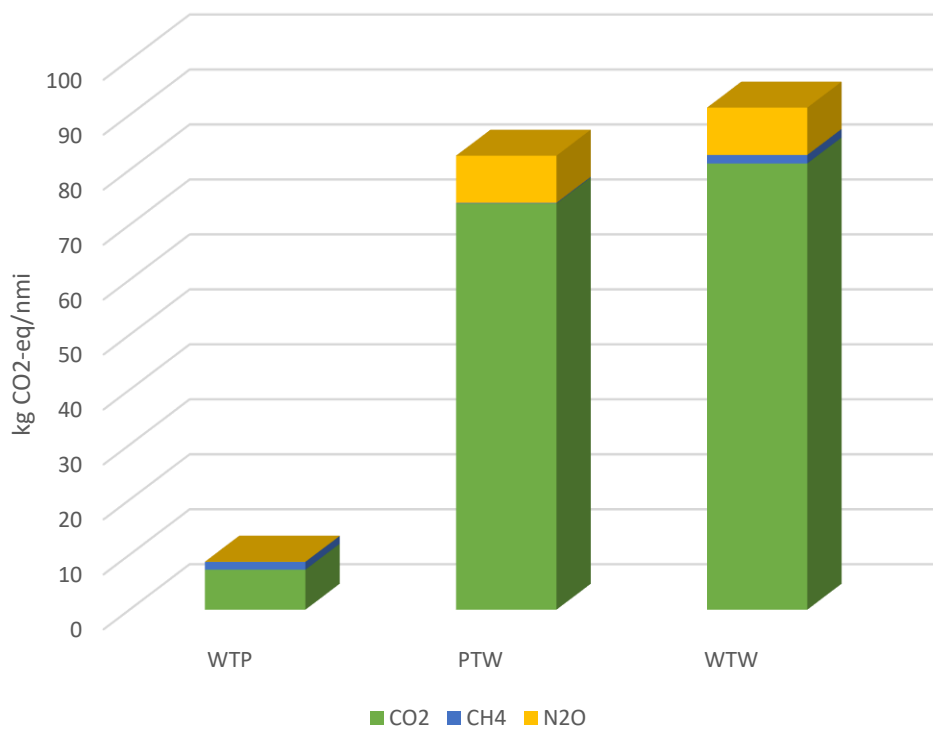
Slika 13. Dijagramski prikaz rezultata WTP faze

Slika 14 dijagramski prikazuje rezultate PTW faze.



Slika 14. Dijagramski prikaz rezultata PTW faze

Dok je na Slika 15 prikazano koliko svaki plin pridonosi ugljičnom otisku u kojoj fazi te zbroj WTP i PTW faze u konačnu sveukupnu WTW fazu.



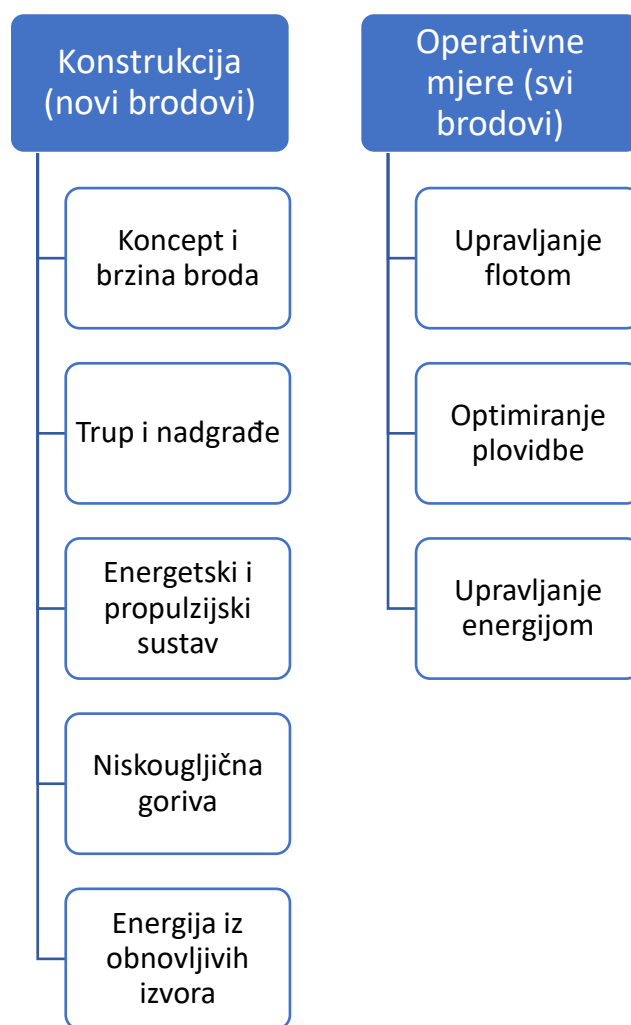
Slika 15. Dijagramski prikaz ugljičnog otiska u svakoj fazi pojedinačno

5.4. Proračun cjeloživotnih emisija CO₂ trajekta

Trajekt prometuje svaki dan u godini. Prema zimskom voznom redu 243 dana, a prema ljetnom 122 dana. Ruta plovidbe u jednom smjeru iznosi 4 km ili 2,16 nmi. Prema zimskom voznom redu ima 28 plovidbi u jednom smjeru dnevno, dok prema ljetnom ima 36. Množenjem broja dana u godini, dnevnih putovanja i duljine rute plovidbe izračunava se koliko nautičkih milja prijeđe trajekt u jednoj godini, a to je iznos od 24183,36 nmi. Za 30 godina broj prijeđenih nautičkih milja će biti 725500,8. Dakle, godišnji ugljični otisak iznosi 2208,67 t CO₂-eq, dok cjeloživotni ugljični otisak iznosi 66259,99 t CO₂-eq.

6. ANALIZA MOGUĆNOSTI SMANJENJA EMISIJA CO₂

Proračunom ugljičnog otiska za postojeće energetske postrojenje dolazi se do zaključka da najveći dio ugljičnog otiska proizveden u PTW fazi. S obzirom na tu činjenicu, analiza će se koncentrirati na promjene u PTW fazi. Na Sliku 16 su prikazane mjere za potencijalno smanjenje emisije CO₂ koje se mogu podijeliti na tehničke i mjere temeljene na konstrukciji, koje se odnose na brodove u izgradnji, odnosno nove brodove te operativne i komercijalne mjere koje su primjenjive na sve brodove [20].



Slika 16. Mjere za potencijalno smanjenje emisija CO₂ [20]

Iako se razmatra smanjenje ugljičnog otiska već postojećeg broda neke konstrukcijske preinake su izvedive. Proračun ugljičnog otiska trajekta s postojećim energetske sustavom služi kako bi se omogućila usporedba sadašnjeg ugljičnog otiska s ugljičnim otiskom broda pogonjenog s nekim drugim alternativnim gorivom ili nekim drugačijim energetske sustavom.

Neka alternativna goriva se mogu koristiti u već postojećim dizelskim strojevima s određenim preinakama, dok se za neka treba ugraditi potpuno novo energetska postrojenje. Također, jedna od opcija može biti i polovično rješenje, odnosno da se dio energije dobije preko već postojećeg energetskeg sustava, a dio putem nekog novog.

Za dizel gorivo koje se trenutno koristi emisija CO₂ bi se mogla smanjiti sa smanjenjem potrošnje goriva, odnosno smanjenjem specifične potrošnje goriva, međutim to bi značilo da je potrebno povećati korisnost strojeva kako bi se zadovoljile potrebe trajekta za energijom. Korisnost bi se povećala kada bi se povećala srednja temperatura dovođenja kružnog procesa, a povećanjem srednje temperature dovođenja, povećava se i maksimalna temperatura procesa što uzrokuje povećanu emisiju NO_x spojeva. Ovaj način pripada u sferu konstrukcijskih poboljšanja efikasnosti postojećeg energetskeg stroja.

6.1. Alternativna goriva

Alternativna goriva su goriva ili izvori energije koja su barem djelomično nadomjestak za izvore fosilnih goriva i koji imaju potencijal doprinijeti dekarbonizaciji prometnog sustava [21]. Alternativnim gorivima pripada:

- Električna energija
- Vodik
- Biogorivo
- Sintetička i parafinska goriva
- Prirodni plin (stlačeni-SPP i ukapljeni-UPP)
- Ukapljeni naftni plin (UNP)

Vodik, najčišći izvor energije, može biti proizveden od različitih energetskeg izvora kao što su fosilna goriva, nuklearna energija i različiti obnovljivi izvori energije. Kad se koristi kao gorivo ne proizvodi nikakve dodatne emisije osim vode i topline. Njegova velika prednost je što posjeduje veliku energetska gustoa [22]. Vodik se može dobiti iz prirodnog plina, biomase ili putem elektrolize vode. Međutim problem je u tome što prilikom dobivanja vodika iz prirodnog plina nastaje emisija, a za elektrolizu vode je potrebna električna energija koja mora biti nekako proizvedena pa ako nije iz obnovljivih izvora također nastaju emisije. Kad se proizvede teško se skladišti, što je isto jedan od nedostataka. Nadalje, iz skladišnog spremnika vodik ulazi u gorivne članke u kojima se proizvodi električna energija koja se koristi za poriv broda. Tržište proizvodnje vodika i distribucijska infrastruktura u Hrvatskoj još nisu dovoljno razvijeni, što je također otegotna okolnost [23]. Sve navedene mane za sada eliminiraju vodik

kao gorivo koje bi se koristilo u zamjenu za konvencionalna goriva u Hrvatskoj, što ne znači da se u budućnosti ne može iskoristiti njegov potencijal.

Najčešća biogoriva su bioalkoholi i biodizel. Najpoznatiji bioalkoholi su metanol i etanol. Metanol se može dobiti iz biomase, putem katalitičke pretvorbe sintetiziranjem CO i H₂, iz prirodnog plina i rasplinjavanjem ugljena [24]. Metanol (CH₃OH) ima 38 % ugljika u svom sastavu za razliku od dizela koje ima 87 % što je dobra stvar s gledišta smanjenja emisija CO₂. Metanol se može koristiti uz određene preinake na postojećem dizelskom postrojenju koje su povezane s niskom temperaturom hlapljenja [23]. Metanol ima nizak cetanski broj, stoga čisti metanol nije prikladan za upotrebu u konvencionalnim motorima s kompresijskim paljenjem, međutim može se koristiti zajedno s drugim gorivom koje je više samozapaljivo, npr. dizelom [25]. Nadalje, upotreba metanola na brodu zahtijeva određene preinake na tankovima, cjevovodima i sigurnosnom sustavu [24]. Treba uzeti još u obzir da je metanol otrovan [23] i da sadži duplo manje energije nego ista količina dizela [24]. Visok korozivni potencijal također predstavlja problem kod upotrebe metanola u dizelskim motorima [22].

Biodizel je monoalkilni ester dugolančanih masnih kiselina koje su dobijene od obnovljivih lipidnih izvora kao što su biljna ulja i životinjske masnoće. Za čisti biodizel koji se sastoji od 100 % biodizela uobičajeni naziv je B100. Biodizel pomiješan s konvencionalnim dizelom se uobičajeno označava BXX, gdje XX u oznaci označava postotak biodizela u mješavini, npr. B80 se sastoji od 80 % biodizela i 20 % dizela [26]. Može se koristiti sam ili pomiješan s dizelom u dizelskim motorima. Kalorijska vrijednost biodizela je sličnog veličine kao dizela. Problemi s biodizelom nastaju zbog njegove viskoznosti i gustoće što uzrokuje probleme kod ubrizgavanja goriva. Iz tog je razloga pomiješan s dizelom. Može se postići smanjenje emisije od 78 % ovisno o kvaliteti goriva i omjeru mješavine [22].

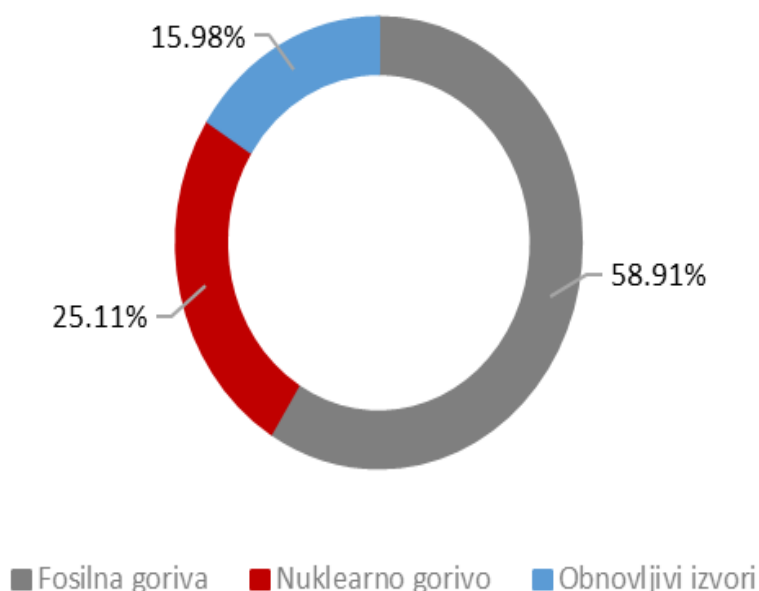
Iako je prirodni plin fosilno gorivo ima manji sadržaj ugljika u svom sastavu u usporedbi s dizelskim gorivom te je to dobra značajka kada promatramo smanjenje ugljičnog otiska. Prirodni plin može biti korišten u obliku ukapljenog prirodnog plina (UPP) ili stlačenog prirodnog plina (SPP). Može se koristiti u stroju s dvostrukim gorivom u kojem je omogućena nesmetana promjena s jednog (dizel) na drugo (prirodni plin) gorivo prilikom brodske vožnje bez gubitka snage ili brzine [23]. Pojednostavljivanjem proračuna, može se procijeniti smanjenje ugljičnog otiska upotrebom ukapljenog prirodnog plina. Prosječna donja ogrjevnost UPP je 12 % viša od donje ogrjevnosti dizela, dok je iskoristivost stroja koji koristi UPP 5 % niža od onoga koji koristi dizel kao gorivo, što rezultira manjom potrošnjom dizela od oko 7 %. S obzirom da UPP u sebi ima manji udio ugljika od dizela, manji mu je i

emisijski faktor za CO₂ što kad se proračuna rezultira s približno 20 % manjom ispušnom emisijom [27].

6.1.1. Električna energija

Električna energija se može dobiti iz različitih izvora. Neke vrste izvora, kao što su dizel agregati nalaze se na brodu, dok također možemo proizvoditi električnu energiju i na kopnu pa je pohranjivati u litij ionsku bateriju na brodu. Na Slika 17 je prikazana raspodjela pojedinih izvora energije iz kojih se dobije električna energija u prodanoj električnoj energiji u Republici Hrvatskoj u 2019. godini [28]. Iz njega se može primjetiti da je oko 16 % prodane električne energije u Hrvatskoj iz obnovljivih izvora energije.

Korčula je vrlo prikladan otok za primjenu obnovljivih izvora energije, posebice putem energije sunca i vjetra. Godišnje dobija preko 1500 kWh/m² horizontalnog sunčevog zračenja i ima 2671 sunčanih sati što je najviše u jadranskoj regiji. Južni dijelovi otoka imaju veliki potencijal za izgradnju vjetroelektrana [29]. Ove činjenice mogu uvelike pomoći pri razmatranju elektrifikacije trajektne linije u svrhu smanjenja ugljičnog otiska jer bi to rezultiralo nultom emisijom CO₂ prilikom proizvodnje električne energije.



Slika 17. Raspodjela pojedinih izvora energije u prodanoj električnoj energiji u Republici Hrvatskoj [28]

Da bi koristili električnu energiju za poriv trajekta, najprije treba napraviti određene preinake na energetsom i porivnom postrojenju. Ovisno koji izvori električne energije bi bili korišteni potrebni su dodatni dijelovi kao npr. pretvarači snage ili elektromotori koji bi u tom slučaju pokretali vijke.

Kad se uspoređuje mehanički, koji je trenutni i električni propulzijski sustav, mehanička propulzija ima slabu iskoristivost goriva i velike emisije kada stroj radi ispod 50 % nazivne snage jer tada potrošnja goriva značajno raste. S druge strane, električna propulzija zbog dodatne pretvorbe snage u pretvaračima snage i elektromotorima ima povećane gubitke [30].

6.1.1.1. Litij-ionska baterija

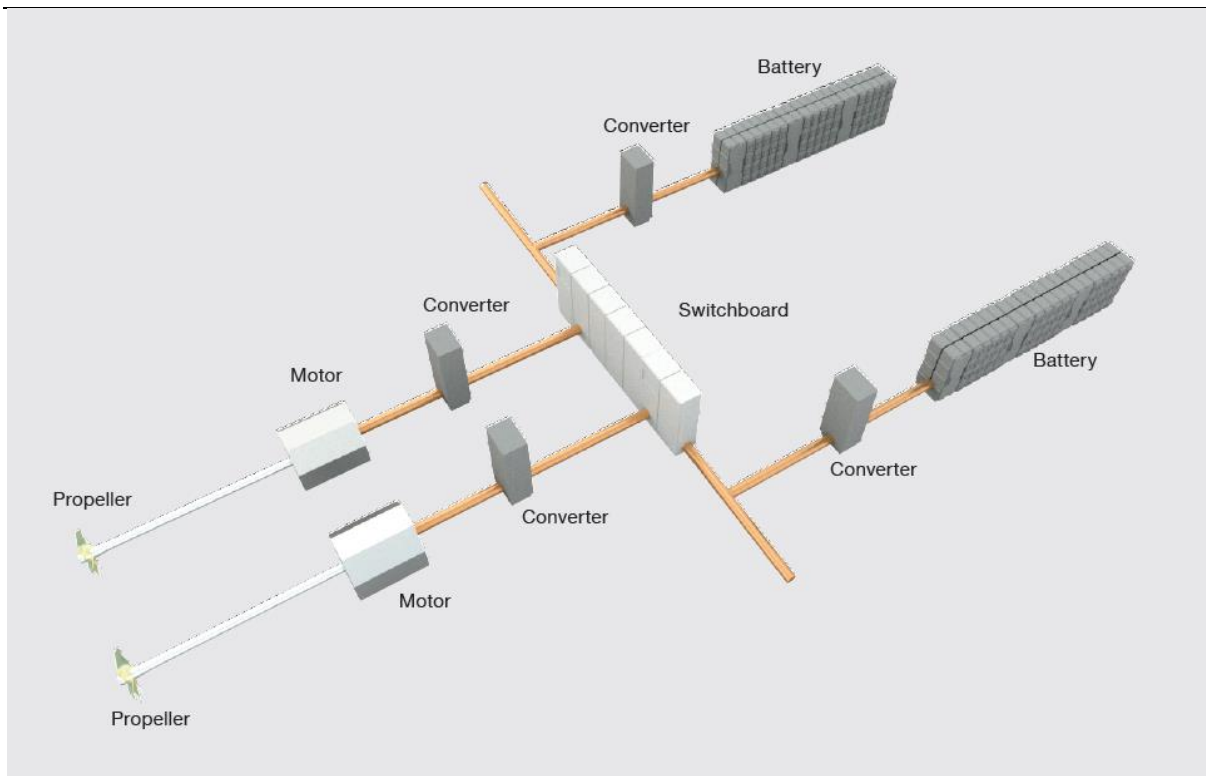
Jedan od načina dobijanja električne energije na brodu je litij ionska baterija. Potpuni energetske sustav trajekta bi se mogao zamijeniti litij ionskim baterijama i tako postići smanjenje emisija CO₂. Smanjenje bi se postiglo jer baterija proizvodi CO₂ samo u WTP fazi, a u PTW fazi ne postoji emisija. Na Slika 18 prikazan je životni ciklus broskog energetskog postrojenja s baterijama kao izvorima električnog napajanja trajekta. U baterijama je pohranjena električna energija koja je nastala iz nekih od prethodno spominjanih izvora, a ako ti izvori nisu obnovljivi izvori, onda prilikom proizvodnje električne energije nastaje emisija CO₂.



Slika 18. Životni ciklus brodske energetske konfiguracije s litij ionskom baterijom [7]

Tijekom procesa proizvodnje baterija također nastane određena količina CO₂ dok brod u eksploataciji ne proizvodi nikakvu emisiju napajajući se iz baterije.

Slika 19 prikazuje broski energetske sustav koji je napajan isključivo litij-ionskim baterijama. Prikazani su dijelovi koji pripadaju tom sustavu, a to su: baterije, pretvarači, razvodna ploča i elektromotori.



Slika 19. Električna propulzija napajana isključivo litij ionskim baterijama [31]

Cijena baterija iz godine u godinu opada, tako da je u posljednjih 10 godina pala za gotovo 90 % i u 2019. godini je iznosila 156 \$/kWh [32]. Ovaj argument iz ekonomske perspektive ide u prilog smanjenju emisija jer se još uvijek u prvi plan stavlja ekonomska isplativost, a ne ekološka održivost.

Postojeće energetske potrebe koje su izračunate u poglavlju 5.2.2. iznose 59,1 kWh/km. S obzirom da gubici sustava električne propulzije iznose oko 10 % treba povećati izvor energije. Nadoknadom tih gubitaka dolazi se do energetske potrebe od 65,67 kWh/km. Ruta vožnje duga je 4 km, što znači da je u oba smjera 8 km. Kapacitet baterije za svladavanje te rute uz sadašnje energetske potrebe treba biti otprilike 525,4 kWh. Zbog sigurnosti taj broj ćemo utrostručiti što onda iznosi 1575 kWh. Znajući da litij-ionske baterije imaju jednu od najvećih energetskih gustoća koja iznosi 0,25 kWh/kg [33] jednostavno se izračuna koliko bi iznosila masa baterije. Masa baterije iznosila bi oko 6,3 tone.

Gledajući iz perspektive smanjenja emisije ugljikovog dioksida, opcija da cijeli brod bude napajan baterijom je vrlo povoljna i ovisno o načinu proizvodnje električne energije na kopnu skoro cijeli životni ciklus ovakve energetske konfiguracije može biti potpuno slobodan od bilo kakvih štetnih emisija. Ako se uzme u obzir i ekonomske aspekte, treba dodatno osim ugradnje baterija, uložiti u infrastrukturu na kopnu u koju spadaju punjači za bateriju koji bi se

trebali nalaziti i u Orebiću i na Korčuli kako bi se baterija mogla nadopunjavati dok je trajekt privezan i dok se prazni i puni automobilima. Tijekom noći bi se baterija mogla potpuno napuniti kada je rjeđi red plovidbe i kada je električna energija jeftinija [34]. Također treba uzeti u obzir i da se mijenjanjem energetskog sustava mijenja i struktura posade jer kod električnog pogona trebaju ljudi obučeni za poslove održavanja električnih postrojenja.

U praksi već postoji trajekt koji plovi između Švedske i Danske te ima gotovo istu duljinu rute plovidbe i dnevno ima još intenzivniji red plovidbe nego trajekt Sveti Krševan. Taj trajekt, koji je prikazan na Slika 20, je slične veličine i čak još većih energetskih potreba što dokazuje da bi mogućnost ugradnje baterije u energetski sustav trajekta Sveti Krševan trebala biti izvediva [35]. Međutim taj je trajekt za razliku od Svetog Krševana prethodno imao ugrađen sustav za električnu propulziju [31] jer je prije kao izvore električne energije koristio dizel generatore, što je olakšalo promjenu izvora napajanja jer je već postojala brodska infrastruktura za električnu propulziju.



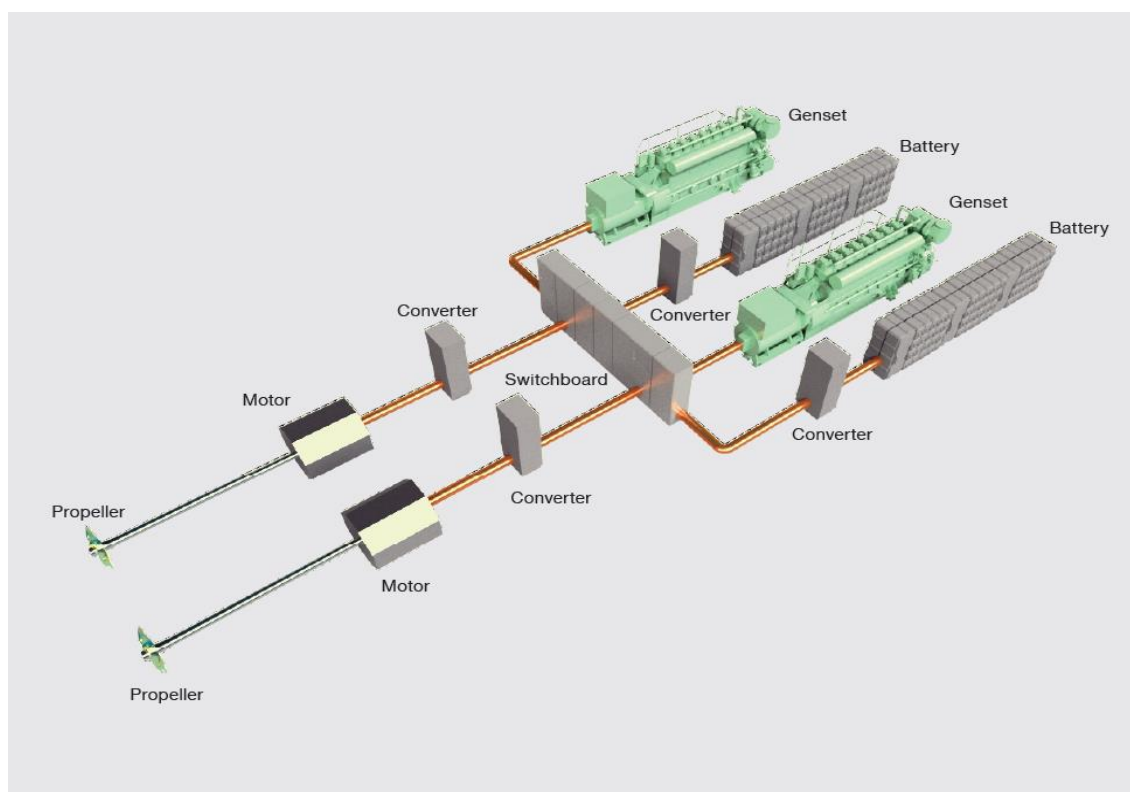
Slika 20. Trajekt Aurora koji plovi između Švedske i Danske [31]

6.1.1.2. Hibrid

Postoje različite varijante hibridnih opskrba energetskih potreba broda. U ovom poglavlju biti će obrađena hibridna upotreba litij-ionskih baterija i generatora električne energije koji će zadovoljavati energetske potrebe broda. Kako bi sva ta tehnička rješenja bila izvediva najprije

je potrebno kao i kod baterijskog postrojenja iz prethodnog poglavlja zamijeniti mehaničku propulziju s električnom.

Slika 21 prikazuje hibridno dizel električno postrojenje s baterijama. Takvo postrojenje bi u manjoj mjeri pridonijelo smanjenju emisije CO₂ u usporedbi s prethodnim rješenjem u kojem je korištena samo baterija. Baterija bi se nadopunjavala tijekom iskrcaja i ukrcaja automobila dok bi se potpuna regeneracija baterije ostvarila tijekom noći kada je rjeđi red vožnje. Nadalje kapacitet te baterije bi bio bitno manji nego u slučaju samo baterijskog napajanja jer bi se električna energija proizvodila i putem generatora. U ovakvom rješenju generatori mogu cijelo vrijeme proizvoditi istu snagu te se tako može omogućiti optimalan rad generatora, odnosno može se optimirati potrošnja goriva.



Slika 21. Hibridna dizel električna propulzija s baterijama u hibridnom sustavu [31]

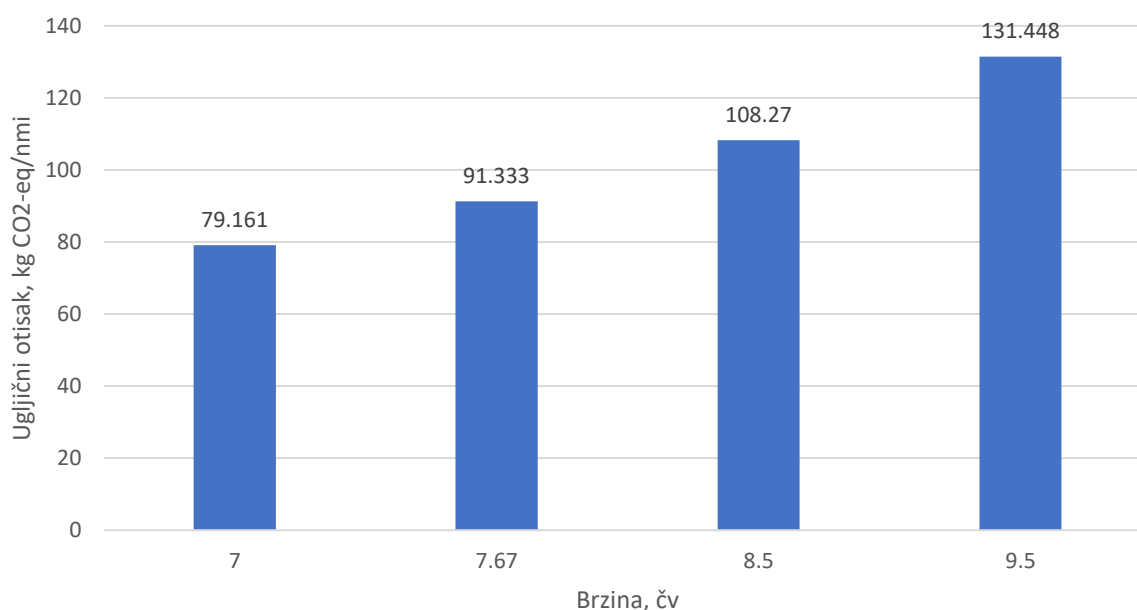
Druga hibridna opcija za trajekt Sveti Krševan je punjenje baterija na samom trajektu. Koncept takvog hibridnog postrojenja bio bi da se električna energija proizvodi putem generatora te se ta energija pohranjuje u litij-ionsku bateriju koja onda služi kao izvor napajanja elektromotora koji pokreće brodski vijak. Tijekom plovidbe litij ionska baterija bi se samo nadopunjavala električnom energijom koju proizvode generatori, a tijekom noći bi se potpuno napunila električnom energijom proizvedenom na kopnu.

Kao opcije za smanjenje ugljičnog otiska kod ovakvih hibridnih rješenja nudi se i mogućnost korištenja nekog od alternativnih goriva spomenutih u poglavlju 6.1. za pokretanje generatora što bi dodatno smanjilo ugljični otisak trajekta.

6.2. Operativne mjere

U operativnu mjeru optimiranje plovidbe spada optimiranje brzine plovidbe. Ovisno o efektu koji se želi postići, može se optimirati brzinu prema minimalnoj potrošnji goriva ili nekim drugim faktorima. Zanimljiva je optimizacija iz perspektive smanjenja ugljičnog otiska. U programskoj podršci GREET izrađen je proračun za različite prosječne brzine vožnje te će nakon toga biti analizirani postignuti rezultati. Sadašnja prosječna brzina trajekta iznosi 7,67 čv. U proračun će biti uvrštene 3 različite prosječne brzine, i to: 7 čv, 8,5 čv i 9,5 čv.

Provedbom proračuna u GREET-u za različite prosječne brzine plovidbe dolazi se do rezultata koji su prikazani grafom na Slika 22. Iz rezultata se može zaključiti da se skaliranjem prosječne brzine plovidbe mijenja i ugljični otisak. Povećanjem brzine plovidbe raste dok se smanjenjem brzine smanjuje. Ovi rezultati će poslužiti za optimiranje brzine plovidbe iz perspektive smanjenja ugljičnog otiska.



Slika 22. Ugljični otisak prilikom različitih brzina plovidbe

Rezultati dobiveni prethodnim proračunom pokazuju da smanjenjem brzine za malo više od pola čvora, ugljični otisak CO₂-eq po nautičkoj milji smanji se za preko 10 % što nije zanemariva brojka. To znači da bi se prema zimskom voznom redu kada nije prevelika

frekvencija automobila i putnika, mogla smanjiti prosječna brzina plovidbe kako bi se smanjila emisija CO₂, što bi posljedično i produljilo plovidbu za nekoliko minuta. S obzirom da u zimskim mjesecima promet trajektom nije frekventan kao u ljetnim mjesecima, tih nekoliko minuta dulje vožnje ne bi utjecalo na efikasnost linije te se ova mjera može pomno razraditi u svrhu smanjenja emisija.

Operativna mjera upravljanja flotom podrazumijeva redovito održavanje trajekta. Pri tom se misli na održavanje, te potrebnu zamjenu određenih dijelova i redovito održavanje oplakanih površina. Održavanje oplakanih površina je posebno važno jer prilikom prevelikog obraštanja, trajekt gubi na brzini odnosno mora uložiti veću snagu kako bi postigao istu brzinu kao kada su oplakane površine čiste.

Kada je brod privezan u luci postoji mogućnost da ga se spoji s obalnim izvorom energije (*eng. Cold ironing*) da bi se podmirile energetske potrebe broda. Ta tehnologija, koja pripada u operativnu mjeru upravljanja energijom, može smanjiti emisiju koja nastaje prilikom rada pomoćnih strojeva ako je obalni izvor električne energije iz obnovljivih izvora [36].

7. ZAKLJUČAK

Međunarodna pomorska organizacija godinama pokušava raznim odredbama utjecati na smanjenje štetnih ispušnih emisija. Ponukani tim i ususret budućim mjerama i odredbama za smanjenje ugljičnog otiska u ovom radu je napravljen proračun cjeloživotnih emisija CO₂ trajekta Sveti Krševan, koji plovi na relaciji Orebić - Dominče, za radni vijek od 30 godina. Proračun je napravljen u programskoj podršci GREET 2019. Nakon proračuna napravljena je analiza tehničkih i operativnih mjera koje bi mogle pomoći pri smanjenju ugljičnog otiska.

Trajekt Sveti Krševan za poriv koristi 4 dizelska četverotaktna stroja ukupne snage 1790 kW te ima dva generatora za proizvodnju električne energije. Rezultati ugljičnog otiska takvog brodskog energetskeg sustava iznose 2208,67 t CO₂-eq godišnje odnosno 66259,99 t CO₂-eq za razdoblje od 30 godina. Analizom dobijenih rezultata utvrđeno je da najveći dio ugljičnog otiska nastaje u PTW fazi odnosno u fazi eksploatacije trajekta. Nadalje su analizirane tehničke i operativne mjere koje bi suzbile emisiju.

Analizirajući alternativna goriva čijom bi se upotrebom smanjila emisija štetnih plinova, kao najprihvatljivija opcija se nameće elektrifikacija dotične trajektne linije. Kako bi se ostvarila elektrifikacija potrebne su određene konstrukcijske preinake na brodskom propulzijskom kao i na energetskeg sustavu. Sadašnju mehaničku potrebno je zamijeniti električnom propulzijom kako bi se moglo koristiti izvor električne energije za opskrbu porivnog sustava.

Kao izvori električne energije na trajektu nameću se litij ionske baterije, koje bi se nadopunjavale tijekom ukrcaja i iskrcaja automobila. Cijena baterije koja je godinama kontinuirano u padu kao i već postojeći primjeri trajekata koji se opskrbljuju energijom iz baterije idu u prilog ovom rješenju. Postoje i opcije hibridne opskrbe električnom energijom. Može biti kombinacija baterije i generatora koji zajedno opskrbljuju brodsku električnu mrežu, što bi za razliku od prethodne konfiguracije samo s baterijama dosta smanjilo kapacitet baterija što bi se odrazilo na ukupnu cijenu sustava. Nadalje, postrojenje se može sastojati od baterije i generatora koji izravno nadopunjavaju tu bateriju na trajektu. U hibridnim konfiguracijama korištenje različitih alternativnih goriva za pokretanje generatora je jedna od mogućnosti za smanjenje ugljičnog otiska.

Razmatrane su i različite operativne mjere kao što su smanjenje prosječne brzine plovidbe, redovito održavanje trajekta te upravljanje energijom. Smanjenjem prosječne brzine plovidbe emisija CO₂ bi se smanjila za preko 10 %. Kao mogućnost se otvara spajanje na obalni izvor

električne energije tzv. *Cold ironing* dok je brod privezan u luci te bi se tako izbjeglo korištenje pomoćnih strojeva čime bi se smanjila emisija.

Problem kod elektrifikacije ove trajektne linije može nastati zbog nedovoljno velikih obalnih izvora električne energije koji bi se koristili za nadopunjavanje baterija ili kod spajanja broda na obalnu električnu mrežu prilikom boravka u luci. Problem nedovoljne količine električne energije može se riješiti izgradnjom solarnih i vjetroelektrana za koje je otok Korčula vrlo povoljno područje. Također financijski aspekti svih navedenih alternativnih konfiguracija nisu sagledani.

Gledajući iz perspektive smanjenja ugljičnog otiska elektrifikacija trajekta koji se opskrbljuje iz obnovljivih izvora bilo bi najefikasnije rješenje. Međutim to sigurno nije i financijski najbolje rješenje, a danas je još uvijek važniji financijski aspekt od ekološkog. Stoga se jedino podizanjem svijesti o globalnom zatopljenju ili uvođenjem novih, strožih regulativa koje ograničavaju emisiju može ubrzati prelazak na čisće oblike energije.

LITERATURA

- [1] <https://unctadstat.unctad.org/wds/TableViewer/tableView.aspx> (pristup: 14.4.2020.).
- [2] Kontovas C. A., Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation, *Marine Policy*, 113 (2020) 103815.
- [3] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx> (pristup: 15.4.2020.).
- [4] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> (pristup: 20.4.2020.).
- [5] <https://agencija-zolpp.hr/linije/> (pristup: 20.4.2020.).
- [6] <https://www.kora.hr/hr/projekti/energetska-tranzicija-otoka-korculje-43> (pristup: 29.4.2020.).
- [7] Perčić M., Ančić I., Vladimir N., Life-cycle cost assessments of different power system configurations to reduce the carbon footprint in the Croatian short-sea shipping sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110028.
- [8] <https://greet.es.anl.gov/> (pristup: 30.5.2020.).
- [9] <https://www.jadrolinija.hr/o-nama/brodovi/trajekti/trajekti-lokalnih-linija/sveti-krsevan> (pristup: 25.4.2020.).
- [10] <https://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:208998> (pristup: 25.4.2020.).
- [11] <http://report.crs.hr/hrbwebreports/Default.aspx> (pristup: 23.4.2020.).
- [12] https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/marine-power-systems/commercial-propulsion-engines/18493417.html (pristup: 30.5.2020.).
- [13] <https://www.jadrolinija.hr/red-plovidbe/lokalne-linije-2020-> (pristup: 27.4.2020.).
- [14] <https://www.jadrolinija.hr/hr/schedule/LineSearchResults/Index/2331743/2331768/28042020> (pristup: 28.4.2020.).
- [15] https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:208998/mmsi:238151640/imo:9326562/vessel:SVETI_KRSEVAN (pristup: 31.5.2020.).
- [16] <https://sea-distances.org/> (pristup: 8.8.2020.).
- [17] <https://janaf.hr/sustav-janaf> (pristup: 8.8.2020.).
- [18] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_4/Water-borne_Navigation.pdf (pristup: 12.8.2020.).
- [19] <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials#Learn%20why> (pristup: 12.8.2020.).

- [20] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/COP%2017/Submissions/Final%20SBSTA%20EEDI%20SEEMP%20COP17.pdf> (pristup: 4.9.2020.).
- [21] <https://mmpi.gov.hr/infrastruktura/infrastruktura-za-alternativna-goriva/20746> (pristup: 5.9.2020.).
- [22] Stančin H., Mikulčić H., Wang X., Duić N., A review on alternative fuels in future energy system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128 (2020) 109927.
- [23] Perčić M., Valdimir N., Fan A., Life-Cycle Cost Assessment of Alternative Marine Fuels to Reduce the Carbon Footprint in Short-Sea Shipping: A Case Study of Croatia, *Applied Energy*, 279 (2020) 115848.
- [24] Svanberg M., Ellis J., Lundgren J., Landälv I., Renewable methanol as a fuel for the shipping industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94 (2018) 1217–1228.
- [25] Verhelst S., Turner J. W.G., Sileghem L., Vancoillie J., Methanol as a fuel for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 70 (2019) 43–88.
- [26] Mohd Noor C.W., Noor M.M., Mamat R., Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94 (2018) 127–142.
- [27] Ančić I., Perčić M., Vladimir N., Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: A case study of Croatia, *Journal of Cleaner Production*, 271 (2020) 122638.
- [28] <http://www.hep.hr/elektra/trziste-elektricne-energije/izvori-elektricne-energije/1553> (pristup: 7.9.2020.).
- [29] Pfeifer A., Prebeg P., Duić N., Challenges and opportunities of zero emission shipping in smart islands: A study of zero emission ferry lines, *eTransportation*, 3 (2020) 100048.
- [30] Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopman J.J., Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, *Applied Energy*, 194 (2017) 30-54.
- [31] https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=9c69d8a2_4 (pristup: 9.9.2020.).
- [32] <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/> (pristup: 9.9.2020.).
- [33] <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/> (pristup: 9.9.2020.).

-
- [34] <http://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578> (pristup:11.9.2020.).
- [35] <https://insideevs.com/news/349545/fully-charged-electric-ferry/> (pristup: 11.9.2020.).
- [36] Zis T.P.V., Prospects of cold ironing as an emissions reduction option, Transportation Research Part A, 119 (2019) 82–95.

PRILOZI

- I. CD-R disc