

Elektrifikacija plivaričara u hrvatskom priobalnom sektoru

Grgorinić, David

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:855325>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

David Grgorinić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Dr. sc. Maja Perčić, mag. ing.

Student:

David Grgorinić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se prije svega svom mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru i komentorici dr. sc. Maji Perčić na ukazanoj pomoći i svim savjetima tokom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojim prijateljima iz Ožujске, Mateju i Mihaelu, za svu potporu i motivaciju tijekom studiranja. Želim se zahvaliti svojim najboljim kolegama, Mati i Luki, za svu pomoć, motivaciju i sve lijepe trenutke. Zahvaljujem se svojoj djevojci Iti na svakodnevnoj potpori i motivaciji. Posljednje, ali ne manje važno, zahvaljujem se svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i povjerenju tijekom studiranja.

David Grgorinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **David Grgorić** JMBAG: 0035217691

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Elektrifikacija plivaričara u hrvatskom ribarskom sektoru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Electrification of a purse seiner in the Croatian fishing sector**

Opis zadatka:

Ribarski sektor predstavlja važan dio gospodarstva, ali je i jedan od velikih potrošača fosilnih goriva, što rezultira visokim vrijednostima emisija stakleničkih plinova. Zamjenom fosilnih goriva električnom energijom, ribarska plovila mogu značajno smanjiti svoj ugljični otisak, doprinoseći globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena. U diplomskom radu potrebno je razraditi elektrifikaciju jednog plivaričara hrvatske ribarske flote uzimajući u obzir potpuno električni brod (pogonjen samo elektromotorom s baterijom) plug-in hibridni i hibridni brod čiji energetski sustav čine kombinacija dizel generatora, motora i baterije. Uz analizu ekoloških regulativa u pomorskom sektoru, diplomski rad treba sadržavati matematički model za analizu emisija brodskog energetskog sustava i s njima povezanih troškova, opis programske podrške, pregled izazova u elektrifikaciji pomorskog sektora, tehnički opis zadanog broda i njegove energetske potrebe, prijedloge alternativnih konfiguracija i njihovu usporedbu s postojećim rješenjem temeljem ekonomskih pokazatelja.

Tehničke i operativne značajke broda dostupne su na Katedri za strojeve i uređaje plovnih objekata. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadali:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimír

Dr. sc. Maja Perčić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Elektrifikacija u pomorskom sektoru.....	2
1.2. Emisije štetnih plinova u ribarskom sektoru.....	4
1.3. Cilj rada.....	6
2. TEHNIČKI OPIS BRODA I NJEGOVE ENERGETSKE POTREBE.....	8
3. MATEMATIČKI MODELI ZA ODREĐIVANJE CJELOŽIVOTNIH TROŠKOVA BRODSKOG ENERGETSKOG SUSTAVA.....	12
3.1.1. LCCA plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima.....	16
3.1.2. LCCA plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom.....	18
3.1.3. LCCA plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom.....	21
3.1.4. LCCA potpuno električnog plivaričara.....	22
4. OPIS KORIŠTENOG PROGRAMSKOG PAKETA.....	24
4.1. Simulacija.....	26
4.2. Optimizacija.....	27
4.3. Analiza osjetljivosti.....	27
5. REZULTATI I DISKUSIJA.....	29
5.1. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima.....	29
5.2. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom.....	31
5.3. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom.....	34
5.4. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog isključivo električnom energijom.....	36
5.5. Usporedba rezultata.....	38
6. ZAKLJUČAK.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1	Pregled podataka o ribarstvu u svijetu; a) masa ulovljene ribe, b) emisije stakleničkih plinova u tisućama tona CO ₂ -eq, c) intenzitet stakleničkih plinova u kilogramima CO ₂ -eq po toni ulovljene ribe, d) emisije ribarskog sektora kao postotak emisija ukupne prehrambene industrije	5
Slika 2	Plivaričar Brilljant	9
Slika 3	Prikaz rute plivaričara iz programskog paketa MAPON.....	9
Slika 4	Uobičajen tijek rada plivaričara	10
Slika 5	Podjela troškova u analizi.....	12
Slika 6	Prikaz rute plivaričara	13
Slika 7	Ulazni podaci električne energije	15
Slika 8	Shematski prikaz sustava pogonjenim dizelskim gorivom	17
Slika 9	Raspored rada dizel motora	18
Slika 10	Shematski prikaz hibridnog sustava pogona	19
Slika 11	Struktura litij-ionske baterije.....	20
Slika 12	Shematski prikaz plug-in hibridnog sustava pogona.....	22
Slika 13	Shematski prikaz potpuno električnog pogona	23
Slika 14	Korisničko sučelje programskog paketa HOMER Pro.....	24
Slika 15	Konceptualni odnos između simulacije, optimizacije i analize osjetljivosti.....	26
Slika 16	Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima	29
Slika 17	Izlazni podaci o potrošnje goriva	30
Slika 18	Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru.....	30
Slika 19	Izlazni podaci o pomoćnom dizel generatoru.....	31
Slika 20	Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom.....	32
Slika 21	Izlazni podaci o potrošnje goriva	32
Slika 22	Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru.....	33
Slika 23	Izlazni podaci o bateriji	33
Slika 24	Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom	34
Slika 25	Izlazni podaci o potrošnji goriva	35
Slika 26	Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru.....	35
Slika 27	Izlazni podaci o bateriji	36
Slika 28	Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog isključivo električnom energijom.....	37
Slika 29	Izlazni podaci o bateriji	37
Slika 30	Rezultati potrošnje električne energije	38
Slika 31	Prikaz ukupnih troškova različitih konfiguracija brodskog energetskog sustava kroz životni vijek projekta.....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1	Emisije stakleničkih plinova ribarskog sektora u 2011. godini.....	6
Tablica 2	Karakteristike analiziranog broda	8
Tablica 3	Raspored opterećenja plivaričara	14
Tablica 4	Ulazni podaci glavnog dizelskog motora	15
Tablica 5	Detalji pomoćnog generatora	17
Tablica 6	Podaci o odabranoj bateriji.....	20
Tablica 7	Usporedba iznosa ukupnog troška projekta.....	38
Tablica 8	Usporedba rezultata troškova goriva i električne energije kroz životni ciklus	39
Tablica 9	Usporedba rezultata potrošnje goriva kroz životni ciklus	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B	m	širina broda
C_{rep}	€	trošak zamjene
E_{CO}	g/l _{goriva}	emisija ugljikovog monoksida
E_{CO2}	g/l _{goriva}	emisija ugljikovog dioksida
DoD	%	dubina pražnjenja
EC_A	kWh	ukupna energetska potrošnja broda
FC_{DA}	kg	godišnja potrošnja dizelskog goriva
GT	rt	bruto tonaža
LOA	m	duljina preko svega
L_{PP}	m	duljina između okomica
E_{NOX}	g/l _{goriva}	emisija dušikovih oksida
P_{AE}	kW	snaga pomoćnih motora
$P_{AE,ave}$	kW	prosječna snaga pomoćnih motora
P_{ME}	kW	snaga glavnog motora
$P_{ME,ave}$	kW	prosječna snaga glavnog motora
R_{comp}	godina	životni vijek komponente
R_{proj}	godina	projektirani životni vijek
R_{rem}	godina	preostali životni vijek komponente
R_{rep}	godina	trajanje troška zamjene
S	€	preostala vrijednost
SFC_D	kg/kWh	specifična potrošnja dizelskog goriva
E_{SO2}	g/l _{goriva}	emisija sumporovog dioksida
$t_{AE,a}$	sati/godina	operativno vrijeme pomoćnog motora
$t_{ME,a}$	sati/godina	operativno vrijeme glavnog motora
T	m	gaz broda

SAŽETAK

U posljednjem desetljeću, pomorska industrija se suočava s izazovima zbog sve strožih globalnih ekoloških pravila koja zahtijevaju smanjenje emisija štetnih plinova i povećanje energetske učinkovitosti brodova. Elektrifikacija u pomorskoj industriji, posebno u ribarskom sektoru, postaje jedan od odgovora na ove izazove. Ovaj rad obrađuje cjeloživotne troškove različitih pogonskih sustava za plivaričare u hrvatskom priobalnom području, uključujući dizelske, hibridne, plug-in hibridne i potpuno električne pogonske sustave. Korištenjem programskog paketa HOMER Pro, provedena je analiza tehničkih i ekonomskih značajki svake vrste pogona. Predstavljen je tehnički opis broda, njegove energetske potrebe te ulazni parametri za proračun. Rezultati su predstavljeni kroz programski paket te u konačnici kroz usporedbe svih ispitanih izvedbi. Elektrifikacija ribarske flote može značajno doprinijeti smanjenju ukupnih emisija stakleničkih plinova, čime se podržavaju globalni ekološki ciljevi. Ovaj rad također naglašava važnost održavanja i optimalnog korištenja energetske resursa za postizanje maksimalne učinkovitosti i ekološke održivosti.

Ključne riječi: elektrifikacija, cjeloživotna analiza troškova, plivaričar, HOMER Pro.

SUMMARY

In the last decade, the maritime industry has faced challenges due to increasingly stringent global environmental regulations requiring reduced harmful gas emissions and increased energy efficiency of ships. Electrification in the maritime industry, especially in the fishing sector, is becoming increasingly significant in response to these challenges. This thesis explores the life-cycle costs of different propulsion systems for purse seiners in the Croatian fishing sector, including diesel, hybrid, plug-in hybrid, and fully electric propulsion systems. Using the HOMER Pro software package, an analysis of the technical and economic aspects of each type of propulsion was conducted. A technical description of the vessel, its energy needs, and inputs for the calculations are presented. The results are displayed through the software package and ultimately through comparisons of all tested ship power system designs. The electrification of the fishing fleet can significantly contribute to reducing overall greenhouse gas emissions, thereby supporting global environmental goals. This paper also emphasizes the importance of maintenance and optimal use of energy resources to achieve maximum efficiency and environmental sustainability.

Keywords: electrification, life-cycle cost assessment, purse seiner, HOMER Pro.

1. UVOD

Sve stroži globalni ekološki propisi kroz posljednje desetljeće predstavljaju izazov za pomorsku industriju, zahtijevajući smanjenje emisija štetnih plinova i povećanje energetske učinkovitosti brodova. Emisije plinova koje se najviše spominju su emisije ugljikovog dioksida (CO₂), metana (CH₄), dušikovog oksida (N₂O) te fluoriranih plinova u manjim koncentracijama [1]. Ovi se plinovi nazivaju stakleničkim plinovima (eng. *Greenhouse Gases*, GHG) jer uzrokuju efekt staklenika koji dovodi do globalnog zatopljenja [2]. Povodom porasta prosječne globalne temperature, u Glasgowu je 2021. godine sklopljen klimatski pakt koji nalaže ograničenje porasta prosječne globalne temperature na 1,5 °C više no što je ista iznosila u predindustrijskom razdoblju [3]. Naime, kako bi problem globalnog zatopljenja bio adekvatno riješen, potrebno je težiti smanjenju emisije stakleničkih plinova ne samo u pomorskoj industriji, već u svakoj grani gospodarstva [1]. Prema četvrtoj GHG studiji Međunarodne pomorske organizacije (eng. *International Maritime Organization*, IMO), pomorska je industrija 2018. godine pridonijela s 2,89 % globalnih antropogenih emisija stakleničkih plinova, što predstavlja porast od 9,6 % u odnosu na razinu iz 2012. godine. Bez mjera za smanjenje emisija, očekuje se značajan porast emisija do 2050. godine [4]. Prvi pokušaj za smanjenje emisije CO₂ bio je uvođenjem projektnog indeksa energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI) za nove brodove te broskog plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP) što se smatra kratkoročnim mjerama, dok je od 1. siječnja 2023. godine na snazi i indeks energetske učinkovitosti postojećeg broda (eng. *Energy Efficiency Existing Ship Index*, EEXI) i indikator ugljičnog intenziteta (eng. *Carbon Intensity Indicator*, CII) za brodove iznad 5000 GT. EEXI, poput EEDI-a, odnosi se na brodove iznad 400 GT, zahtijevajući da njihov postignuti EEXI ne premašuje traženi EEXI. U srpnju 2023. godine usvojena je IMO-ova početna strategija o smanjenju emisija stakleničkih plinova s brodova koja će služiti kao okvir koji obuhvaća srednjoročne i dugoročne mjere dekarbonizacije, zajedno s mogućim vremenskim rokovima i očekivanim utjecajima. Prema strategiji, do 2030. godine brodovi uključeni u međunarodnu plovidbu moraju smanjiti svoje ukupne godišnje emisije stakleničkih plinova za najmanje 20 % (težeći prema 30 %), intenzitet ugljika, tj. emisije CO₂ po obavljenom transportnom radu, za najmanje 40 % u usporedbi s istim podacima iz 2008. godine, uz primjenu rješenja za snagu s nultom ili gotovo nultom emisijom stakleničkih plinova koja će činiti najmanje 5 % (težeći prema 10 %) ukupne potrošnje energije

[5]. Dugoročna mjera IMO-ove strategije za smanjenje emisija stakleničkih plinova i ključni korak za dekarbonizaciju pomorskog sektora je zamjena konvencionalnih goriva alternativnim gorivima, s naglaskom na goriva s nultom emisijom ugljika poput vodika, amonijaka i električne energije. Među opcijama za pogon s nultom emisijom ugljika, elektrifikacija predstavlja najpoznatiju i komercijalno dostupnu tehnologiju koja se već primjenjuje u brodarskom sektoru [6]. Stoga se industrija okreće prema hibridnim rješenjima koja kombiniraju tradicionalne izvore energije s alternativnim gorivima i tehnologijama. Ova tranzicija obuhvaća korištenje tehnologija raznih naprednih sustava za upravljanje energijom, pružajući održivije i ekološki prihvatljive opcije za budućnost pomorske industrije.

1.1. Elektrifikacija u pomorskom sektoru

Potaknut povećanjem udjela štetnih stakleničkih plinova u atmosferi, IMO je uveo niz mjera s ciljem ograničenja, odnosno smanjenja zagađenja okoliša od strane pomorskog sektora. S obzirom da su donesene mjere još uvijek relativno neistražene, potrebno je provesti dodatna istraživanja koja će dati jasan odgovor na pitanje ekološki najprihvatljivijeg brodskog energetskog sustava, no i tada će rezultati varirati budući da je nemoguće primijeniti isto rješenje na svaku vrstu broda. Trendom elektrifikacije u pomorskom sektoru se najviše cilja na smanjenje stakleničkih plinova te razvoj ekološki prihvatljivih pogonskih jedinica unutar mjera IMO-a. Sam proces elektrifikacije broda može biti izveden na više načina:

- potpuno elektrificiran brod,
- djelomična elektrifikacija.

Kad se govori o bateriji, neophodno je spomenuti kako i njena proizvodnja nosi svoja ograničenja u vidu ekološke prihvatljivosti s obzirom da je za proizvodnju baterija potrebno koristiti zalihom ograničene resurse [7]. Sustavi koji koriste dva ili više različitih izvora energije za pogon nazivaju se hibridnim sustavima te oni mogu biti izvedeni u sljedećim konfiguracijama:

- serijski,
- paralelni,
- serijsko-paralelni.

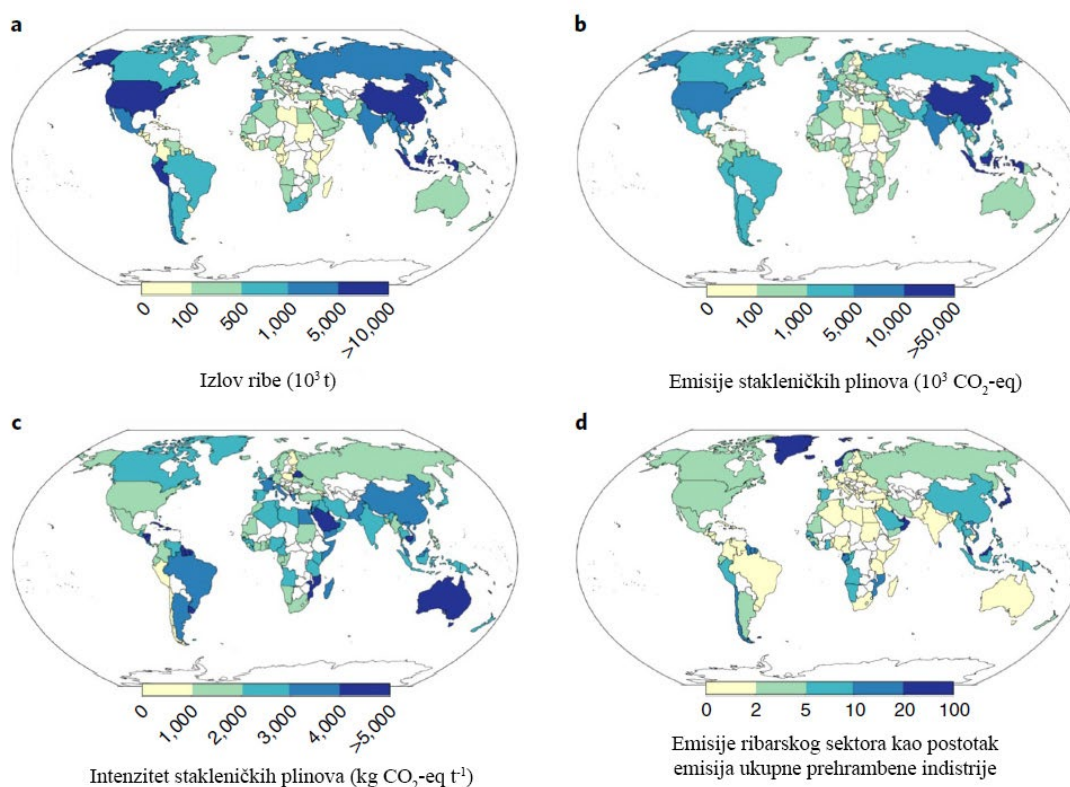
Hibridni sustavi koji koriste serijski pogonski sklop dobivaju mehaničku snagu samo od elektromotora, kojeg pokreće baterija ili generator. U hibridnim sustavima s paralelnim pogonskim sklopovima, elektromotor i motor s unutarnjim izgaranjem mogu istovremeno pružati mehaničku snagu [8]. U paralelnoj hibridnoj konfiguraciji, mehanička veza između

komponentata ne omogućuje proizvoljnu optimizaciju radnih uvjeta motora s unutarnjim izgaranjem, kao što je to slučaj kod serijskih hibrida. Međutim, paralelni hibridni pogonski sustav omogućuje da i motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor istovremeno isporučuju snagu i sastoji se samo od dva pogonska uređaja, budući da se elektromotor može koristiti kao generator [9]. Serijsko-paralelni pogonski sklopovi omogućuju motoru i elektromotoru da pružaju snagu neovisno ili u kombinaciji jedan s drugim [8]. Što se tiče država koje prednjače u elektrifikaciji plovila, Norveška je vodeća, no samo u priobalnom području zbog mase i prostora kojeg baterije zauzimaju na plovilu, što su još uvijek ograničavajući čimbenici [10]. Zaključno s 2022. godinom, istraživanje Det Norske Veritasa (DNV), ukazuje na podatak da je u tom trenutku u svijetu bilo 25 plovila pogonjenih barem djelomično baterijom. Svakako, baterijski pogon kod brodova je trenutno korišten tek u aktivnostima koje zahtijevaju manju snagu i brzinu kao što je puštanje mreže kod plivaričara, dok se za veće brzine još uvijek koristi dizelski motor. Jeong i sur. [11] koristili su kombinaciju analize životnog ciklusa (eng. *Life-Cycle Assessment*, LCA) i cjeloživotne analize troškova (eng. *Life-Cycle Cost Assessment*, LCCA) u svrhu procjene ekološke i ekonomske prednosti trajekta s hibridnim energetskim sustavom u usporedbi s dizel-električnim i trajektima pogonjenim dizelskim gorivom. Rezultati LCA pokazali su da primjena baterija na trajektima koji plove kratkim rutama može biti rješenje za dekarbonizaciju pomorskog transporta, dok su rezultati LCCA potvrdili visoku isplativost hibridnih sustava u usporedbi s trajektima na dizelski pogon [12]. Studija Wanga i sur. [13] obuhvatila je usporedbe LCA i LCCA za trajekte na baterijski pogon i pogon na dizelsko gorivo te potvrdila i ekološke i ekonomske prednosti potpuno električnih brodova. Rezultati su pokazali da trajekt na baterijski pogon smanjuje emisiju stakleničkih plinova tijekom životnog ciklusa za 30 % i troškove za 15 % u usporedbi s konvencionalnim trajektom s dizelskim motorom [12]. Studija Perčić i sur. [4] uključuje LCA i LCCA za osam alternativnih goriva na tri trajekta iz hrvatske priobalne plovidbe. Studija je istaknula potpunu elektrifikaciju s baterijama kao najprihvatljiviju opciju koja zadovoljava ekološke i ekonomske kriterije. Najveći dio emisija kod broda na baterijski pogon odnosi se na emisije nastale tijekom proizvodnje električne energije [12].

1.2. Emisije štetnih plinova u ribarskom sektoru

Moderni ribarski sektor uvelike ovisi o fosilnim gorivima za pogon brodova, rad ribolovne opreme i druge aktivnosti na brodu vezane za ribolov [14]. Potrošnja goriva u ribarskom sektoru vrlo je varijabilna i ovisi o ciljanoj vrsti, uvjetima rada, opremi, veličini plovila te metodama ribolova [15], [16]. Metode ribolova mogu se klasificirati kao pasivne (štap i konopac, parangal, mreže stajačice, vrše i zamke te uređaji za privlačenje ribe) i aktivne (koćarenje, jaružanje, plivaričarenje) [17], [18]. Koćarenje se može koristiti u srednjim vodenim slojevima i pri dnu te zahtijeva mrežu u stožastog oblika s zatvorenim krajem koji drži ulov. Mrežu vuku jedan ili dva broda, tj. kočari, a mreža je konstruirana za ulov specifičnih vrsta koje žive na velikim dubinama ili na dnu. Kod koćarenja po dnu, mreža često dolazi u kontakt s morskim dnom, što je glavna negativna posljedica ove metode ribolova [15]. Ribolov plivaričarom je još jedna aktivna metoda ribolova. Plivaričar je brod koji cilja gusta jata pelagične ribe, za što je potrebna vertikalna mreža (plivarica) s plovcima na gornjoj liniji kako bi okružila ribu i uhvatila je. Prednost ribolova mrežom plivaricom u odnosu na koćarenje je u tome što mreža nema kontakt s morskim dnom [18], [19]. Nadalje, tijekom ribolovnog putovanja plivaričari provode oko 42 % svog vremena krstareći, što uključuje otprilike 56 % ukupne potrošnje goriva. Plivaričari mogu uloviti velike količine ribe u jednoj operaciji, što nije slučaj s kočarima. Za razliku od plivaričara, kočari love širok spektar ribe, često s višom tržišnom vrijednošću [17]. Uz zračni prijevoz, ribarski brodovi troše relativno najveću količinu energije i emitiraju visoke razine štetnih plinova [20]. Prema podacima Organizacije za hranu i poljoprivredu (eng. *Food and Agriculture Organization*, FAO), plivaričar za lov tune troši 1500 litara po toni iskrcane ribe, dok plivaričar za lov haringe troši samo 100 litara po toni iskrcane ribe. Kočari troše relativno više goriva od plivaričara, ali postoje i velike razlike ovisno o vrsti ribe. Primjerice, kod izlova kozica troši se 3000 litara po toni ribe, dok izlov bakalara troši otprilike 530 litara po toni ribe [21]. Procjenjuje se kako je samo 2011. godine ribarski sektor na svjetskoj razini iskoristio 40 milijardi litara goriva te emitirao 179 milijuna tona CO₂ ekvivalenta (CO₂-eq) u atmosferu, odnosno 2,2 kilograma CO₂-eq po kilogramu ulovljene ribe. Navedena je mjerna jedinica uvedena kako bi se pojednostavili proračuni emisija raznih stakleničkih plinova te jedna tona CO₂ prikazuje jedinicu mjere emisije bilo kojeg stakleničkog plina. Definirana je kao umnožak količine stakleničkog plina, jedinice mase i vrijednosti GWP-100 određenog stakleničkog plina [22]. Države s najvećim iznosom emisija CO₂ su Kina, Indonezija, Vijetnam, Sjedinjene Američke Države i Japan, što je prikazano na Slici 1. Navedene su države odgovorne za 37 % svjetskog izlova ribe te 49 % ukupnih svjetskih emisija CO₂-eq u 2011. godini pa je njihov

međusoban iznos emisija stakleničkih plinova iznosio čak 81 milijun tona CO₂-eq, što je prikazano u Tablici 1 [23]. Nadalje, samo je kineska ribarska flota u 2011. godini emitirala 50 milijuna tona CO₂-eq, što čini jednu četvrtinu ukupnih emisija ribarskog sektora te više od ribarica diljem Europe, Sjeverne i Južne Amerike zajedno. Više od jedne trećine ulovljene ribe nije korišteno za prehrambene svrhe te se većina ove količine koristi za proizvodnju hrane i ulja za potrebe poljoprivrede i stočarstva. Takav način prerade je prisutan u zemljama poput Čilea, Perua, Tajlanda, Kine i Sjedinjenih Američkih Država te iznosi 15 % od ukupnih globalnih ribarske flote sa prosječno 1,1 kg CO₂-eq po kilogramu ulovljene ribe [23].



Slika 1 Pregled podataka o ribarstvu u svijetu; a) masa ulovljene ribe, b) emisije stakleničkih plinova u tisućama tona CO₂-eq, c) intenzitet stakleničkih plinova u kilogramima CO₂-eq po toni ulovljene ribe, d) emisije ribarskog sektora kao postotak emisija ukupne prehrambene industrije [23]

Tablica 1 Emisije stakleničkih plinova ribarskog sektora u 2011. godini [23]

Sektor	Izlov (milijuni tona)	Intenzitet upotrebe goriva ($l\ t^{-1}$)	Intenzitet emisija (kg CO ₂ -eq po kg ulovljene ribe)	Ukupne emisije (milijuni t CO ₂ -eq)
Svjetska ribarska flota	81	489	2.2	179
Po vrsti brodskog pogona				
Motorizirano	74	532	2.3	174
Bez motora	6	0	0.7	5
Po vrsti proizvoda				
Ljudska potrošnja	57	592	2.7	152
Proizvodi koji nisu hrana	24	246	1,1	27
Prehrambeni proizvodi	18	82	0,4	7
Po vrsti ribe				
Pelagijska riba < 30 cm	17	42	0,2	3
Pelagijska riba > 30 cm	21	430	1,9	41
Školjkaši	3	523	2,4	7
Pridnena riba	31	539	2,4	75
Glavonošci	4	613	2,8	10
Rakovi	5	1739	7,9	43

1.3. Cilj rada

Izlov ribe pomoću plivaričara ili kočara jest energetska intenzivna operacija koja većinu svojih emisija proizvede izravnim sagorijevanjem fosilnih goriva te pokazuje izražene varijacije u potrošnji goriva kako unutar tako i među flotama. Budućnost ribarskog sektora i proizvodnje ribe bit će pod snažnim utjecajem klimatskih promjena, dok će nestabilne cijene energije i povezani propisi i politike utjecati na ribare, ribarske zajednice i nacije čiji životi i sigurnost hrane ovise o oceanu [4]. U ovom radu provedena je cjeloživotna analiza troškova jednog

plivaričara te su uspoređeni rezultati četiri izvedbe pogona plivaričara u obliku dizelskog pogonskog sustava, hibridnog sustava, plug-in hibridnog sustava te potpuno električnog sustava. Analiza je provedena u programskom paketu HOMER Pro te daje prikaz troškova tijekom životnog vijeka broda i optimalnu konfiguraciju prema kriteriju minimalnih cjeloživotnih troškova.

2. TEHNIČKI OPIS BRODA I NJEGOVE ENERGETSKE POTREBE

Hrvatska ribarska flota se trenutno sastoji od preko 7800 plovila koja su odgovorna za približno 6 % ukupnog ulova u Sredozemnom moru. Plovila kraća od 6 metara čine 56,4 % flote, dok plovila između 5 i 12 metara čine 36,4 %. Unatoč manjem broju, plivaričari dužine 24 do 40 metara zaslužni su za 55 % vrijednosti iskrcaja i 90 % mase iskrcaja. U ovom radu izvršena je analiza za plivaričara *Briljant* te su njegove karakteristike prikazane u Tablici 2 [24].

Tablica 2 Karakteristike analiziranog broda [24]

HRB broj	15635
IMO broj	6711807
Vrsta broda	Ribarski brod
Godina gradnje	1967
Zastava	Republika Hrvatska
Luka upisa	Split
Pozivni znak	9AA5431
Područje plovidbe	5 – Nacionalna plovidba
Status	U službi
Vrsta poriva	Motor s unutarnjim izgaranjem
Materijal gradnje trupa	Čelik
Duljina preko svega, L_{OA} (m)	32,28
Duljina između okomica, L_{PP} (m)	28
Širina, B (m)	7,4
Gaz, T (m)	2,88
Bruto tonaža, GT (rt)	182
Snaga glavnog motora, P_{ME} (kW)	480
Snaga pomoćnih motora, P_{AE} (kW)	185

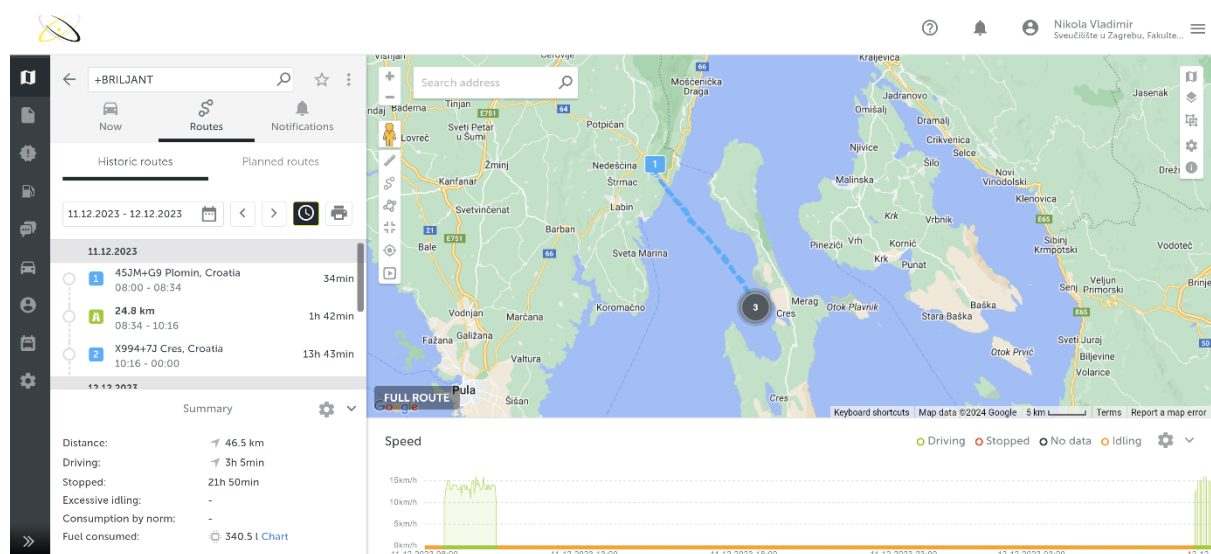
Analizirani je brod dio mjerne kampanje potrošnje goriva koju Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu provodi na ribarskim brodovima u Hrvatskoj pri čemu su opremljeni

sustavom za praćenje potrošnje goriva, GPS-om i dodatnim prekidačima što je omogućilo praćenje korištenja glavnih i pomoćnih motora. Analizirani brod je prikazan na Slici 2 [1].



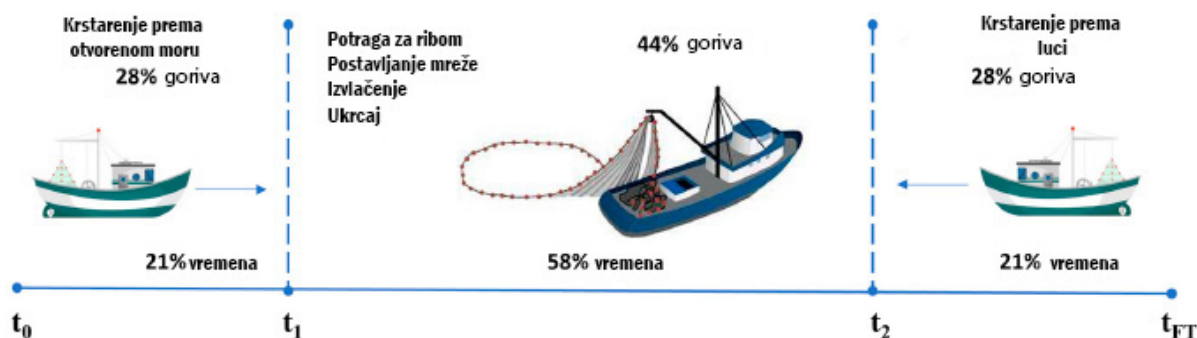
Slika 2 Plivaričar Brilljant [25]

Sustav za praćenje integriran je s programskim paketom MAPON koji je bilježio operativne podatke (potrošnja goriva, položaj, brzina broda, itd.) u stvarnom vremenu [1]. Prikaz jedne od plovnih ruta plivaričara iz programskog paketa MAPON je na Slici 3.



Slika 3 Prikaz rute plivaričara iz programskog paketa MAPON

Operativni profil plivaričara može se podijeliti u nekoliko faza koje su prikazane na Slici 4. Ono što je ključno za optimizaciju energetske potrošnje plivaričara jesu podaci o rasporedu i trajanju raznih aktivnosti tijekom rada samog broda. Njihovo radno vrijeme nije uvijek isto s obzirom da ovisi o nizu čimbenika gdje su najvažniji vremenski uvjeti, sezona ribe te eventualna ograničenja izlova izdana od strane lučkih kapetanija.



Slika 4 Uobičajen tijek rada plivaričara [1]

Pri dolasku na odabranu poziciju, koja je određena količinom ribe, plivaričar svijetli te okuplja ribu na lokaciji izlova. Nakon toga baca mrežu u more te kretanjem zatvara površinu kružnice unutar koje je riba. Nakon kruženja, plivaričar izvlači mrežu te ukrcava ulov u svoje skladište. Operativni profil okončava se dolaskom plivaričara u luku. Karakteristika plivaričara jest rad noću što znači da napuštaju luku u poslijepodnevnim ili večernjim satima te se vraćaju u istu u ranim jutarnjim satima. Tijekom jednog ribolovnog ciklusa pretpostavljen je prosječan rad glavnog motora plivaričara od 6 sati, dok je prosječno vrijeme rada pomoćnih motora 15 sati. U ovom radu proračun je izveden tako što se uzela u obzir pretpostavka da plivaričar radi 200 dana godišnje [1]. Prosječna snaga broda, P_{ave} (kW) koja je potrebna za neometan i potpun rad broda, izračunava se sljedećom jednadžbom:

$$P_{ave} = P_{ME,ave} + P_{AE,ave} \quad (1)$$

gdje je $P_{ME,ave}$ (kW) prosječna snaga glavnog motora te je dobivena umnoškom snage glavnog motora i prosječnog opterećenja u iznosu od 56 % što je prikazano sljedećom jednadžbom:

$$P_{ME,ave} = P_{ME} \cdot 0,56 \quad (2)$$

Što se tiče prosječne snage pomoćnih motora, iznos se izračunava sljedećom jednadžbom:

$$P_{AE,ave} = P_{ME,ave} \cdot 0,388 \quad (3)$$

Ukupna energetska potrošnja broda računa se na godišnjoj razini po sljedećem izrazu:

$$EC_A = P_{ME,ave} \cdot t_{ME,A} + P_{AE,ave} \cdot t_{AE,A} \quad (4)$$

gdje je $t_{ME,A}$ operativno vrijeme glavnog motora na godišnjoj razini i iznosi 1200 sati, a $t_{AE,ave}$ operativno vrijeme pomoćnog motora također na godišnjoj razini te iznosi 3000 sati [1]. Potrebe za energijom za svaki razmatrani alternativni pogonski sustav jednake su onima za postojeći brod koji koristi dizelski pogon. Trenutno su svi ribarski brodovi u Hrvatskoj u potpunosti pokretani dizelskim gorivom čija je godišnja potrošnja, $FC_{D,A}$, izračunata sljedećom jednadžbom:

$$FC_{D,A} = EC_A \cdot SFC_D \quad (5)$$

gdje je SFC_D (kg/kWh) specifična potrošnja dizelskog goriva te iznosi 0,190 kg/kWh.

3. MATEMATIČKI MODELI ZA ODREĐIVANJE CJELOŽIVOTNIH TROŠKOVA BRODSKOG ENERGETSKOG SUSTAVA

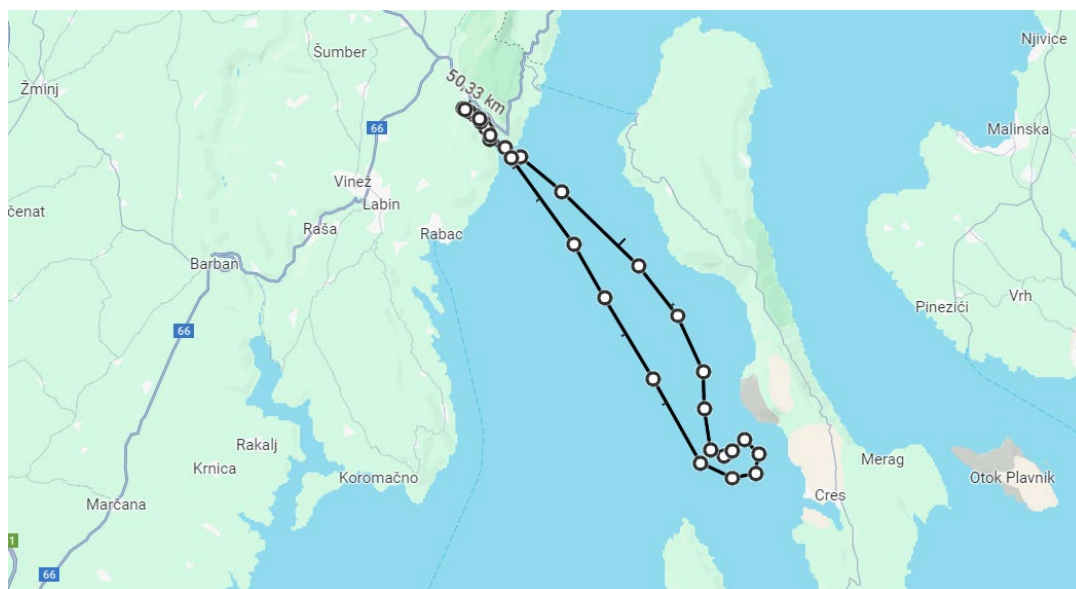
Kako bi se pružio uvid u isplativost različitih konfiguracija energetske sustava koji koriste alternativna goriva, provedene su LCCA analize koje razmatraju ukupne troškove životnog ciklusa tih konfiguracija tijekom vijeka trajanja broda. Ukupni troškovi konfiguracije energetske sustava uključuju investicijske i eksploatacijske troškove te je struktura prikazana na Slici 5. Investicijski troškovi odnose se na troškove nabave konfiguracije energetske sustava (npr. cijena motora, cijena konverzije, cijena baterija, itd.), dok eksploatacijski troškovi uključuju tri vrste troškova: troškove goriva koje se koristi u energetske sustavu, troškove održavanja zajedno s troškovima zamjene glavnih dijelova energetske sustava te troškove ugljičnih emisija. Iako cijena ugljika još nije uvedena u brodarsku industriju, ona je predmet aktualnih istraživanja, dok su neki sektori, poput industrije, zrakoplovstva i elektroenergetskog sektora, već usvojili ovaj sustav. Tvrtke primaju ili kupuju dozvole za emisiju koje mogu međusobno trgovati prema potrebi. Svaka dozvola daje pravo na emitiranje jedne tone CO₂, glavnog stakleničkog plina, ili ekvivalentne količine dvaju snažnijih stakleničkih plinova, N₂O i perfluorouglikovodika (PFC). Na kraju svake godine, tvrtka mora predati dovoljno dozvola da pokrije sve svoje emisije, inače se suočava s visokim kaznama. Ako tvrtka smanji svoje emisije, može zadržati višak dozvola za buduće potrebe ili ih prodati drugoj tvrtki [26].



Slika 5 Podjela troškova u analizi [4]

U ovom radu je LCCA analiza izrađena isključivo pomoću programskog paketa HOMER Pro. Uz sve navedene troškove, ekonomska analiza identificirala je preostalu vrijednost sustava,

odnosno vrijednost koja ostaje u komponenti energetskog sustava na kraju životnog vijeka projekta [27]. HOMER Pro pretpostavlja linearno amortiziranje komponenti, što znači da je preostala vrijednost komponente izravno proporcionalna njenom preostalom vijeku trajanja te ovisi o trošku zamjene. U ovom su radu prikazane usporedbe između plivaričara sa dizelskim pogonskim sustavom, hibridnim pogonskim sustavom, sa plug-in hibridnim pogonskim sustavom te u potpunosti električnim pogonskim sustav. S obzirom da se u radu istražuju različiti oblici elektrifikacije, rezultati su ilustrirani na plivaričaru kod kojeg je dizelski motor osnovni i jedini pogonski sustav, što služi kao temeljni scenarij za usporedbu. U ovom su poglavlju navedene ulazne postavke za cjeloživotnu analizu troškova razmatranih izvedbi pogonskog sustava plivaričara, no u provedenom proračunu pojedine su ulazne postavke identične pa su stavke koje se ponavljaju kroz proračun prikazane također u ovom poglavlju, počevši od tijeka rada te rute na kojoj plivaričar plovi u svom operativnom periodu. Iz podataka dobivenih iz programskog paketa MAPON utvrđena je ruta po kojoj se temeljio daljnji proračun te je prikazana na Slici 6. Plivaričar isplovljava iz Plomin Luke u Istarskoj županiji te plovi jugoistočno prema otoku Cresu. Operaciju izvršava na udaljenosti od 5 do 10 kilometara od obale otoka Cresa te se nakon kraja izlova vraća natrag u Plomin Luku.



Slika 6 Prikaz rute plivaričara

Nadalje, vrijednost diskontne stope za proračun iznosi 8 %, vrijednost stope inflacije iznosi 2 %, vrijednost godišnjeg manjka kapaciteta iznosi 1 % te životni vijek projekta iznosi 25 godina te su isti za svaku inačicu proračuna. U Tablici 3. prikazan je raspored opterećenja plivaričara

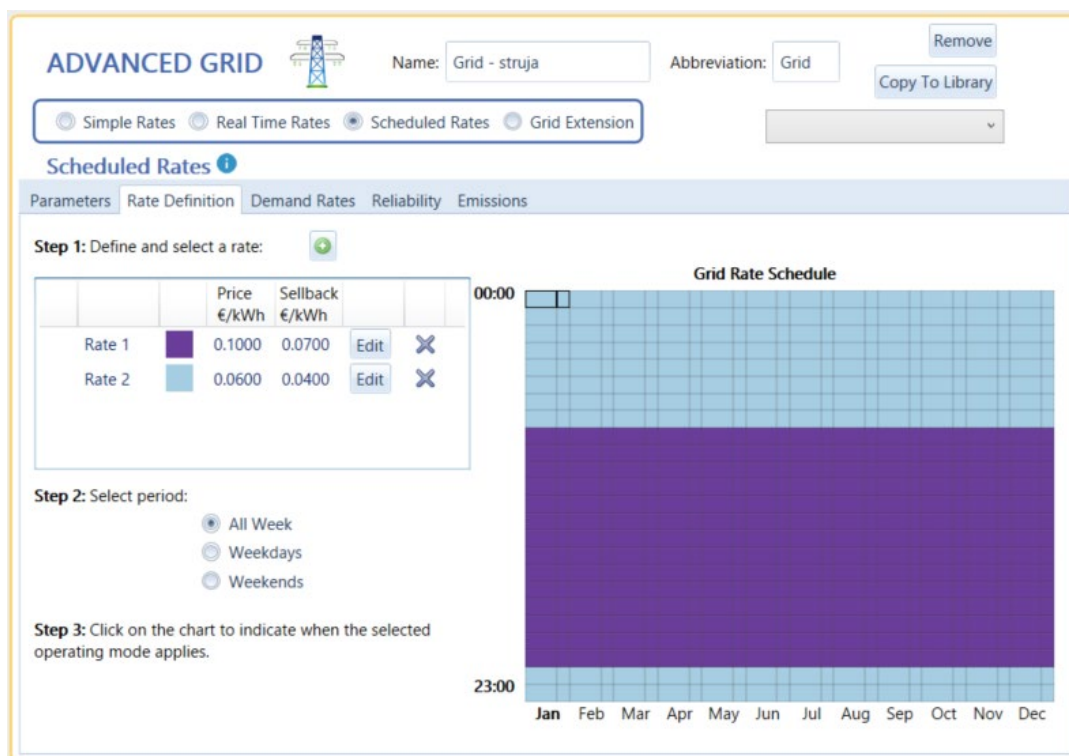
za svaki dan u godini. Raspored opterećenja je modeliran prema uobičajenom rasporedu rada plivaričara koji je prikazan na Slici 4 te prema dobivenoj ruti promatranog plivaričara stoga je raspored rada unesen u programski paket na način da je kroz svaki sat definiran zahtjev opterećenja u obliku kilovata koji prati rad plivaričara. Naime, plivaričaru je od 05:00 do 08:00 potrebno 400 kW snage pogonskog sustava budući da plovi od mjesta izlova natrag prema luci. Nadalje, dok je vezan u luci, od 08:00 do 17:00, potrebno je osigurati 30 kW za održavanje raznih sustava u funkciji. Od 17:00 do 20:00, brod plovi iz luke prema mjestu izlova te mu je ponovno potrebno 400 kW snage pogonskog sustava te od 20:00 do 05:00 obavlja izlov ribe te se pretpostavlja da mu je za tu aktivnost potrebno 50 kW.

Tablica 3 Raspored opterećenja plivaričara

Sat	Opterećenje (kW)
00:00	50
01:00	50
02:00	50
03:00	50
04:00	50
05:00	400
06:00	400
07:00	400
08:00	30
09:00	30
10:00	30
11:00	30
12:00	30
13:00	30
14:00	30
15:00	30
16:00	30
17:00	400
18:00	400
19:00	400
20:00	50
21:00	50
22:00	50
23:00	50

Temeljna stavka ovog proračuna jest opterećenje motora pa je važno odrediti svakoj od mogućih opcija isto opterećenje kako bi rezultati bili vjerodostojni i usporedivi. Cijena goriva

je određena po aktualnoj cijeni plavog dizela u Republici Hrvatskoj pa je u obzir uzeta cijena od 0,83 € po litri plavog dizela [28]. Što se tiče električne energije, ulazni podaci prikazani su na Slici 7.



Slika 7 Ulazni podaci električne energije

U obzir je uzeto ljetno računanje vremena te su tako i modelirane dvije opcije cijena električne energije – dnevna tarifa i noćna tarifa koja je jeftinija, no obzirom da je razmatrani plivaričar u luci teoretski samo preko dana, u proračunu je uzeta cijena od 0,10 €/kWh [29]. Dodatno, odabrani glavni dizelski motor je isti za sve ispitane slučajeve te je modeliran u programskom paketu HOMER Pro prema karakteristikama glavnog dizel motora ispitano plivaričara. Detalji glavnog dizelskog motora nalaze se u Tablici 4.

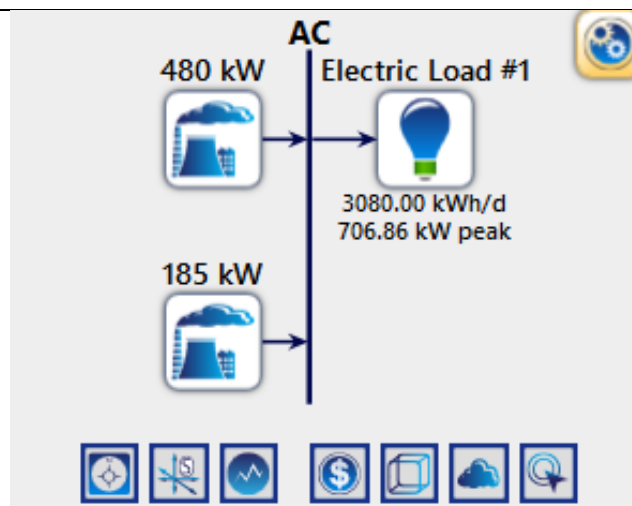
Tablica 4 Ulazni podaci glavnog dizelskog motora

Snaga, P (kW)	480
Potrošnja goriva, F_0 (l/h/kW)	0,244

Emisija ugljikovog monoksida, E_{CO} (g/(l _{goriva}))	13,566
Emisija dušikovih oksida, E_{NOx} (g/(l _{goriva}))	2,6
Početna investicija (€)	86.400,00
Cijena zamjene (€)	86.400,00
Održavanje i eksploatacija (€/h)	3
Životni vijek (h)	15.000

3.1.1. LCCA plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima

Pogon na dizelsko gorivo predstavlja ključnu tehnologiju u sektoru prometa i industriji zbog svoje pouzdanosti, učinkovitosti i specifičnih karakteristika. U programskom paketu HOMER Pro, izrađen je matematički model za cjeloživotnu analizu troškova te je na Slici 8 prikazana shema zadanog pogonskog sustava. Za analizu bilo je potrebno odabrati pomoćni generator snage 185 kW uz glavni dizelski motor u svrhu uspješnog i neometanog rada pogonskog sustava te je modeliran u programskom paketu HOMER Pro prema karakteristikama pomoćnog dizel generatora ispitanog plivaričara. Rad glavnog dizelskog motora ograničen je donjom granicom odnosno da tako što je zadano minimalno moguće opterećenje od 50 % pa je time u programskom paketu određeno da se pri izlovu ribe te bivanju u luci pali samo pomoćni generator od 185 kW. Detalji pomoćnog generatora nalaze se u Tablici 5.

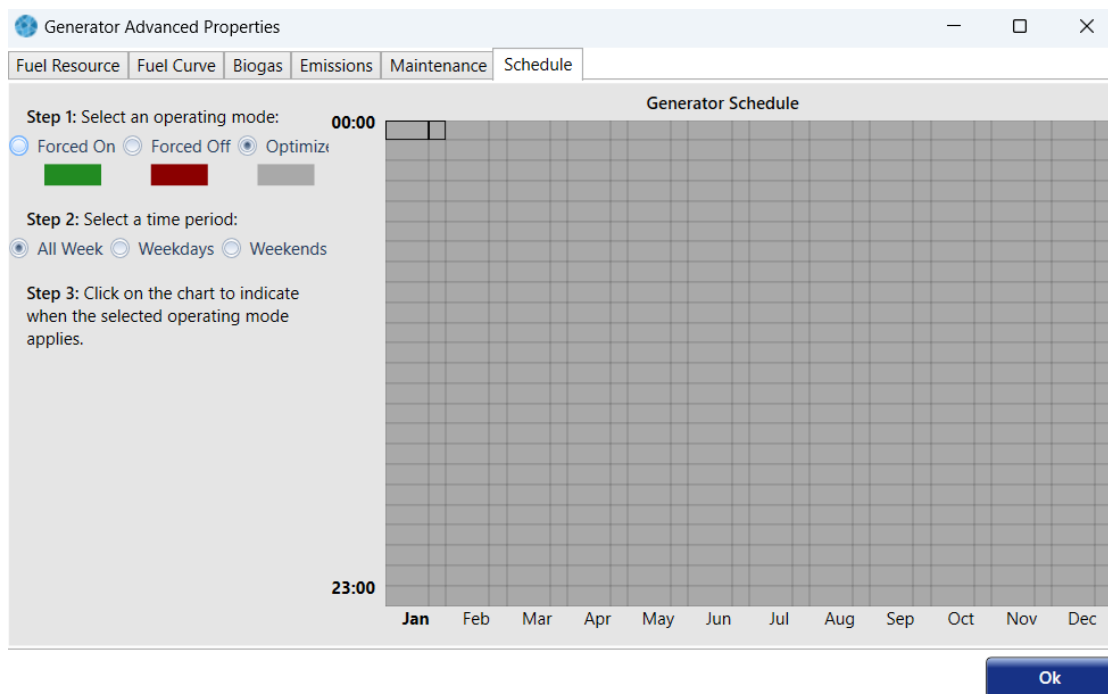


Slika 8 Shematski prikaz sustava pogonjenim dizelskim gorivom

Tablica 5 Detalji pomoćnog generatora

Snaga, P (kW)	185
Potrošnja goriva, F_o (l/h/kW)	0,253
Emisija ugljikovog monoksida, E_{CO} (g/(l _{goriva}))	17,794
Emisija dušikovih oksida, E_{NOx} (g/(l _{goriva}))	1,4235
Početna investicija (€)	33.300,00
Cijena zamjene (€)	33.300,00
Održavanje i eksploatacija (€/h)	1,1
Životni vijek (h)	15.000

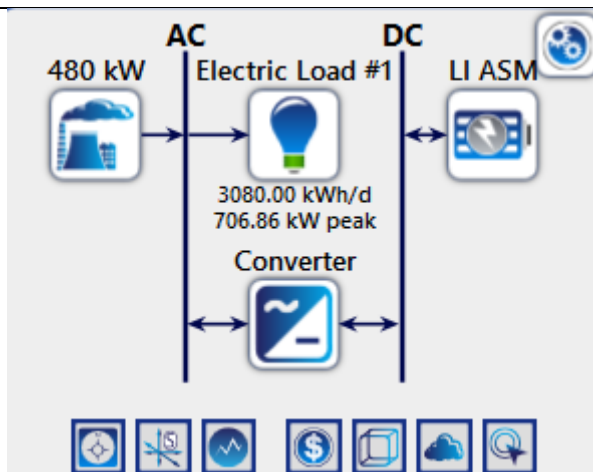
Raspored rada dizelskog motora je prikazan na Slici 9. Odabrana je opcija *Optimized* kako bi programski paket optimizirao rad dvaju dizelskih motora, odnosno rasteretio veći dizelski motor i time smanjio potrošnju goriva tokom operativnog perioda.



Slika 9 Raspored rada dizel motora

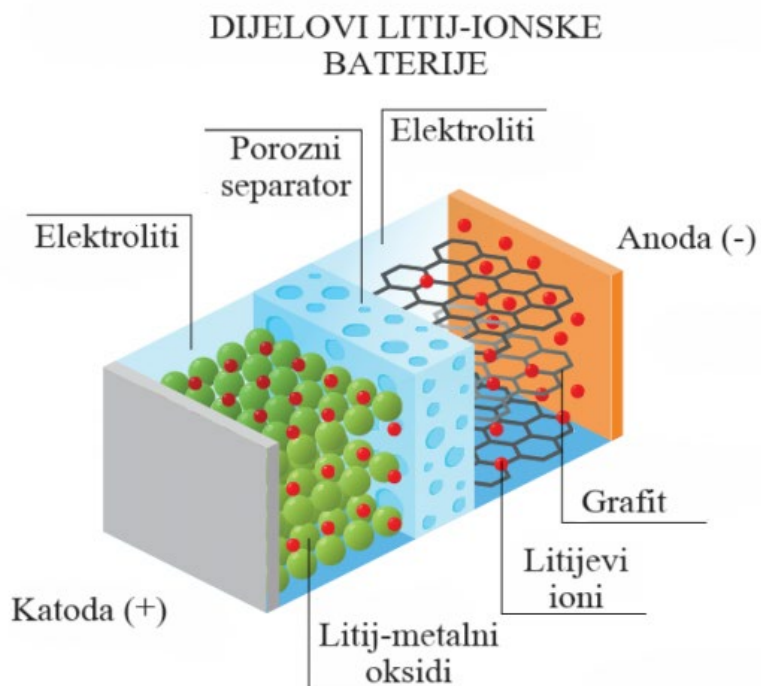
3.1.2. *LCCA plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom*

U svrhu smanjenja potrošnje goriva te smanjenja emisija stakleničkih plinova, sve više se poseže za opcijom ugradnje baterije kao dodatnog pogonskog izbora te rasterećenja glavnog dizel generatora. Sustavi za upravljanje energijom automatski optimiziraju korištenje dostupnih izvora energije, osiguravajući da se brodovi kreću sa smanjenim onečišćenjem i većom učinkovitošću. U hibridnoj izvedbi pogonskog sustava baterija se puni pomoću glavnog dizel generatora, u ovom slučaju pomoću dizel generatora snage 480 kW te je shema ove izvedbe prikazana na Slici 10. Vidljivo je kako se hibridna izvedba sastoji od glavnog dizel generatora, litij-ionske (Li-ion) baterije i pretvarača koji se sastoji od ispravljača i invertera. Početna investicija i zamjena pretvarača iznose 300,00 €/kWh.



Slika 10 Shematski prikaz hibridnog sustava pogona

Odabrana je Li-ion baterija iz ponude korištenog programskog paketa te je optimizirana pomoću opcije *Advanced Storage Module* (ASM) koja omogućava optimizaciju baterije prema zahtjevima opterećenja te tako modelira traženu bateriju za zadani pogonski sustav. Također, ASM uzima u obzir i serijski otpor, učinke temperaturnih promjena na kapacitet baterije, učinke temperaturnih promjena na stopu degradacije baterije te cikličku degradaciju temeljenu na dubini pražnjenja (eng. *Depth of Discharge*, DoD). Podaci o odabranoj bateriji navedeni su u Tablici 6 gdje su tehnički podaci preuzeti iz programskog paketa. Li-ion baterije predstavljaju naprednu tehnologiju koja koristi litijeve ione kao ključnu komponentu. Ime su dobile zbog kretanja litijevih iona između negativne elektrode (anode) i pozitivne elektrode (katode) tijekom pražnjenja, te u suprotnom smjeru tijekom punjenja. Između dviju elektroda nalazi se separator, a cijeli sustav je uronjen u elektrolit koji omogućuje kretanje iona. Ključna razlika između Li-ion baterija i litij-polimernih baterija leži u vrsti elektrolita. Litij-polimernske baterije dolaze u različitim oblicima, najpoznatiji od kojih je srebrna plastika korištena u mobilnim uređajima [30]. Na Slici 11 je prikazana struktura litij-ionske baterije.



Slika 11 Struktura litij-ionske baterije [31]

Tablica 6 Podaci o odabranoj bateriji

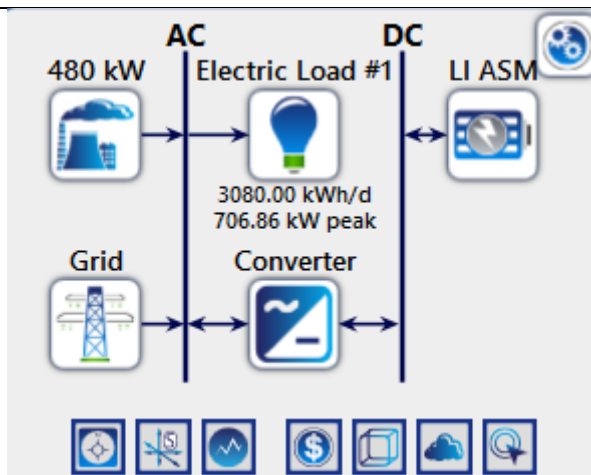
Nazivni napon baterijske ćelije (V)	3,7
Nazivni kapacitet baterijske ćelije (kWh)	1,02
Maksimalni kapacitet baterijske ćelije (Ah)	276
Početna investicija (€/kWh) [1]	250
Zamjena (€/kWh) [1]	150
Održavanje i eksploatacija (€/godina) [1]	12,50
Minimalni životni vijek (godina)	4

Početno stanje napunjenosti (%)	100
Minimalno stanje napunjenosti (%)	40
Granica degradacije kapaciteta (%)	20

Raspored rada glavnog dizel generatora je prikazan na Slici 9. Odabran je prikazani raspored rada budući da je glavni dizel generator zadužen kao glavni izvor pogona, ali i punjenja baterije, stoga je odabrana opcija *Optimized* kako bi tokom cijelog rasporeda dizel generator imao mogućnost biti upaljen radi pravilnog rada sustava.

3.1.3. *LCCA plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom*

Najveća razlika između plug-in izvedbe i obične hibridne izvedbe jest da se u plug-in verziji baterija puni na način da se spoji na obližnju električnu mrežu, u ovom slučaju električnu mrežu luke u kojoj je brod vezan. Plug-in hibridni brodovi predstavljaju inovativan pristup u pomorskoj industriji, kombinirajući konvencionalne dizelske ili plinske motore s električnim pogonom i mogućnošću punjenja putem električnih utičnica [32]. Ova tehnologija omogućuje brodovima da koriste električnu energiju za manevriranje u lukama, smanjujući emisije plinova stakleničkog učinka i lokalne onečišćujuće tvari kao što su dušikovi oksidi i čestice [33]. Prednosti plug-in hibridnih brodova uključuju smanjenje buke i vibracija tijekom vožnje u električnom režimu, što može biti ključno u urbanim lukama gdje je važna zaštita okoliša i udobnost putnika [32]. Također, ova tehnologija pruža mogućnost korištenja konvencionalnog pogona za dulje vožnje ili putovanja izvan luka, osiguravajući pouzdanost i doseg bez potrebe za čestim punjenjem [34]. Implementacija plug-in hibridnih brodova potiče pomorsku industriju da postane ekološki osvještenija i prilagođava se strožim propisima o emisijama. Shema navedene izvedbe prikazana je na Slici 12.

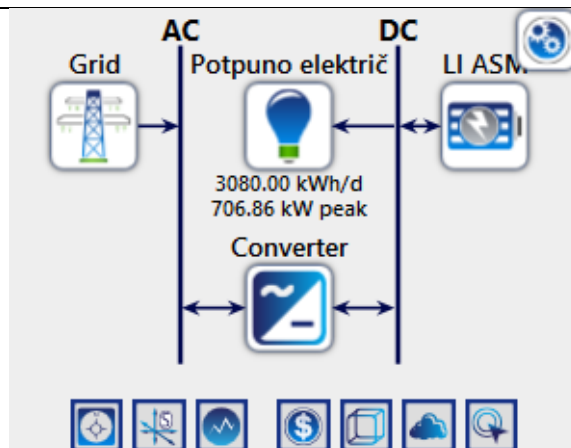


Slika 12 Shematski prikaz plug-in hibridnog sustava pogona

Također, ovaj slučaj sadrži i bateriju opisanu u odjeljku 3.1.2, no u ovoj se izvedbi baterija puni spajanjem na električnu mrežu luke u kojoj je brod vezan stoga je i dodana opcija *Grid* koja predstavlja električnu mrežu. Detalji električne mreže prikazani su na Slici 7 u poglavlju 3. Uz to, u ovom je slučaju također korišten pretvarač.

3.1.4. *LCCA potpuno električnog plivaričara*

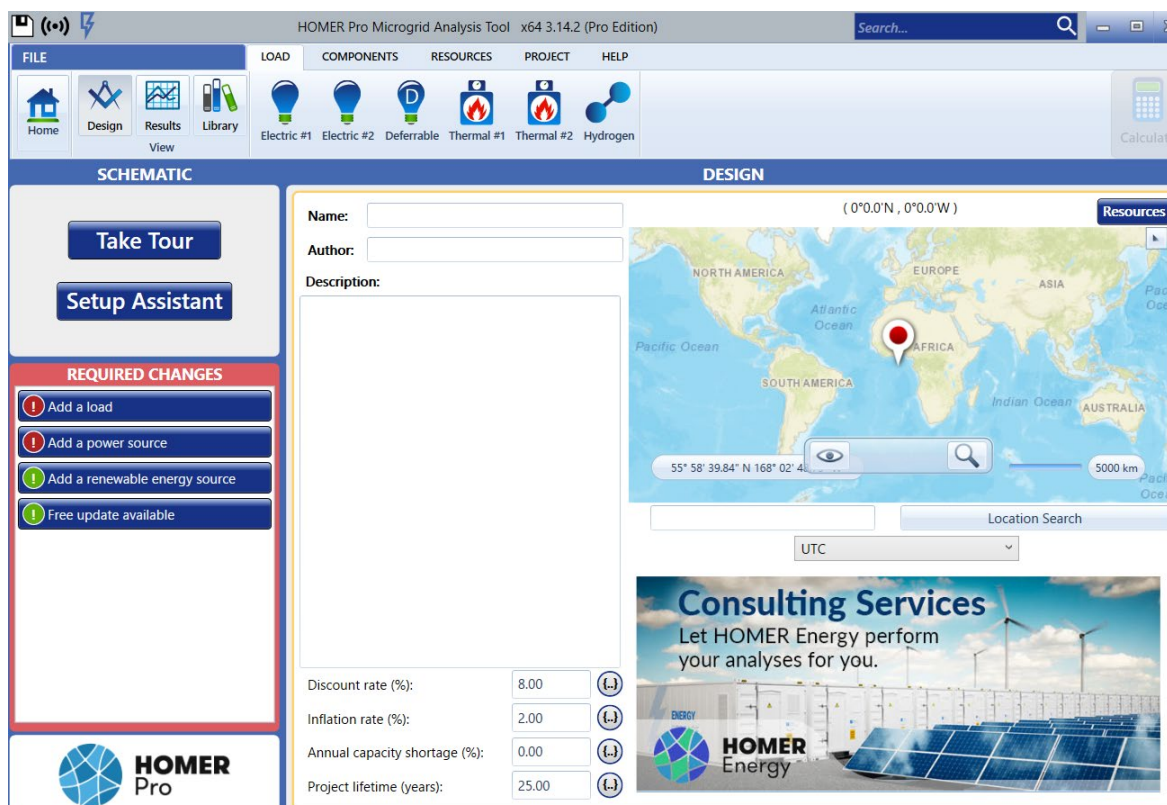
Potpuno električni brodski pogonski sustavi predstavljaju revolucionarni napredak u pomorskoj tehnologiji, transformirajući način na koji brodovi koriste energiju i smanjuju svoj ekološki utjecaj [35]. Umjesto tradicionalnih dizelskih motora, ovi sustavi koriste električne motore koji su pokretani energijom iz baterijskih sustava [36]. Ova tehnologija omogućuje brodovima da plove bez direktnog korištenja fosilnih goriva, što značajno smanjuje emisije stakleničkih plinova, čestica i buke [37]. Glavni elementi potpuno električnih brodskih pogonskih sustava uključuju napredne baterijske tehnologije koje se pune u luci ili putem obnovljivih izvora energije poput solarnih ili vjetroelektrana [38]. Ovi sustavi pružaju visoku energetska učinkovitost i omogućuju tihi rad, čime su idealni za upotrebu u urbanim lukama i ekološki osjetljivim područjima [37]. Jedan od najvećih izazova baterija jest njena veličina, naročito kad se radi o isključivo električno pogonjenom brodu. Baterije koje su potrebne za pogon električnih brodova mogu dodati značajnu težinu i zapreminu, što može utjecati na ukupnu nosivost i stabilitet broda. To može zahtijevati prilagodbe u konstrukciji broda kako bi se kompenzirale dodatne težine baterija. U ovom slučaju je za analizu za potrebe pogona uzeta samo baterija te je shema ove izvedbe prikazana na Slici 13.



Slika 13 Shematski prikaz potpuno električnog pogona

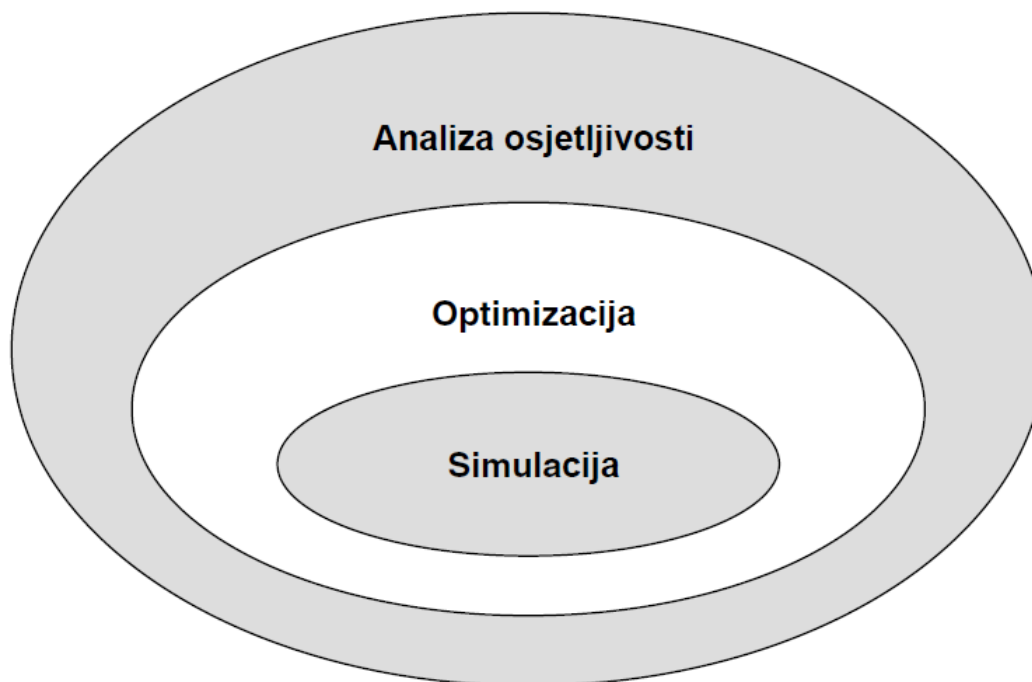
4. OPIS KORIŠTENOG PROGRAMSKOG PAKETA

Programski paket korišten za proračunski dio ovog rada jest HOMER Pro (eng. *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*). Radi se o sofisticiranom alatu za analizu mikromreža koji je razvijen od strane Nacionalnog laboratorija za obnovljivu energiju (eng. *National Renewable Energy Laboratory, NREL*) [39], [40]. Dizajniran je za modeliranje i optimizaciju dizajna mikromreža i distribuiranih energetske sustava, procjenjujući ekonomsku i tehničku izvedivost uključivanja različitih obnovljivih i neobnovljivih izvora energije. Softver simulira rad mikromreže tijekom duljih razdoblja kako bi uzeo u obzir varijabilnost u potražnji i opskrbi energijom. Jedna od glavnih prednosti programskog paketa HOMER Pro leži u njegovim optimizacijskim sposobnostima, koje imaju potpunu mogućnost minimizacije ukupnih troškova sustava, uključujući kapitalne, zamjenske, operativne troškove i troškove održavanja te troškove goriva [39], [40]. Osim toga, HOMER Pro omogućuje provođenje analiza osjetljivosti, omogućujući korisnicima da procijene utjecaj promjena cijena goriva, rasta potrošnje ili dostupnosti obnovljivih izvora na performanse i ekonomičnost sustava. Na Slici 14 je prikazano početno korisničko sučelje programskog paketa HOMER Pro.



Slika 14 Korisničko sučelje programskog paketa HOMER Pro

Programski paket podržava integraciju obnovljivih izvora energije kao što su solarna energija, vjetroelektrana i hidroenergija uz tradicionalne generatore i sustave za pohranu energije [41]. Njegova svestranost proteže se na modeliranje sustava povezanih s mrežom i izvan mreže, što ga čini vrijednim alatom za dizajniranje otpornijih i ekonomičnijih energetske rješenja u različitim primjenama. HOMER Pro obavlja tri glavne zadaće: simulaciju, optimizaciju i analizu osjetljivosti. Tijekom procesa simulacije, HOMER Pro modelira rad određene konfiguracije mikrosustava svakog sata tijekom godine kako bi odredio tehničku izvedivost i trošak životnog ciklusa [40], [41]. U procesu optimizacije, HOMER Pro procjenjuje brojne konfiguracije sustava kako bi pronašao onu koja zadovoljava tehničke uvjete uz najniži trošak životnog ciklusa. Proces analize osjetljivosti uključuje provođenje više optimizacija pod različitim ulaznim pretpostavkama kako bi se procijenio utjecaj nesigurnosti ili promjena u ulaznim podacima modela [40], [42]. Analiza osjetljivosti, s druge strane, procjenjuje učinke nekontroliranih varijabli, poput prosječne brzine vjetra ili budućih cijena goriva, pomažući u razumijevanju utjecaja tih nesigurnosti na rad i troškove sustava [42]. U ovom se radu programski paket HOMER Pro koristio u svrhu predviđanja i određivanja ukupnih troškova broda nakon 25 godina uz zadanu stopu popusta, inflacije te godišnji nedostatak kapaciteta. Slika 15 prikazuje odnos između simulacije, optimizacije i analize osjetljivosti. Elipsa optimizacije obuhvaća oval simulacije, što simbolizira činjenicu da jedna optimizacija uključuje više simulacija. Slično tome, oval analize osjetljivosti obuhvaća oval optimizacije, jer jedna analiza osjetljivosti uključuje više optimizacija [40], [42].



Slika 15 Konceptualni odnos između simulacije, optimizacije i analize osjetljivosti [42]

4.1. Simulacija

Osnovna sposobnost programskog paketa HOMER Pro je simulacija dugoročnog rada određenog mikrosustava. Njegove naprednije funkcije, optimizacija i analiza osjetljivosti, oslanjaju se na ovu sposobnost simulacije. Proces simulacije utvrđuje kako će određena konfiguracija sustava, koja uključuje kombinaciju komponenti specifičnih veličina i strategiju rada koja definira njihovu međusobnu interakciju, funkcionirati u određenom okruženju tijekom dugog vremenskog razdoblja. HOMER Pro može simulirati širok raspon konfiguracija mikrosustava, uključujući bilo koju kombinaciju fotonaponskog (eng. *photovoltaic*, PV) sustava, jedne ili više vjetroturbina, hidro-turbine s protočnom vodom, do tri generatora, baterije, ispravljača, uređaja za elektrolizu i spremnika za pohranu vodika. Sustav može biti povezan s mrežom ili može biti autonoman te može opsluživati električne potrošače istosmjernje i izmjenične struje, kao i toplinske potrošače. Proces simulacije u programskom paketu HOMER Pro ima dvije glavne svrhe. Prvo, procjenjuje izvedivost sustava određujući može li adekvatno zadovoljiti električne i toplinske potrebe te ispuniti sve korisnički postavljene uvjete. Drugo, izračunava trošak životnog ciklusa sustava, koji obuhvaća ukupne troškove instalacije i rada tijekom njegovog vijeka trajanja. Ovaj trošak životnog ciklusa pruža korisnu mjeru za usporedbu ekonomske izvedbe različitih konfiguracija sustava [42].

4.2. Optimizacija

Dok proces simulacije modelira specifičnu konfiguraciju sustava, proces optimizacije identificira najbolju konfiguraciju sustava. U HOMER-u je optimalna konfiguracija sustava ona koja zadovoljava korisnički definirane uvjete uz najniži ukupni smanjeni trošak. Ovaj proces uključuje određivanje idealnog omjera komponenti, njihovih veličina ili količina, te strategije upravljanja radom sustava. Tijekom optimizacije, HOMER Pro simulira brojne konfiguracije sustava, odbacuje one koje ne zadovoljavaju uvjete, rangira izvedive prema ukupnom diskontiranom trošku i predstavlja konfiguraciju s najnižim ukupnim smanjenim troškom kao optimalno rješenje. Cilj procesa optimizacije je odrediti optimalnu vrijednost svake varijable odluke koja zanima korisnika. Varijabla odluke je varijabla nad kojom korisnik sustava ima kontrolu i za koju programski paket može razmotriti više mogućih vrijednosti u svom procesu optimizacije. Moguće varijable uključuju:

- veličinu PV niza,
- broj vjetroturbina,
- prisutnost hidroelektrane (HOMER Pro može razmotriti samo jednu veličinu hidroelektrane; odluka je stoga hoće li sustav uključivati hidroelektranu ili ne),
- veličinu svakog generatora,
- broj baterija,
- veličinu ispravljača,
- veličinu uređaja za elektrolizu,
- veličinu spremnika vodika,
- strategiju upravljanja (skup pravila koja definiraju rad sustava) [42].

4.3. Analiza osjetljivosti

U ovom dijelu pojašnjen je proces analize osjetljivosti, pri kojem HOMER Pro provodi višestruke optimizacije koristeći različite skupove ulaznih parametara za svaku optimizaciju [39]. Analiza osjetljivosti otkriva kako promjene u ulaznim vrijednostima utječu na konačne rezultate. Korisnik unosi različite vrijednosti za jednu ulaznu varijablu, koja se naziva varijabla osjetljivosti. Skoro svaka numerička ulazna varijabla u programskom paketu HOMER Pro koja nije odlučujuća varijabla može biti varijabla osjetljivosti, poput cijene električne energije iz mreže, cijene goriva, kamatne stope ili vijeka trajanja fotonaponskog sustava [39], [40]. Analiza osjetljivosti može se provesti s bilo kojim brojem varijabli osjetljivosti, gdje svaka kombinacija

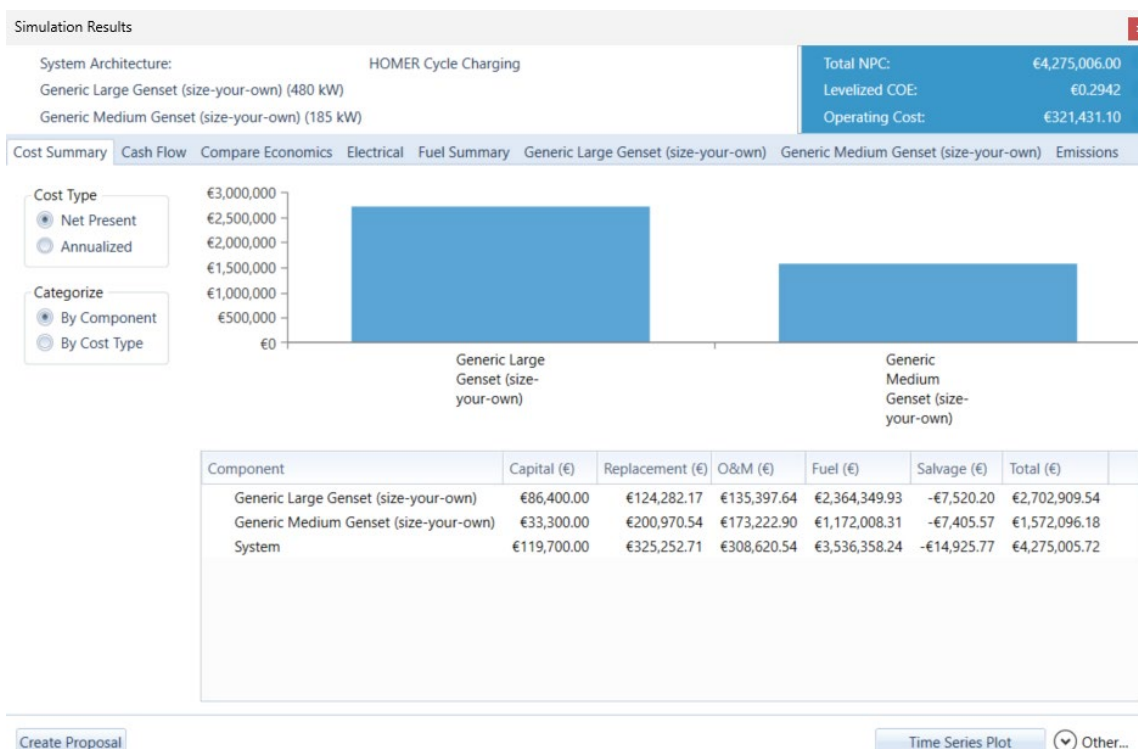
tih vrijednosti predstavlja jedinstven slučaj osjetljivosti. Na primjer, ako korisnik unese šest vrijednosti za cijenu električne energije iz mreže i četiri za kamatnu stopu, nastaje 24 različita slučaja osjetljivosti [40]. HOMER Pro zatim provodi zasebnu optimizaciju za svaki slučaj i prikazuje rezultate u raznim tabličnim i grafičkim formatima [40]. Cilj analize osjetljivosti je upravljanje nesigurnostima; ako korisnik nije siguran u točnu vrijednost neke varijable, može unijeti nekoliko mogućih vrijednosti koje pokrivaju očekivani raspon i promatrati kako te promjene utječu na rezultate [41].

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon definiranih matematičkih modela cjeloživotne analize troškova, koja podrazumijeva vremenski raspored opterećenja, pogonske izvore, cijene goriva i električne energije, programski paket HOMER Pro provodi cjeloživotnu analizu troškova za sve vrste analiziranih izvedbi pogonskih sustava.

5.1. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima

Na isplativost plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima utječu sljedeće stavke: početna investicija, cijena zamjene, održavanje i eksploatacija te preostala vrijednost. Na Slici 16 je prikazan rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog isključivo dizel motorima. U ovom slučaju na ukupne troškove najviše utječu troškovi goriva, točnije plavog dizela koji iznose 82,7 % ukupnog troška. Ostalih 17,3 % se odnose na početnu investiciju, zamjenu te troškove održavanja dvaju motora. Iako je pomoćni dizelski motor slabiji, sa Slike 16 je vidljivo kako je on više korišteniji što dokazuju troškovi održavanja koji su veći od troškova održavanja glavnog dizel motora unatoč cijeni održavanja koja je za glavni dizelski motor 3 €/h dok za pomoćni motor ista vrsta troškova iznosi 1,1 €/h dok je najmanji trošak početna investicija pomoćnog dizel motora.



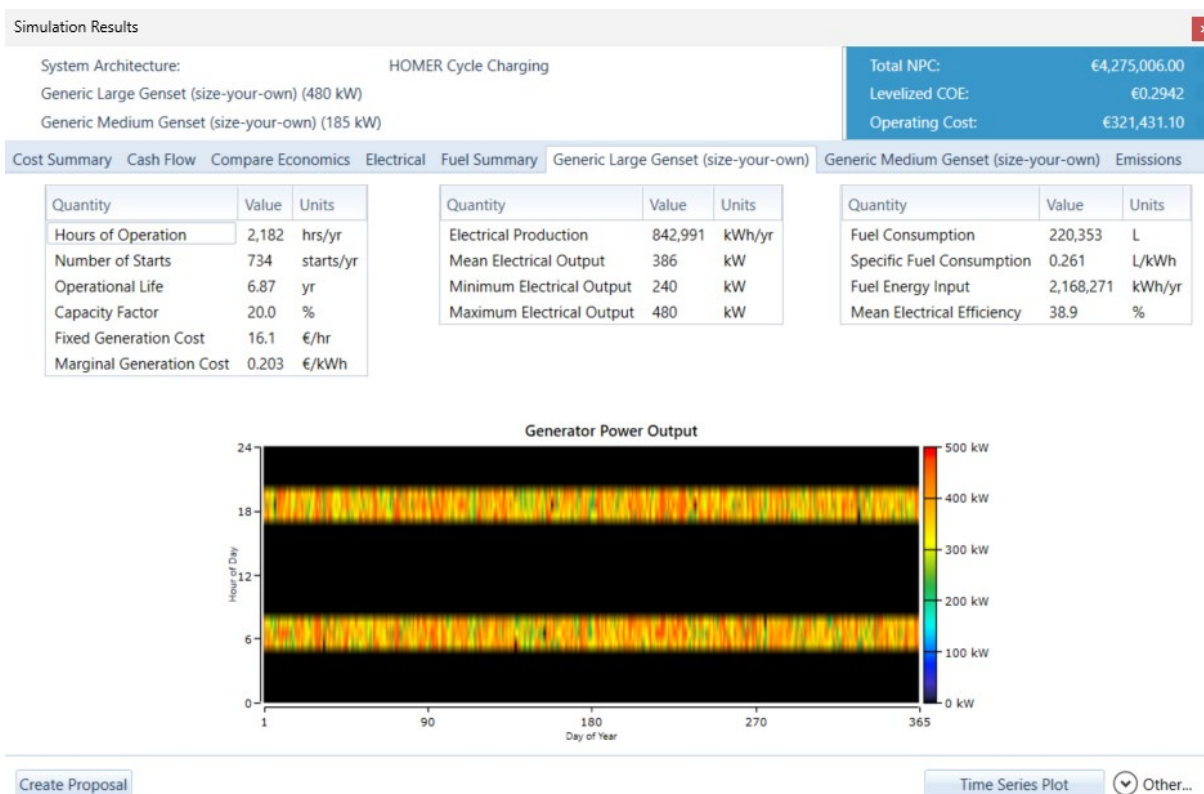
Slika 16 Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog isključivo dizelskim motorima

Na Slici 17 prikazani su izlazni podaci o potrošnji goriva.



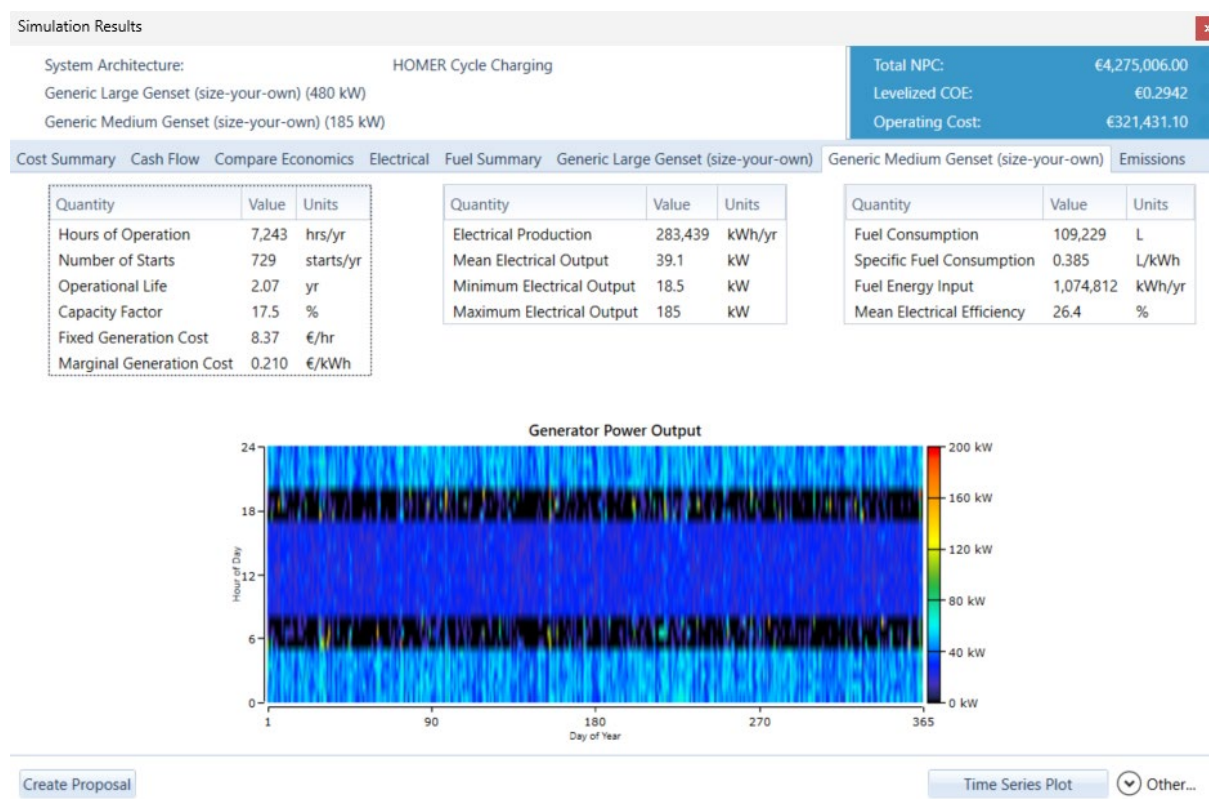
Slika 17 Izlazni podaci o potrošnje goriva

Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru prikazani su na Slici 19.



Slika 18 Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru

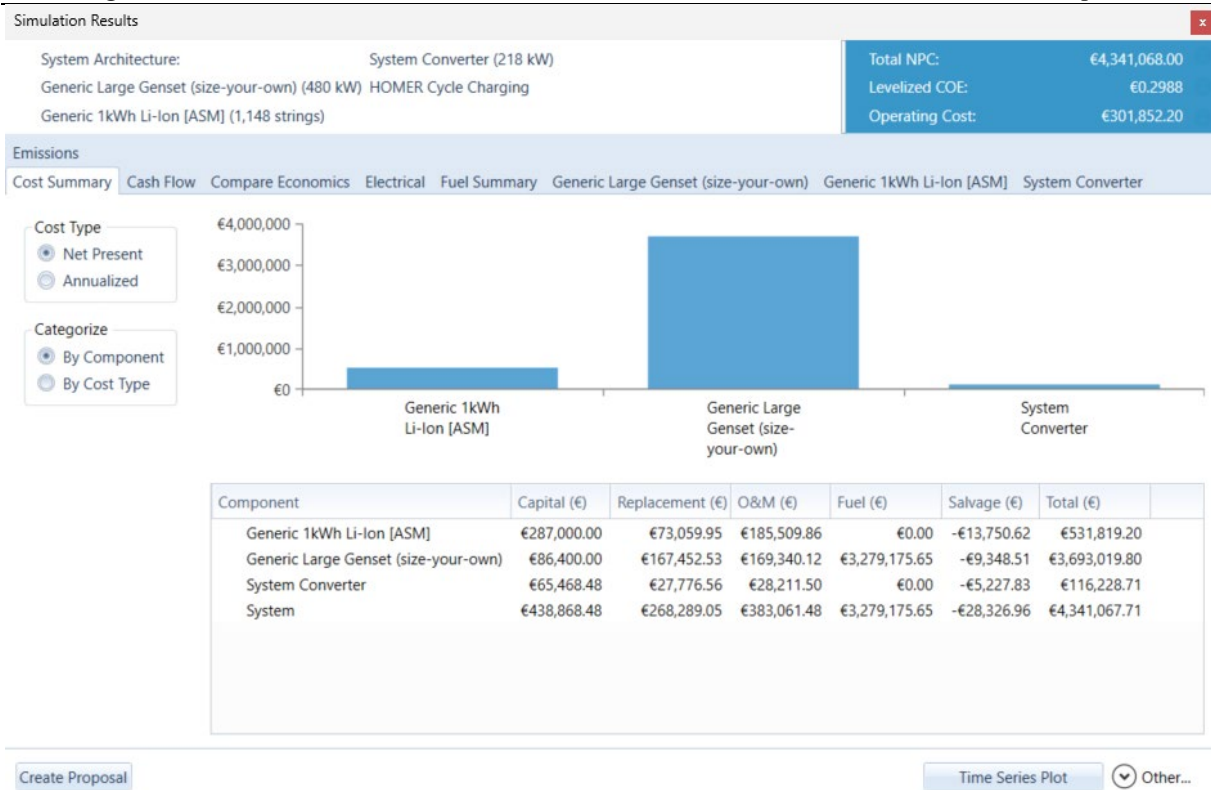
Izlazni podaci o pomoćnom dizel generatoru su prikazani na Slici 19.



Slika 19 Izlazni podaci o pomoćnom dizel generatoru

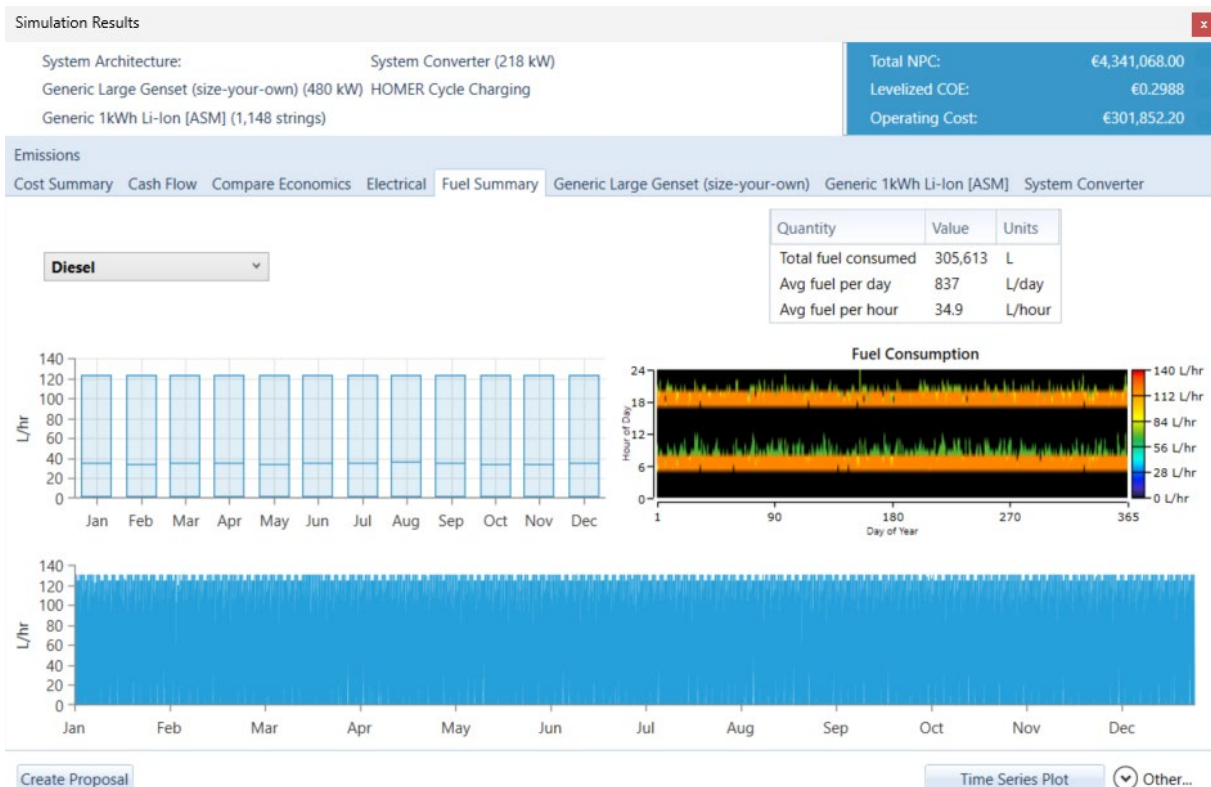
5.2. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom

Na isplativost hibridnog pogonskog sustava plivaričara utječu sljedeće stavke: početna investicija, cijena zamjene, održavanje i eksploatacija te preostala vrijednost. Na Slici 20 su prikazani rezultati raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom. Slično kao i kod sustava sa isključivo dizelskim motorima, najveći dio troškova otpada na troškove goriva, točnije 75,5 %.



Slika 20 Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog hibridnim sustavom

Na Slici 21 prikazani su izlazni podaci o potrošnji goriva.



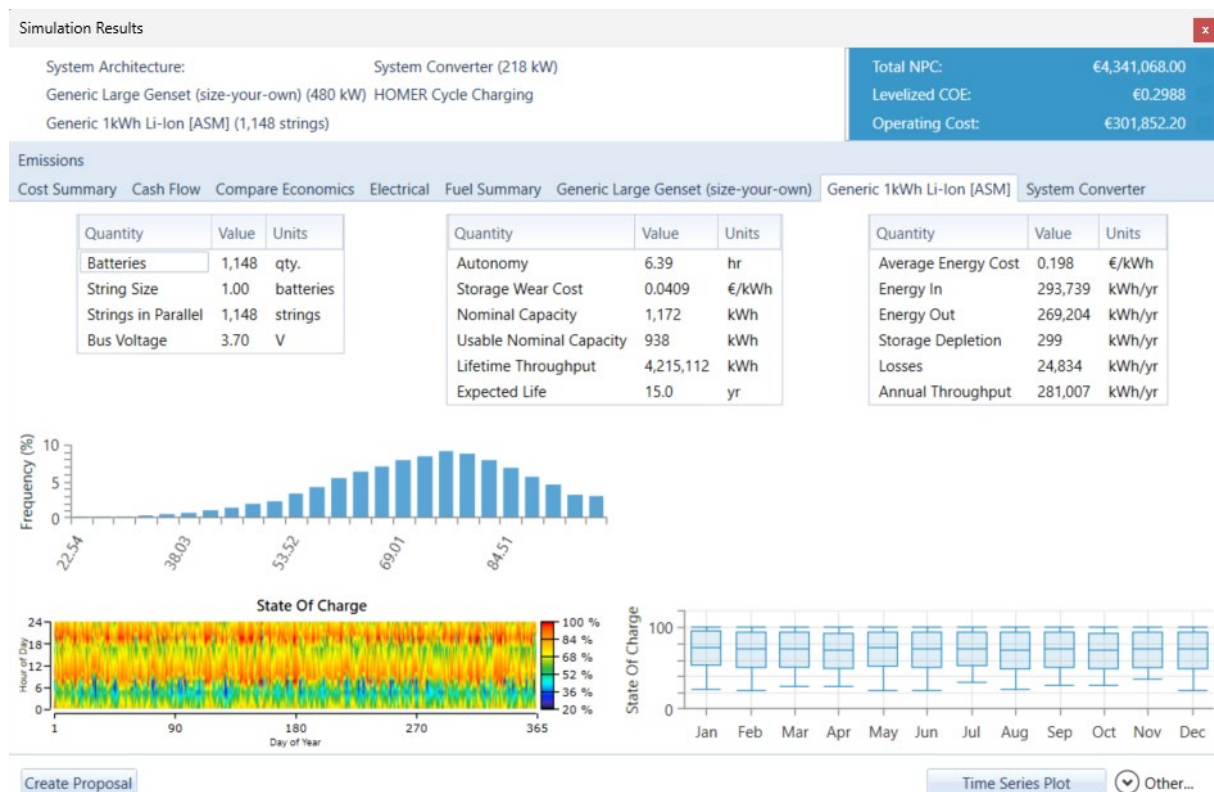
Slika 21 Izlazni podaci o potrošnje goriva

Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru prikazani su na Slici 22.



Slika 22 Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru

Izlazni podaci o bateriji prikazani su na Slici 23.

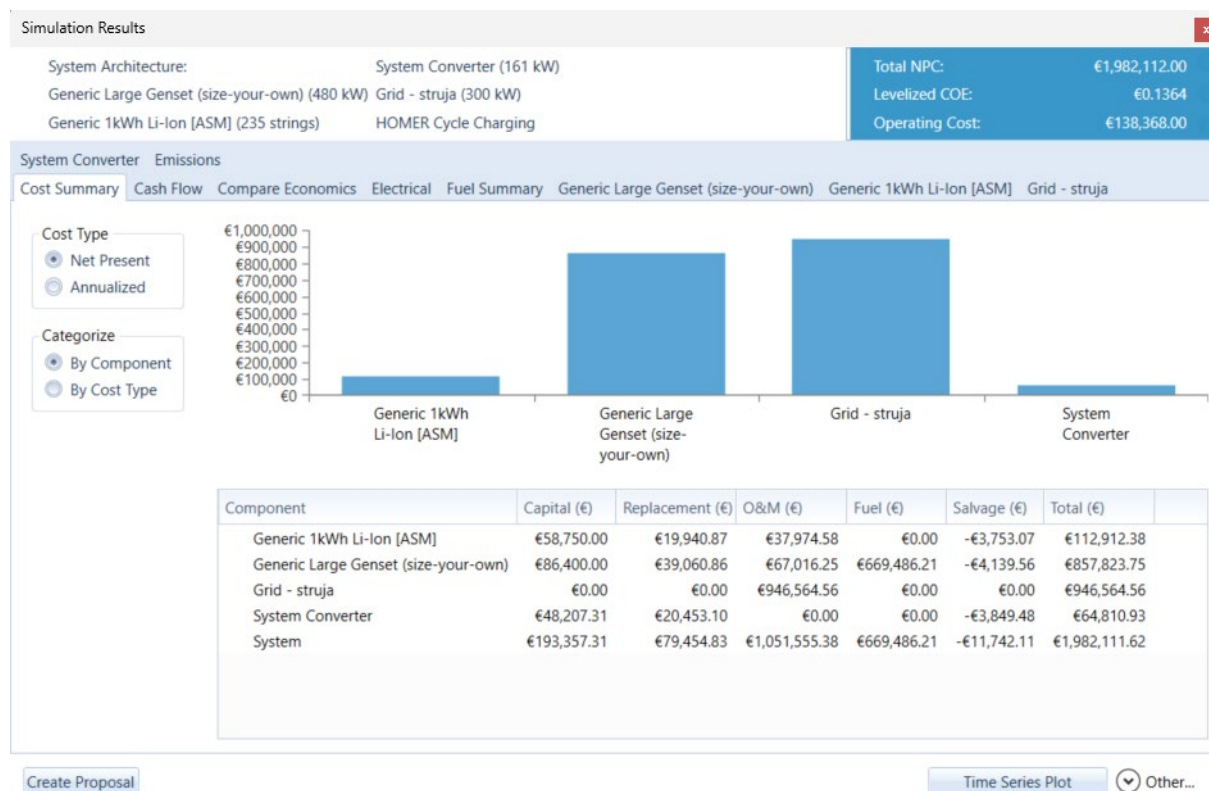


Slika 23 Izlazni podaci o bateriji

U slučaju hibridne izvedbe, programski paket je optimizirao pogonski sustav na način da je dimenzionirao bateriju koja se sastoji od 1148 ćelije, odnosno 1172 kWh nazivnog kapaciteta koja zajedno sa dizel generatorom sudjeluje u pogonu broda.

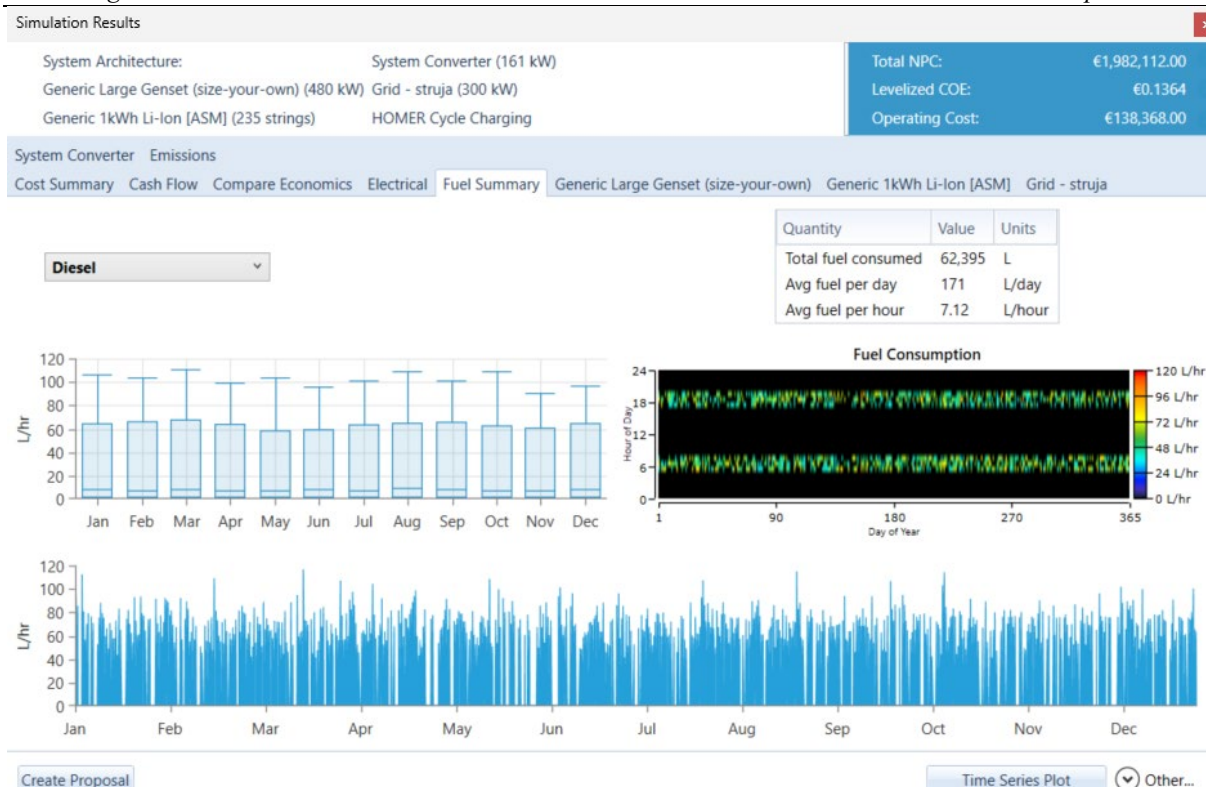
5.3. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom

Obzirom da je kod plug-in hibridnog sustava baterija punjena spajanjem na električnu mrežu u luci, potrebno je uzeti u obzir i troškove električne energije osim troškova goriva kao što je prikazano na Slici 24. Primjetno je kako troškovi električne energije iznose 47,5 % ukupnih troškova dok je utjecaj troškova plavog dizela smanjen na 33,7 % ukupnih troškova kroz promatrani ciklus.



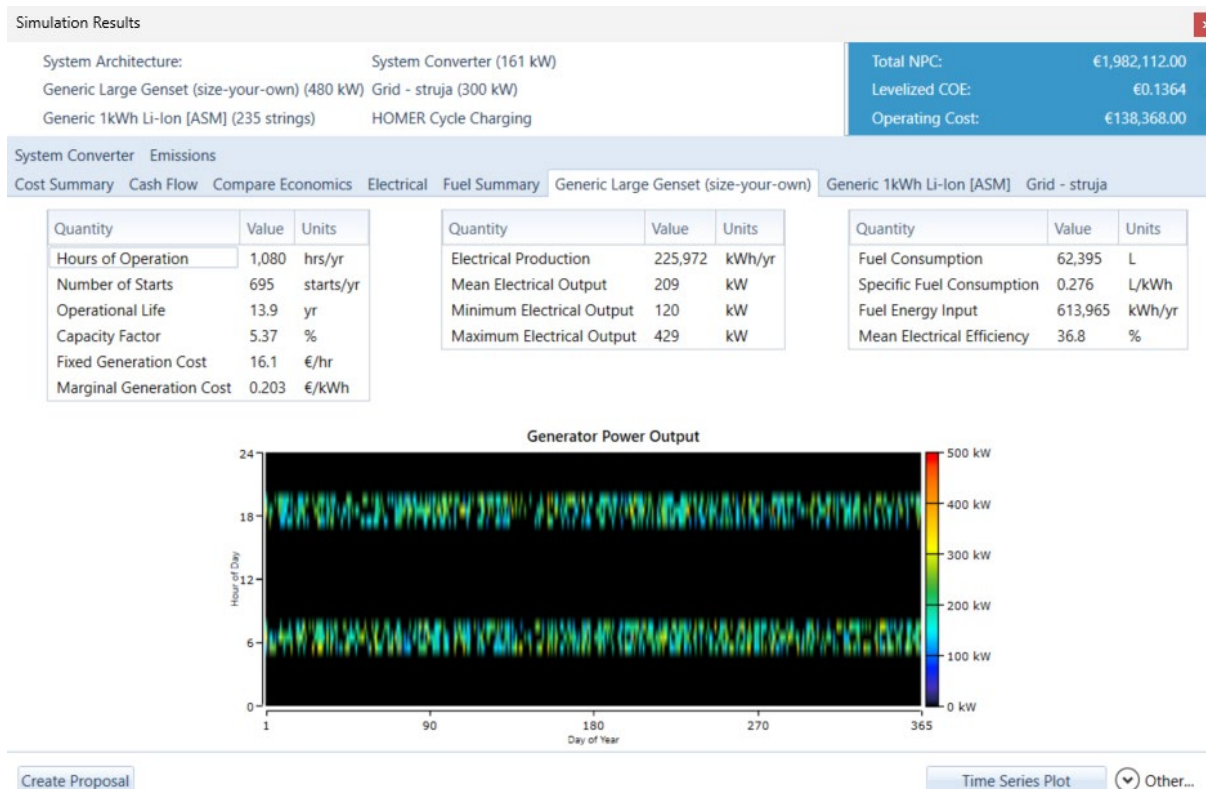
Slika 24 Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog plug-in hibridnim sustavom

Izlazni podaci o potrošnji goriva prikazani su na Slici 25.



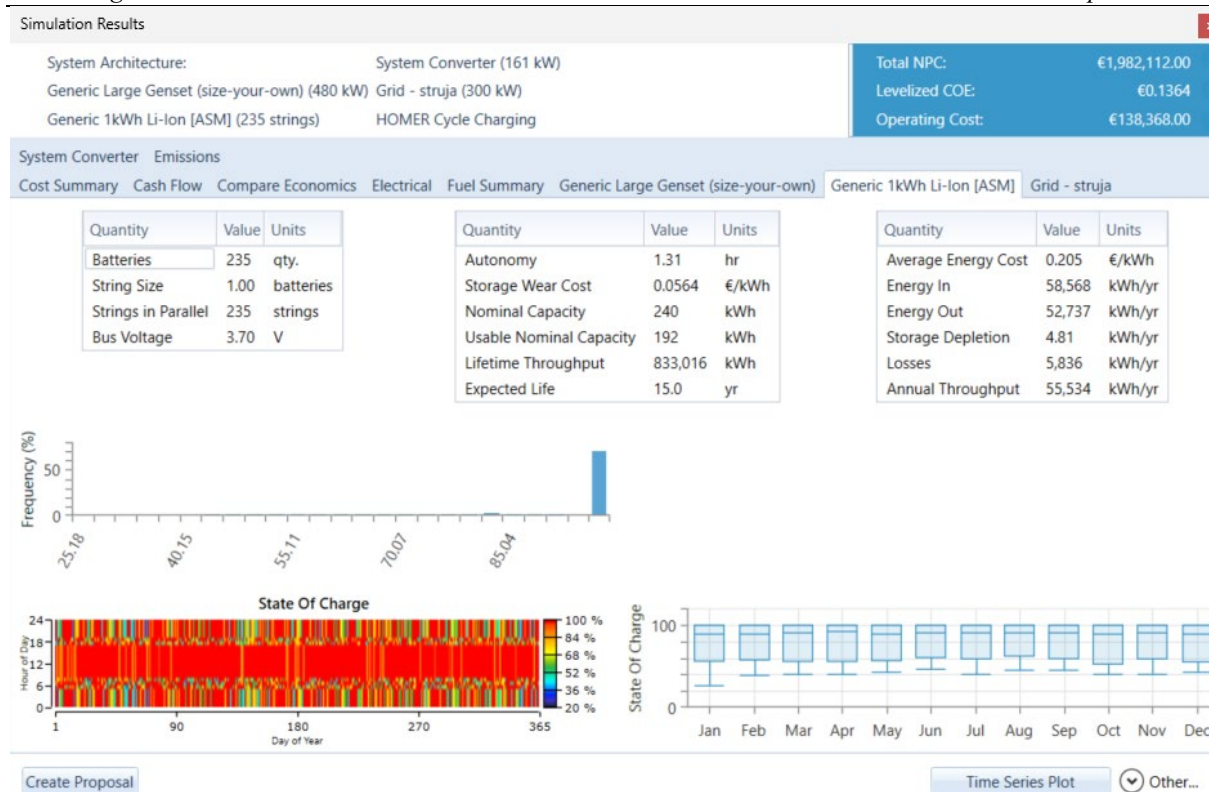
Slika 25 Izlazni podaci o potrošnji goriva

Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru prikazani su na Slici 26.



Slika 26 Izlazni podaci o glavnom dizel generatoru

Izlazni podaci o bateriji prikazani su na Slici 27.

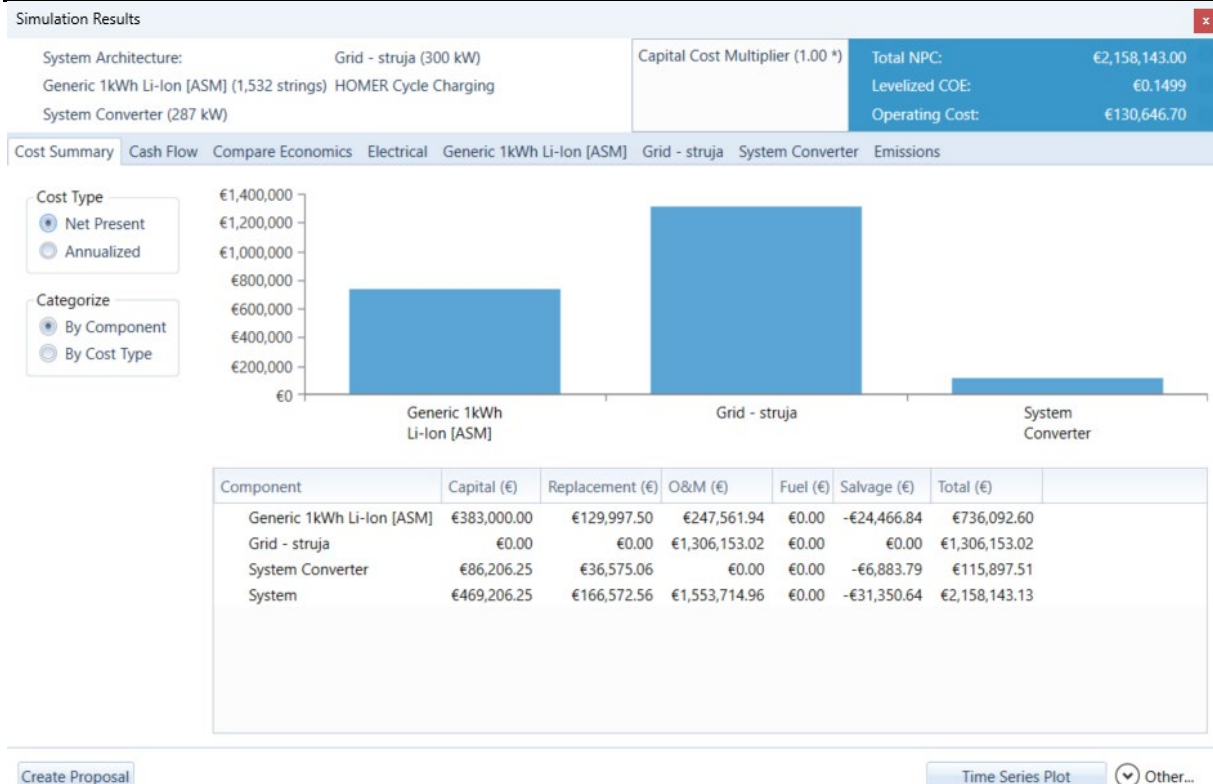


Slika 27 Izlazni podaci o bateriji

Za razliku od hibridnog sustava, baterija u plug-in izvedbi je znatno manja te se sastoji od 235 ćelije, odnosno 240 kWh nazivnog kapaciteta.

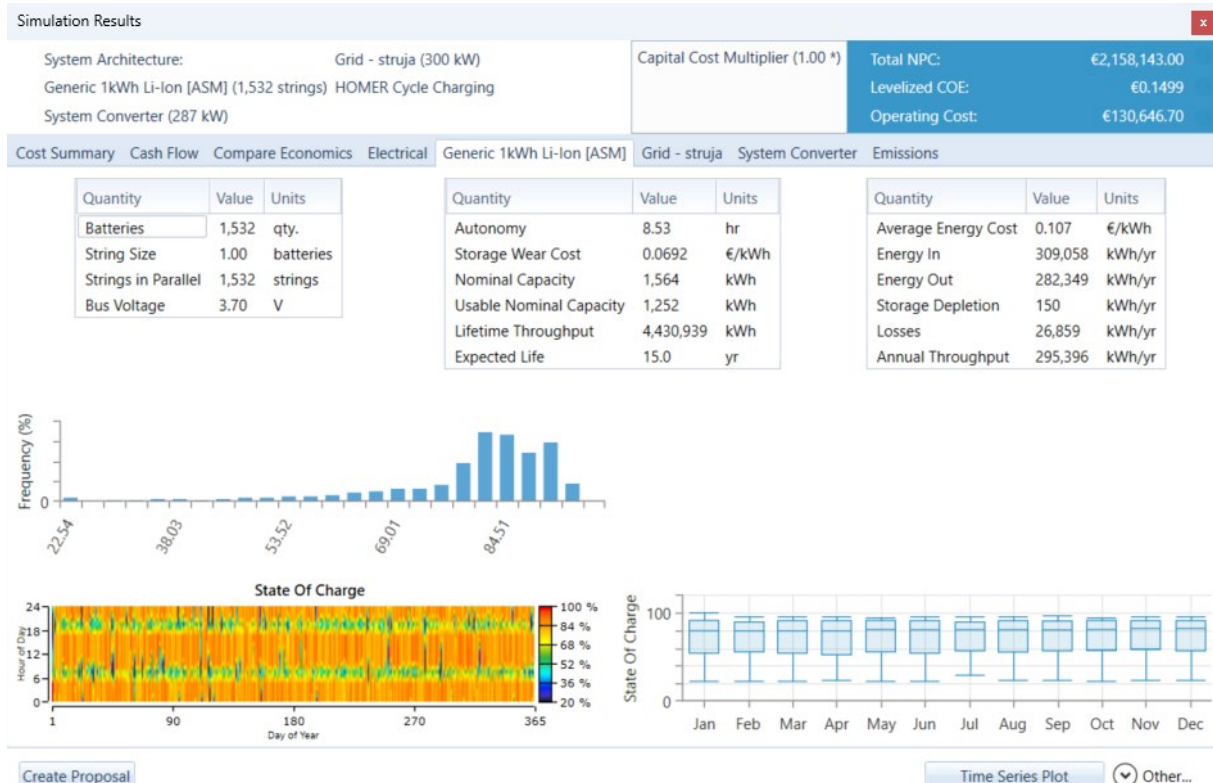
5.4. Cjeloživotni troškovi plivaričara pogonjenog isključivo električnom energijom

Potpuno električna izvedba ima samo bateriju kao pogonski sustav te tako nema potrebe za dizel motorom stoga troškova goriva i nema, već se većina ukupnog troška, točnije 60,5 %, odnosi na troškove električne energije, odnosno punjenje baterije u luci spajanjem na električnu mrežu, što je prikazano na Slici 28.



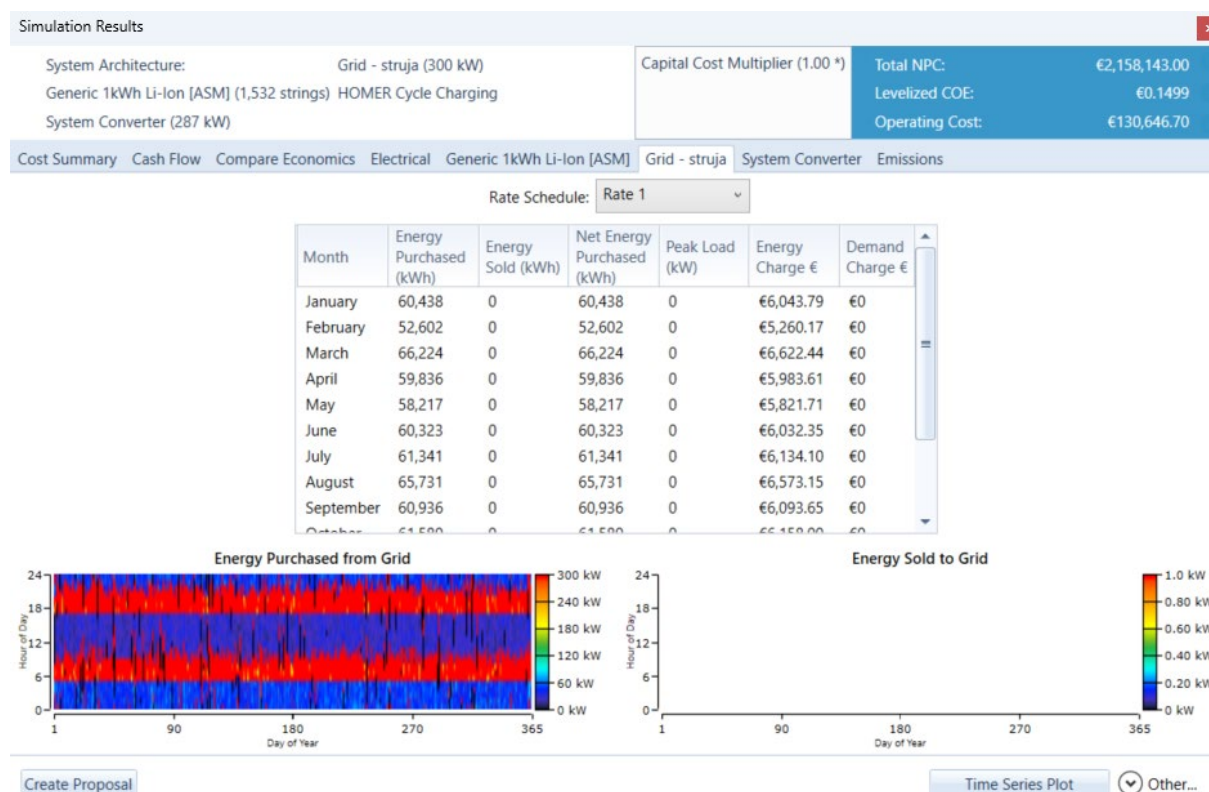
Slika 28 Rezultat raspodjele cjeloživotnih troškova plivaričara pogonjenog isključivo električnom energijom

Izlazni podaci o bateriji prikazani su na Slici 29.



Slika 29 Izlazni podaci o bateriji

Na Slici 30 su prikazani rezultati potrošnje električne energije.



Slika 30 Rezultati potrošnje električne energije

5.5. Usporedba rezultata

U ovom poglavlju su dobiveni rezultati prikazani u tablicama po vrsti rezultata. U Tablici 7 je prikazana usporedba ukupnih troškova svih izvedbi.

Tablica 7 Usporedba iznosa ukupnog troška projekta

Vrsta pogona	Iznos ukupnog troška projekta, €
Dizelski pogon	4.275.006,00
Hibridni sustav	4.341.068,00
Plug-in hibridni sustav	1.982.112,00
Potpuno električni sustav	2.158.143,00

Na temelju rezultata dobivenih iz programskog paketa HOMER Pro, vidljivo je da se ukupni troškovi projekta značajno razlikuju ovisno o vrsti pogonskog sustava za elektrifikaciju plivaričara u hrvatskom priobalnom području. Najveći ukupni trošak projekta zabilježen je za hibridni sustav, iznoseći 4.341.068,00 €, dok je najniži trošak zabilježen za plug-in hibridni

sustav s ukupnim troškom od 1.982.112,00 €. Potpuno električni sustav pokazuje srednji raspon troškova s iznosom od 2.158.143,00 €, dok dizelski sustav iznosi 4.275.006,00 €. Ovi rezultati sugeriraju da, iako hibridni i plavi dizel sustavi imaju veće početne troškove, plug-in hibridni i potpuno električni sustavi mogu dugoročno biti isplativije opcije s obzirom na smanjenje operativnih troškova i emisija stakleničkih plinova. Na Tablici 8 je prikazana usporedba troškova goriva i električne energije kroz životni ciklus dok je na Tablici 9 dana usporedba potrošnje goriva svih izvedbi.

Tablica 8 Usporedba rezultata troškova goriva i električne energije kroz životni ciklus

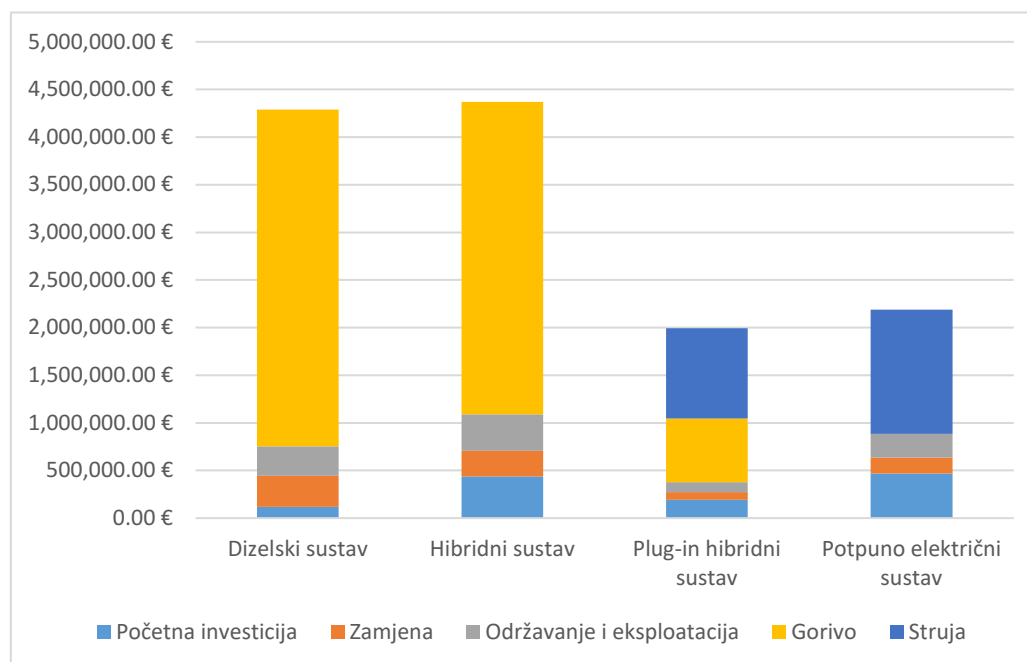
Vrsta izvedbe	Plavi dizel, €	Električna energija, €	Ukupno, €
Dizelski pogon	3.536.358,00	0	3.536.358,00
Hibridni sustav	3.279.175,65	0	3.279.175,65
Plug-in hibridni sustav	669.486,21	946.564,56	1.616.050,77
Potpuno električni sustav	0	1.306.153,02	1.306.153,02

Evidentno je da postoji značajna razlika u ukupnim troškovima ovisno o korištenom sustavu. Dizelski pogon ima najviši ukupni trošak goriva od 3.536.358,00 €, što ga čini najmanje isplativim rješenjem u dugoročnom periodu. Hibridni sustav također pokazuje visoke troškove goriva s ukupno 3.279.175,65 €. Suprotno tome, plug-in hibridni sustav, s 1.616.050,77 €, i potpuno električni sustav, s 1.306.153,02 €, pokazuju znatno niže ukupne troškove goriva i električne energije. Ovi rezultati jasno ukazuju na ekonomsku prednost elektrificiranih sustava, posebno potpuno električnog, koji ne zahtijeva troškove goriva i ujedno smanjuje operativne troškove.

Tablica 9 Usporedba rezultata potrošnje goriva kroz životni ciklus

Vrsta izvedbe	Potrošnja goriva po satu, l/sat	Ukupna potrošnja goriva, l/godina
Dizelski pogon	37,6	329.582
Hibridni sustav	34,9	305.613
Plug-in hibridni sustav	7,12	62.395
Potpuno električni sustav	0	0

Dizelski pogon ima najveću potrošnju goriva od 37,6 l/sat, što dovodi do ukupne potrošnje od 329.582 l kroz godinu dana. Hibridni sustav slijedi s nešto manjom potrošnjom od 34,9 L/sat, što rezultira ukupnom potrošnjom od 305.496 l godišnje. Plug-in hibridni sustav pokazuje znatno nižu potrošnju goriva od 7,12 l/sat i ukupno 62.395 l kroz godinu dana. Potpuno električni sustav nema potrošnju goriva, što dodatno potvrđuje njegovu superiornost u smislu energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti. Ukupni prikaz svih troškova za svaku konfiguraciju kroz životni vijek projekta prikazan je na Slici 31.



Slika 31 Prikaz ukupnih troškova različitim konfiguracija brodskog energetskog sustava kroz životni vijek projekta

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad pruža detaljnu analizu cjeloživotnih troškova različitih pogonskih sustava za plivaričare, s naglaskom na smanjenje emisija stakleničkih plinova, povećanje energetske efikasnosti te smanjenje samih troškova brodovlasnika. Provedena analiza pokazuje da, iako dizelski sustavi imaju najniže početne troškove, njihova dugoročna isplativost je manja zbog visokih operativnih troškova goriva i emisija štetnih plinova. Hibridni sustavi s druge strane, pokazuju manju isplativost zbog neznatno smanjenih troškova goriva, ali novih troškova u vidu investicije u bateriju te održavanje iste. Potpuno električni pogonski sustavi, iako trenutno suočeni s visokim troškovima baterija i infrastrukture za punjenje te ograničeni samom veličinom i masom baterije, dugoročno se pokazuju kao znatno isplativija opcija od dizelskih i hibridnih sustava zbog minimalnih operativnih troškova i značajnog smanjenja emisija. Naposljetku, plug-in hibridni sustav se pokazao kao najisplativiji sustav između četiri navedena te je za ovakav brod konfiguracija sa plug-in hibridnim sustavom pogona najbolja opcija. Elektrifikacija ribarske flote zahtijeva značajna početna ulaganja, ali donosi dugoročne ekonomske i ekološke prednosti. Implementacija obnovljivih izvora energije u kombinaciji s naprednim baterijskim sustavima, može dodatno poboljšati isplativost i održivost ovih sustava.

Iako se pomorska industrija sve više okreće prema pronalasku novih pogonskih rješenja među sustavima pogonjenim električnom energijom, situacija je u ribarskom sektoru Republike Hrvatske po tom pitanju vrlo inertna te se još uvijek o takvim rješenjima još uvijek razmišlja vrlo slabo. Uvođenjem ugljičnog poreza u bliskoj budućnosti, brodovlasnici u ribarskom sektoru će biti primorani izabrati između plaćanja visokih kazni, konverzije plovila iz dizelskog pogonskog sustava u jedan od hibridnih kako bi poštivali regulativu ili pak kupnju novog plovila.

LITERATURA

- [1] M. Perčić, N. Vladimir, M. Koričan, I. Jovanović, and T. Haramina, “Alternative Fuels for the Marine Sector and Their Applicability for Purse Seiners in a Life-Cycle Framework,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 24, Art. no. 24, Jan. 2023, doi: 10.3390/app132413068.
- [2] R. Cassia, M. Nocioni, N. Correa-Aragunde, and L. Lamattina, “Climate Change and the Impact of Greenhouse Gases: CO₂ and NO_x, Friends and Foes of Plant Oxidative Stress,” *Front. Plant Sci.*, vol. 9, p. 273, Mar. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.00273.
- [3] “The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26 | UNFCCC.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>
- [4] M. Perčić, N. Vladimir, and A. Fan, “Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia,” *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115848, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115848.
- [5] “Initial IMO GHG Strategy.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [6] M. Perčić, M. Koričan, I. Jovanović, and N. Vladimir, “Environmental and economic assessment of batteries for marine applications: Case study of all-electric fishing vessels,” *Batteries*, vol. 10, pp. 1–17, Dec. 2023, doi: 10.3390/batteries10010007.
- [7] G. Barone, A. Buonomano, G. Del Papa, R. Maka, and A. Palombo, “Approaching zero emissions in ports: implementation of batteries and supercapacitors with smart energy management in hybrid ships,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 314, p. 118446, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118446.
- [8] A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, “Optimal energy management in series hybrid electric vehicles,” in *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)*, Jun. 2000, pp. 60–64 vol.1. doi: 10.1109/ACC.2000.878772.
- [9] “Analysis of Energy Conversion Efficiency in Parallel and Series Hybrid Powertrains | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4356917>
- [10] “Decarbonising the fishing sector: Energy efficiency measures and alternative energy solutions for fishing vessels | Panel for the Future of Science and Technology (STOA) | European Parliament.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU\(2023\)740225](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2023)740225)
- [11] B. Jeong, H. Wang, E. Oguz, and P. Zhou, “An effective framework for life cycle and cost assessment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 187, pp. 111–130, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.184.
- [12] “Life-cycle assessment and life-cycle cost assessment of power batteries for all-electric vessels for short-sea navigation - ScienceDirect.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222007988>
- [13] H. Wang, E. Boulougouris, G. Theotokatos, P. Zhou, A. Priftis, and G. Shi, “Life cycle analysis and cost assessment of a battery powered ferry,” *Ocean Eng.*, vol. 241, p. 110029, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110029.
- [14] “Fuel performance and carbon footprint of the global purse seine tuna fleet - ScienceDirect.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614004776>

- [15] “Energy performance of fishing vessels and potential savings - ScienceDirect.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652613003429>
- [16] “Fuel consumption of global fishing fleets: current understanding and knowledge gaps - Parker - 2015 - Fish and Fisheries - Wiley Online Library.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/faf.12087>
- [17] V. R. Kurniawati, “Sustainable development of fishing operations : a case study focusing on small vessels in Palabuhanratu, Indonesia,” Thesis, Newcastle University, 2019. Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4630>
- [18] “Fishing methods and gear types | Marine Stewardship Council,” MSC International - English. Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.msc.org/what-we-are-doing/our-approach/fishing-methods-and-gear-types>
- [19] “National Oceanic and Atmospheric Administration.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/>
- [20] S. Jafarzadeh, N. Paltrinieri, I. B. Utne, and H. Ellingsen, “LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach,” *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 50, pp. 202–222, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.trd.2016.10.032.
- [21] M. Koričan, M. Perčić, N. Vladimir, N. Alujević, and A. Fan, “Alternative Power Options for Improvement of the Environmental Friendliness of Fishing Trawlers,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/jmse10121882.
- [22] D. Tumara, I. Sutlović, and P. Raos, “Metodologija izračuna emisije ugljikovog dioksida,” *Proc. 13th Nat. Gas Heat Water Conf. Int. Nat. Gas Heat Water Conf.*, p. 108, 2015.
- [23] R. Parker *et al.*, “Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries,” *Nat. Clim. Change*, vol. 8, pp. 333–337, Apr. 2018, doi: 10.1038/s41558-018-0117-x.
- [24] “HRB web izvještaj / CRS web reports.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <http://report.crs.hr/hrbwebreports/Default.aspx>
- [25] M. Grmača, “Određivanje potrošnje goriva na brodovima,” info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2023. Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:139631>
- [26] M. Perčić, I. Ančić, and N. Vladimir, “Life-cycle cost assessments of different power system configurations to reduce the carbon footprint in the Croatian short-sea shipping sector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, p. 110028, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110028.
- [27] G. P. Cachon and A. G. Kök, “Implementation of the Newsvendor Model with Clearance Pricing: How to (and How Not to) Estimate a Salvage Value,” *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 9, no. 3, pp. 276–290, Jul. 2007, doi: 10.1287/msom.1060.0145.
- [28] “Pregled cijena,” INA, d.d. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.ina.hr/kupci/veleprodaja-i-narucivanje/privatni-korisnici/pregled-cijena/>
- [29] “CROATIAN ENERGY EXCHANGE - CROATIAN ENERGY EXCHANGE Ltd. - cropex.hr.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.cropex.hr/en/>
- [30] I. Beljan, “Litij-ionske baterije,” info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek. Department of Power Engineering. Chair of Power Plants and Energy Processes, 2021. Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:388155>

- [31] “How does a lithium-Ion battery work? - Let’s Talk Science.” Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-explained/how-does-a-lithium-ion-battery-work>
- [32] P. Wu, J. Partridge, and R. Bucknall, “Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships,” *Appl. Energy*, vol. 275, p. 115258, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115258.
- [33] Z. Jianyun, C. Li, X. Lijuan, and W. Bin, “Bi-objective optimal design of plug-in hybrid electric propulsion system for ships,” *Energy*, vol. 177, pp. 247–261, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.079.
- [34] C. Savard, A. Nikulina, C. Méchemmène, and E. Mokhova, “The Electrification of Ships Using the Northern Sea Route: An Approach,” *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 6, no. 1, p. 13, Mar. 2020, doi: 10.3390/joitmc6010013.
- [35] Y. Ma, Z. Wang, H. Liu, H. Tang, Y. Ji, and F. Han, “Efficient and sustainable power propulsion for all-electric ships: An integrated methanol-fueled SOFC-sCO₂ system,” *Renew. Energy*, vol. 230, p. 120822, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120822.
- [36] S. Guo, Y. Wang, L. Dai, and H. Hu, “All-electric ship operations and management: Overview and future research directions,” *eTransportation*, vol. 17, p. 100251, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.etrans.2023.100251.
- [37] “Fully electric ship propulsion reduces airborne noise but not underwater noise - ScienceDirect.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824009533>
- [38] M. Koričan, L. Frković, and N. Vladimir, “Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables,” *J. Clean. Prod.*, vol. 425, p. 138997, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138997.
- [39] A. Singh, P. Baredar, and B. Gupta, “Computational Simulation & Optimization of a Solar, Fuel Cell and Biomass Hybrid Energy System Using HOMER Pro Software,” *Procedia Eng.*, vol. 127, pp. 743–750, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.408.
- [40] I. Karlović, “MODELIRANJE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ ENERGIJE SUNCA.” FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, rujan 2008.
- [41] M. Ku. Babu and P. Ray, “Sensitivity analysis, optimal design, cost and energy efficiency study of a hybrid forecast model using HOMER pro,” *J. Eng. Res.*, vol. 11, no. 2, p. 100033, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jer.2023.100033.
- [42] P. Gilman, T. Lambert, and P. Lilienthal, “Chapter 15: Micropower System Modeling with Homer,” Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., NREL/CH-6A20-72011, Apr. 2006. doi: 10.1002/0471755621.ch15.