

# Uporaba alternativnih goriva u brodskim enegretskim sustavima

---

Vujnović, Ivan

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:136824>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Vujnović**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ivan Vujnović

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 i asistentici Maji Perčić, mag. ing. na potpori, stručnoj pomoći i savjetima pruženim tijekom izrade ovoga rada.

Ivan Vujnović



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Vujnović** Mat. br.: 0035201390

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UPORABA ALTERNATIVNIH GORIVA U BRODSKIM ENERGETSKIM SUSTAVIMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **USAGE OF ALTERNATIVE FUELS IN MARINE POWER SYSTEMS**

### Opis zadatka:

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) je izmjenama odgovarajućeg zakonskog okvira potakla snažan razvoj tehničkih i operativnih mjera za unaprjeđenje energetske učinkovitosti brodova, a posljedično i povećanje njihove ekološke prihvatljivosti. Jedna od navedenih tehničkih mjera je uporaba alternativnih goriva umjesto teškog brodskog goriva koje se najčešće koristi u međunarodnoj plovidbi, odnosno lakog dizelskog goriva u priobalnoj plovidbi. Neka od alternativnih goriva, koja su manje ili više zastupljena su: ukapljeni prirodni plin, ukapljeni biopljin, metanol, etanol, vodik, itd. Da bi se utvrdila prikladnost pojedinog alternativnog goriva za primjene u pomorskom sektoru, potrebno je provesti složenu analizu, vodeći računa o tehničkim, ekonomskim, ekološkim i društvenim aspektima, koji su specifični za svaki pojedini akvatorij i flotu. U završnom radu potrebno je analizirati mogućnosti primjene alternativnih goriva u brodskim energetskim sustavima, na primjeru Ro-Ro putničkih brodova u Republici Hrvatskoj, vodeći računa o prethodno navedenim kriterijima i specifičnostima hrvatskog energetskog sektora.

Zadatak treba obuhvatiti:

- pregled zakonske regulative koja regulira emisije brodskih motora s unutarnjim izgaranjem,
- pregled alternativnih goriva koja se primjenjuju u pomorskom sektoru u svijetu i analizu njihovih značajki,
- analizu hrvatskog energetskog sektora s naglaskom na dostupnost alternativnih goriva,
- analizu hrvatske Ro-Ro putničke flote,
- odabir referentnog Ro-Ro putničkog broda, te analizu njegovih energetskih potreba i tipičnog operativnog profila,
- analizu primjenjivosti alternativnih goriva u energetskom sustavu odabranog broda.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu, te eventualno dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimirović

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.  
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.  
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.  
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.  
3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. PREGLED REGULATIVE VEZANE ZA EMISIJE BRODSKIH MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM .....	2
2.1. Izmjena MARPOL-a kojom se uvodi projektni indeks energetske učinkovitost.....	2
2.2. Pravno administrativni okvir.....	3
2.3. SEEMP.....	4
2.4. EEDI.....	4
2.5. Standardi NOx emisije .....	5
2.6. Regulacija sadržaja sumpora u gorivu .....	6
3. PREGLED ALTERNATIVNIH GORIVA PRIMJENJIVIH U POMORSKOM SEKTORU .....	7
3.1. Alternativna goriva .....	7
3.1.1. Ukapljeni prirodni plin (LNG).....	7
3.1.2. Vodik.....	8
3.1.3. Amonijak.....	9
3.1.4. Metanol .....	9
3.1.5. Ukapljeni naftni plin .....	10
3.1.6. Biogoriva.....	10
3.1.7. Električni pogon.....	11
3.2. Usporedba alternativnih goriva.....	12
3.2.1. Osnovna svojstva goriva .....	12
3.2.2. Dostupnost goriva .....	13
4. HRVATSKI ENERGETSKI SEKTOR.....	14
5. ANALIZA HRVATSKE RO-RO PUTNIČKE FLOTE .....	18
5.1 Referentni putnički Ro-Ro brod.....	18
5.2 Podaci o floti .....	19
5.3. Ukupna potrošnja goriva .....	21
5.4. Prednosti elektrifikacije .....	23
6. ZAKLJUČAK .....	25
LITERATURA.....	26
PRILOZI.....	29

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	LNG terminal.....	8
Slika 2.	Emisija CO <sub>2</sub> -eq energetskeg sektora.....	15
Slika 3.	Ekvivalentna emisija CO <sub>2</sub> transportnih podsektora.....	15
Slika 4.	Struktura izvora električne energije dostavljene krajnjim kupcima.....	16
Slika 5.	Struktura obnovljivih izvora električne energije .....	16
Slika 6.	Struktura fosilnih izvora električne energije .....	17
Slika 7.	Ro-Ro putnički brod Kornati.....	18
Slika 8.	Ovisnost snage motora o brzini broda.....	22
Slika 9.	Norveški potpuno električni trajekt MV Ampere.....	24

**POPIS TABLICA**

---

Tablica 1.	MARPOL prilog VI NO <sub>x</sub> .....	5
Tablica 2.	Limiti udjela sumpora u gorivu.....	6
Tablica 3.	Karakteristike goriva.....	12
Tablica 4.	Broj prevezenih putnika i vozila u Hrvatskoj pomoću trajekata.....	21



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
MEPC		Odbor za zaštitu pomorskog okoliša
CO <sub>2</sub>		Ugljikov dioksid
EEDI	CO <sub>2</sub> /t·nm	Projektni indeks energetske učinkovitosti
SEEMP		Brodski plan upravljanja energetske učinkovitosti
IIEEC		Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti
LNG		Ukapljeni prirodni plin
H <sub>2</sub>		Vodik
CH <sub>4</sub>		Metan
CGH		Compressed gaseous hydrogen
LH <sub>2</sub>		Cryogenic liquid hydrogen
NH <sub>3</sub>		Amonijak
CH <sub>3</sub> OH		Metanol
LPG		Ukapljeni naftni plin
HVO		Hidrotretirano biljno ulje
LBG		Ukapljeni bioplin
$FC_{route}$	kg	Prosječna potrošnja na ruti
$FC_{trip}$	kg	Prosječna potrošnja u jednom smjeru
$N_{trips}$		Broj putovanja
$P_T$	kW	Prosječna ukupna potražnja snage
$SFOC$	g/kWh	Specifična potrošnja goriva
$t_{trip}$	s	Vrijeme trajanja rute
v		Brzina broda

**SAŽETAK**

Posljednjih desetljeća, uslijed rasta osviještenosti o učincima industrije na ekologiju ulažu se sve veći naponi u smanjenje emisija plinova. Međunarodne organizacije uvode nove smjernice i pravila s ciljevima ograničenja emisija plinova i uz to vezanih ekoloških problema. Pooštravanje uvjeta i pravila je pokretač napretka postojećih tehnologija te razmatranja novih čistijih tehnologija osiguravanja energetske potrebe broda. Nove tehnologije podrazumijevaju primjenu alternativnih goriva poput vodika u modificiranim trenutno dostupnim motorima, ali i vodikovu upotrebu u gorivnim člancima. Ustanovljeno je kako su mnoga alternativna goriva znatno su pogodnija za primjenu iz ekološkog aspekta spram konvencionalnih fosilnih goriva, dok se kod nekih alternativnih goriva može postići i nulta emisija ugljikovog dioksida. U ovom radu obrađena su moguća alternativna goriva u pomorskom prometu i način njihove primjene, sagledan je aspekt dostupnosti alternativnih goriva te problemi njihove primjene. Analiziran je Hrvatski energetske sektor s pogledom na zadane buduće ciljeve. Provedena je analiza i usporedba mogućnosti prelaska na električni pogon trenutno u službi dizel pogonjenog Ro-Ro broda te je izvučen zaključak.

Ključne riječi: Alternativna goriva; emisije plinova; priobalna plovidba.

---

**SUMMARY**

In recent decades, due to the growing awareness on the effects of industry on the environment, increasing efforts are being made to reduce gas emissions. International organizations are introducing new guidelines and rules aimed at limiting gas emissions and decreasing related environmental problems. Stricter rules are the driving force behind improving existing technologies to ensure new cleaner technologies which will satisfy the ship's energy needs. New technologies are considering the use of alternative fuels such as hydrogen in currently available modified engines, but also the use of hydrogen in fuel cells. Many alternative fuels have been found to be more environmentally friendly compared to conventional fossil fuels, while some alternative fuels can achieve zero carbon dioxide emissions. In this thesis, possible alternative fuels and ways of their application are considered. Also, the availability of alternative fuels and the problems of their application were researched.

The Croatian energy sector was analyzed bearing in mind the future goals. An analysis and comparison of the possibility of switching to electric propulsion, which is currently in the service of a Ro-Ro diesel-powered ship, was performed and relevant conclusion was drawn.

Key words: Alternative fuels; emissions; coastal navigation.

## 1. UVOD

Iscrpljivanje fosilnih goriva, oscilacije u njihovoj cijeni te njihov nepogodan utjecaj na okoliš, otvaraju mogućnost uvođenja alternativnih goriva na energetska tržišta [1]. S obzirom da su najveća nalazišta nafte i najveće svjetske potvrđene rezerve nafte u nedemokratskim zemljama i nestabilnim regijama, cijena nafte je često određena i špekulacijama. Kroz povijest je kretanje cijene nafte velik dio vremena vrlo nepredvidivo, tako je za primjer cijena nafte na prijelazu iz 1973. godine u 1974. godinu značajno rasla s 20 dolara po barelu na čak 53 dolara 1974. godine. Nakon toga se cijena zadržala u okvirima do 60 dolara sve do 1979. godine. Nakon 1980. godine slijedi pad cijene barela sirove nafte u iznosu od 80% do čak 26 dolara po barelu 1986. godine. Slična kretanja cijene su se ponovila zatim više puta u relativno kratkim razdobljima. Nesigurnost i velike fluktuacije cijene poticaj su razvoju alternativnih goriva. S obzirom da izgaranjem fosilnih goriva nastaju štetni ispušni plinovi, energetska i prometna sektor treba razmotriti zamjenu fosilnih goriva s alternativnim, čistim gorivima čijim izgaranjem ili ne nastaju ili nastaju manje emisije štetnih plinova [2]. Prema Trećoj studiji o stakleničkim plinovima Međunarodne pomorske organizacije (eng. *International Maritime Organization*, IMO), međunarodni brodski promet u 2012. uzrokovao je 2,1 % globalnih stakleničkih plinova. Predviđa se da će se taj iznos povećati od 50 % - 250 % do kraja 2050 [3].

Ispušni plinovi nastali izgaranjem fosilnog goriva u brodskim motorima sadrže razne štetne tvari, poput sumpornih oksida ( $\text{SO}_x$ ), dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ), ugljičnog monoksida ( $\text{CO}$ ), lebdećih čestica ( $\text{PM}$ ), kao i stakleničkih plinova ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  i  $\text{N}_2\text{O}$ ). U cilju kontrole brodskih emisija, IMO uspostavlja nekoliko plovidbenih područja kontrole emisija (eng. *Emission Control Area*, ECA) u kojima su zahtjevi za emisijama stroži nego izvan njih. Uz utjecaj na okoliš, ispušni plinovi negativno djeluju na zdravlje ljudi [4]. To je izraženije kada brodovi provode više vremena u lukama i u blizini naseljenih područja, što je karakteristično za brodove u priobalnoj plovidbi, poput Ro-Ro putničkih brodova. U ovom završnom radu obrađena je zakonska regulativa koja regulira emisije brodskih motora s unutarnjim izgaranjem, dan je pregled alternativnih goriva te je provedena analiza hrvatske Ro-Ro putničke flote i referentnog broda s mogućnošću primjenjivosti alternativnih goriva u njegovom energetskom sustavu.

## **2. PREGLED REGULATIVE VEZANE ZA EMISIJE BRODSKIH MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM**

### **2.1. Izmjena MARPOL-a kojom se uvodi projektni indeks energetske učinkovitost**

U prošlom desetljeću glavna tema rasprave Odbora za zaštitu pomorskog okoliša (eng. *Marine Environment Protection Committee*, MEPC) kao prvi propis koji je uspostavio CO<sub>2</sub> standarde na globalnoj razini, razmatran je projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI). Imajući u vidu poticanje razvoja i unaprjeđenje postojećih tehnoloških rješenja s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti i unaprjeđenja zaštite okoliša IMO Rezolucijom MEPC.203(62) donosi izmjene Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (MARPOL), Prilog VI. Tim izmjenama uvodi se i Brodski plan upravljanja energetsom učinkovitošću (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP). Od 01. siječnja 2013. godine svi brodovi u međunarodnoj plovidbi s kapacitetom većim od 400 GT moraju imati plan upravljanja energetsom učinkovitošću. Izradom Brodskog plana upravljanja energetsom učinkovitošću zadovoljavanjem projektnog indeksa energetske učinkovitosti, brodu se izdaje Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti (eng. *International Energy Efficiency (IEE) Certificate*), [4]. Prema MEPC.203(62):

1. Usvajaju se izmjene Priloga VI,
2. Određeno je kako se izmjene smatraju prihvaćenima 1. srpnja 2012. ukoliko se do tada ne podnese prigovor,
3. Pozivaju se svi relevantni administrativni organi da imaju na umu da izmjene stupaju na snagu 1. siječnja 2013. po prihvaćanju,
4. Od tajnika se zahtijeva distribucija rezolucije svim članicama,
5. IMO poziva sve članice da o promjenama MARPOL-a Priloga VI obavijeste brodovlasnike, kapetane, brodogradilišta, projektne urede, proizvođače brodskih motora, proizvođače brodske opreme, kao i sve druge zainteresirane stranke.

## 2.2. Pravno administrativni okvir

15. srpnja. 2011. usvajanjem Rezolucije MEPC.203(62) koja se odnosi na izmjene i dopune MARPOL priloga VI, navedeno je nekoliko relevantnih pravila neophodnih za jasan uvid i pravilnu interpretaciju izmjena potrebnih za proračun EEDI-a, [5]. Navedene odredbe moraju biti primjenjene na sve brodove, osim onih koji su izričito izuzeti po drugim odredbama spomenutog priloga.

Ostale relevantne rezolucije Odbora za zaštitu pomorskog okoliša:

- MEPC.212(63): Smjernice za metodu proračuna postignutog EEDI-a za nove brodove. U okviru ove rezolucije opisan je postupak proračuna postignutog EEDI-a za sve tipove brodova te su navedeni izrazi prema kojima se računaju svi relevantni proračunski parametri [6].
- MEPC.213(63): Smjernice za razvijanje SEEMP-a. Pravilno provođenje plana upravljanja energetsom učinkovitošću broda može znatno utjecati na energetska učinkovitost [7].
- MEPC.214(63): Smjernice za nadzor i certificiranje EEDI-a. U smjernicama opisan je postupak verifikacije EEDI-a u svrhu dobivanja IEE certifikata [8].
- MEPC.224(64): Izmjene i dopune za metodu proračuna postignutog EEDI-a za nove brodove.  
Novija rezolucija koja uključuje svojstvene izmjene i dopune već postojećih smjernica za metodu proračuna EEDI-a [9].
- MEPC.245(66): Smjernice za metodu proračuna postignutog EEDI-a za nove brodove. Rezolucija je objavljena 2014. i odnosi na metodu proračuna postignutog projektnog indeksa, a zapravo predstavlja dorađenu verziju rezolucije MEPC.212(63) [10].
- MEPC.251(66): Izmjene i dopune priloga VI te tehničkog koda NO<sub>x</sub> iz 2008., [11].
- MEPC.215(63): Smjernice za izračun referentne linije EEDI-a [12].

### 2.3. SEEMP

Od 01.01.2013. svi brodovi veći od  $GT = 400$  moraju imati plan upravljanja energetske učinkovitošću, koji treba biti izrađen prema smjericama koje propisuje IMO. SEEMP se može definirati kao operativna mjera kojom se formira mehanizam poboljšanja energetske učinkovitosti broda, dok istovremeno brodarskim kompanijama daje mogućnost upravljanja energetske učinkovitošću flote u vremenu. MARPOL je pri smjericama za izradu SEEMP-a priložio i naputke s prikladnim praksama za učinkovitu eksploataciju broda u pogledu uštede goriva. Predviđanje i planiranje deklarirani su kao važni čimbenici, primjerice, izbjegavanjem preranog dolaska u luku odnosno smanjivanjem brzine plovidbe je moguće znatno smanjiti potrošnju goriva. IMO je u svojoj studiji o stakleničkim plinovima iz 2009. godine dovela do zaključka kako je samo pravilna primjena plana upravljanja energetske učinkovitošću broda dovela do smanjenja emisije štetnih plinova za 10-15 %. Smatra se da je pravodobno planiranje najvažnija faza u strukturi SEEMP-a, a uključuje analizu trenutnog stanja i očekivanih poboljšanja, pravodobnim planiranjem se postiže dovoljno vremena za provedbu poboljšanja [5].

Na umu treba imati kako se sve mjere ne mogu primijeniti na sve brodove, dok neke čak mogu biti i kontraproduktivne. Faza implementacije obuhvaća sustav implementacije prethodno planiranih mjera, detaljan opis načina implementacije, period implementacije, identifikaciju odgovorne osobe i čuvanje zabilježenih iskustava stečenih primjenom planiranih mjera. Analiza i konzistentno prikupljanje podataka predstavljaju treću fazu. Poboljšanje i vrednovanje završne su faze koje osiguravaju povratnu informaciju za sljedeći ciklus planiranja [6].

### 2.4. EEDI

EEDI je definiran kao omjer emisije ugljičnog dioksida ( $CO_2$ ) prilikom transporta jedne tone tereta za jednu nautičku milju. Osmišljen je i razvijen kako bi omogućio jednostavnu ocjenu energetske učinkovitosti novih brodova. Prvobitni cilj uvođenja EEDI-a je poboljšati energetske učinkovitost, odnosno optimirati potrošnju goriva pomoću projektnih i operativnih mjera koje bi rezultirale smanjenjem emisija čestica nastalih iz goriva procesom izgaranja. Zahtijevani EEDI računa se za svaki brod ovisno o vrijednosti EEDI referentne krivulje i

faktoru smanjenja X. Parametri za proračun zahtijevanog EEDI-a u ovisnosti o tipu i veličini broda te vremenskom intervalu dani su rezolucijom MEPC.203(62). Pri proračunu postignutog EEDI-a trenutno se koristi se kompleksni analitički unaprijeđen i dostupan u Rezoluciji MEPC.245(66) 2014. godine [8].

## 2.5. Standardi NO<sub>x</sub> emisije

Emisije NO<sub>x</sub> limitirane su pravilom 13 MARPOL-a prilog VI i vrijede za svaki instalirani dizelski motor snage veće od 130 kW. Dvije su iznimke: motori za hitne slučajeve i motori brodova koji plove samo u vodama države pod čijom zastavom plovi. Druga iznimka se odnosi samo ukoliko ti motori podliježu alternativnim NO<sub>x</sub> kontrolnim mjerama. Postavljene granice za dizelske motore ovise o maksimalnoj brzini rada motora (o/min), kako je i prikazano u Tablici 1. Skupina 1 i skupina 2 predstavljaju globalne limite, dok se skupina 3 primjenjuje samo u zonama kontrole emisije NO<sub>x</sub> [13].

**Tablica 1. MARPOL prilog VI NO<sub>x</sub> [13]**

Skupina	Godina	NO <sub>x</sub> Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Skupina I	2000.	17,0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,8
Skupina II	2011.	14,4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,7
Skupina III	2016.	3,4	$9 \cdot n^{-0.2}$	2,96

Postizanje standarda skupine 2 očekuje se pomoću optimizacije procesa izgaranja u motoru. Standardi skupine 3 postižu se posebnim metodama poput recirkulacije plinova ili selektivnog odvajanja plinova.



## 2.6. Regulacija sadržaja sumpora u gorivu

13. MARPOL Prilog VI regulativa uključuje odredbe o sadržaju sumpora u gorivu kao mjere prevencije SO<sub>x</sub> emisije, a indirektno i emisije PM čestica. Specijalne kvalitete goriva i sadržaja sumpora postoje za određena kontrolirana područja poput Baltičkog i Sjevernog mora. Limiti sadržaja sumpora i datumi implementacije istih prikazani su u Tablici 2 [13].

**Tablica 2. Limiti udjela sumpora u gorivu [13]**

Godina	Limit sumpora u gorivu (%)	
	SO <sub>x</sub> ECA	Globalno
2000.	1,5 %	4,5 %
2010.	1,0 %	3,5 %
2012.	0,1 %	
2015.		
2020.		0,5 %

### **3. PREGLED ALTERNATIVNIH GORIVA PRIMJENJIVIH U POMORSKOM SEKTORU**

#### **3.1. Alternativna goriva**

Kako bi se poboljšala energetska učinkovitost Ro-Ro putničkih brodova i smanjio njihov utjecaj na okoliš potrebno je poduzeti neke mjere. Zamjena konvencionalnih fosilnih goriva (najčešće se u brodskim motorima upotrebljava teško loživo ulje (eng. *Heavy Fuel Oil*, HFO)) s nekim alternativnim i čistim gorivom poput prirodnog plina, vodika, metanola ili nekih biogoriva, korak je ka postizanju tog cilja [14]. Primjenjivost goriva u pomorskom sektoru može se istražiti provedbom analize njegovog utjecaja na okoliš. Brynolf i suradnici proveli su takvu studiju o utjecaju alternativnih goriva na okoliš i zaključili da ukapljeni prirodni plin (eng. *Liquefied Natural Gas*, LNG) i metanol proizveden iz prirodnog plina neće smanjiti se njihov doprinos globalnom zagrijavanju neće smanjiti u njihovom životnom ciklusu. Međutim, upotrebom ukapljenog bioplina (eng. *Liquefied Biogas*, LBG) i metanola dobivenih iz biomase moguće je smanjenja emisije stakleničkih plinova [15].

Pregled alternativnih goriva koja imaju potencijal za primjenu u pomorskom sektoru dan je sljedećim poglavljima.

##### **3.1.1. Ukapljeni prirodni plin (LNG)**

Iako je fosilno, prirodni plin je povoljno, neotrovno i nekorozivno gorivo čiji niži sadržaj ugljika (niži od HFO-a) predstavlja značajnu karakteristiku za smanjenje stakleničkih plinova i čini ga konkurentnim na energetskom tržištu [16]. U prirodi se nalazi u plinovitom obliku, a kako bi se olakšalo rukovanje, pretvara se u tekući oblik hlađenjem na  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ , uzimajući tako 600 puta manje volumena nego u plinovitom stanju. Proces ukapljivanja provodi se u LNG terminalima gdje se pročišćuju nepoželjne komponente poput vode, prašine, teških ugljikovodika, helija i svih ostalih komponenti koje će se smrznuti pri niskim temperaturama potrebnim za pohranu [18].



**Slika 1. LNG terminal [17]**

Ukapljeni prirodni plin je pročišćeni zemni plin sastavljen primarno od metana  $\text{CH}_4$  i primjese drugih plinova. Sastav prirodnog plina je promjenjiv, ovisno o mjestu nalazišta. Prirodni plin se u najvećem udjelu sastoji od metana, a u manjim udjelima od etana, propana i butana. Njegove najčešće spominjane prednosti nad ostalim energentima, a ponajviše nad naftom su znatno manje onečišćenje okoliša, visoka ogrijevna moć i velike rezerve u nalazištima ispod 1000 m dubine, [18].

### **3.1.2. Vodik**

Vodik je netoksičan, bez mirisa i bezbojan plin kojeg ima u izobilju, ali ga se rijetko može naći u čistom obliku. Najčešći način dobivanja vodika je iz prirodnog plina, ali može se dobiti i iz biomase i elektrolizom. Mogućnosti skladištenja vodika na brodu uključuju ukapljeni vodik, komprimirani vodik ili kemijski vezan vodik u nosačima vodika, tj. gorivima bogatim vodikom kao što su prirodni plin, amonijak, metanol itd. Vodik se kao gorivo može primjenjivati u plinskim turbinama i u motorima s unutarnjim izgaranjem, i zbog svoje brze elektrokemijske kinetike, u gorivnim člancima. Tehnologija gorivnih članaka inovativna je i temelji se na izravnoj pretvorbi kemijske energije goriva u električnu energiju putem elektrokemijskih reakcija [18]. Najveću iskoristivost vodik dostiže korištenjem u gorivim člancima, između 50% i 60% uz moguće povećanje rekuperacijom otpadne topline. Adaptirani motori s unutarnjim izgaranjem postižu 40% do 50% efikasnosti, [15]. Pri korištenju plina iz obnovljivog izvora, odnosno pri proizvodnji vodika korištenjem postupka koji uključuje

izdvajanje i spremanje ugljikovog dioksida (eng. *Carbon capture and storage, CCS*), može se doći do lanca energijske pretvorbe sa nultom stopom emisije ugljikovog dioksida. Iako ciklus uporabe može imati emisiju ugljikovog dioksida blizu nule, važno je primijetiti da se za proizvodnju vodika koristi značajna količina energije, [16].

### 3.1.3. Amonijak

Među ostalim gorivima koja se mogu koristiti kao izvor vodika, amonijak, kemijske formule  $\text{NH}_3$ , je značajan nosač vodika, jer se sastoji samo od dušika i vodika. Pri standardnoj temperaturi i tlaku je bezbojan plin, karakteristična mirisa, lakši od zraka i topljiv u vodi. Toksičan je i korozivan prema određenim materijalima. Njegova niža temperatura vrelišta, jednostavnije skladištenje i transport neke su od prednosti amonijaka kao goriva.

Korištenje u motorima s unutarnjim izgaranjem nije idealno radi samih svojstava zapaljenja amonijaka, otrovnosti i korozivnosti prema određenim materijalima, no korištenje u gorivnim člancima predstavlja dugoročno značajan potencijal za komercijalno iskorištavanje amonijaka kao goriva. Haber-Bosch proces danas ima glavnu ulogu u proizvodnji amonijaka iz prirodnog plina. Drugi načini proizvodnje kao sirovinu mogu koristiti naftu i ugljen, koji značajno povećavaju emisiju  $\text{CO}_2$  po jedinici energije, [19].

### 3.1.4. Metanol

Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) je najjednostavniji alkohol. Pri atmosferskom tlaku u tekućem je stanju čime je za skladištenje lakši i jeftiniji izbor spram LNG,  $\text{H}_2$  i  $\text{NH}_3$ . Do 1925. godine se proizvodio isključivo suhom destilacijom drveta. Danas se metanol proizvodi iz plina, ostataka preradbe nafte i ugljena. Emisije stakleničkih plinova znatno variraju ovisno o sirovini korištenoj pri proizvodnji. Npr. emisije stakleničkih plinova dvostruko su veće pri proizvodnji metanola iz ugljena u usporedbi sa proizvodnjom iz prirodnog plina, [20].

Metanol je danas dokazano gorivo, vrlo rasprostranjeno u teškoj industriji i time je zanimljivo alternativno gorivo u pomorstvu. Pri testiranju metanola kao goriva u brodskim dizelskim motorima izmjerene su značajno manje emisija  $\text{NO}_x$ , bez ikakvih emisija  $\text{SO}_x$ . Testiranjima je pokazano kako je metanol učinkovitiji naspram konvencionalnih goriva pri korištenju u motorima s unutarnjim izgaranjem. Pogodan je kao zamjena za benzin i mješavine

goriva, a pri upotrebi u dizelskim motorima mora se koristiti u mješavini s dizelom kako bi došlo do samozapaljenja. U odnosu na dizelsko gorivo, metanol ima manju energetska gustoću, odnosno za ekvivalentnu količinu energije je potreban dvostruko veći spremnik, [21].

Korištenje metanola je moguće u gorivnim člancima i u motorima s unutarnjim izgaranjem. Trenutno je tehnologija gorivnih članaka u razvoju, dok su motori s unutarnjim izgaranjem komercijalno dostupni, [21].

### **3.1.5. Ukapljeni naftni plin**

Ukapljeni naftni plin (eng. *Liquefied Petroleum Gas*, LPG) je ukapljena mješavina zasićenih ugljikovodika, tj. propana i butana, uz vrlo male količine primjesa poput etana, butena, propena i etena. LPG je bezbojan, bez mirisa i teži je od zraka te vrlo zapaljiv. Pri normalnim uvjetima u plinovitom je stanju, dok kod relativno niskih pretlaka prelazi u tekuće stanje. Volumen mu se pri ukapljivanju smanjuje čak 270 puta što omogućava lakše rukovanje. Većina ukapljenog naftnog plina proizvodi se rafiniranjem sirove nafte u rafinerijama. LPG kao izvor energije ima značajnu prednost nad ostalim potencijalnim izvorima, uključujući LNG i metanol s obzirom na obilnu dostupnost LPG-a i postojanje globalne distribucijske mreže te infrastrukturu za pohranu na kopnu i plutajuće infrastrukture za skladištenje za LPG, [20].

### **3.1.6. Biogoriva**

Biogoriva su goriva proizvedena iz biomase za, a danas se smatraju važnim sredstvom smanjenja štetnih plinova koji se ispuštaju u atmosferu, te alternativom fosilnim gorivima. Biogoriva s najvećim potencijalom u pomorskom sektoru su hidrotretirano biljno ulje (eng. *Hydrotreated Vegetable Oil*, HVO), biodizel koji je po kemijskom sastavu metilni ester masnih kiselina (eng. *Fatty Acid Methyl Ester*, FAME) i LBG. Biodizel je po svojim energetska sposobnostima gotovo jednak konvencionalnom dizelu, međutim ima puno bolju mazivost što znatno produžava vijek trajanja motora. Njegova najistaknutija osobina je smanjena emisija stakleničkih plinova.

HVO je visoko kvalitetno gorivo u kojem je kisik uklonjen pomoću vodika čime se postiže dugotrajna stabilnost goriva. HVO je kompatibilno s trenutno postojećim motorima s unutarnjim izgaranjem, iako za samo korištenje proizvođač mora dati odobrenje i zahtijevati

određene izmjene. Norveškim morem trenutno plovi nekoliko trajekata s HVO gorivom bez prijavljenih poteškoća.

Proizvodnja alternativnih biogoriva nudi širok izbor sirovina i postupaka. Emisije stakleničkih plinova tokom ciklusa proizvodnje i uporabe biogoriva mogu biti smanjene za 20-90 % naspram emisija nastalih tijekom proizvodnje i upotrebe fosilnih goriva, [20]. Studije pokazuju da su biogoriva jedno od rješenja koje će dovesti do smanjenja emisija stakleničkih plinova za 50% do 2050. godine u usporedbi s 2008. godinom što je i cilj koji je postavio IMO.

Primjena biogoriva je u začetcima i stoga su informacije o cijenama limitirane i vrlo ovisne o regiji i samoj dostupnosti. Budućnost biogoriva leži u sve boljim tehnološkim postupcima proizvodnje i većoj primjeni, čime će i njihova cijena postati ekonomski isplativa. Prednost biogoriva pri primjeni je mogućnost miješanja s dizelom, moguća direktna primjena u motorima s unutarnjim izgaranjem, [13].

### **3.1.7. Električni pogon**

Kod brodova s potpuno električnim energetskim sustavom, propulzija i pomoćni sustavi su u potpunosti pogonjeni energijom iz baterija. Hibridni brodovi koriste različite kombinacije električnog pogona i klasičnog pogona, a same baterije mogu biti punjene pomoću generatora pogonjenim gorivom. Hibridni brodovi mogu funkcionirati na različite načine pa tako na otvorenom moru biti pogonjeni klasičnim dizelskim motorom, te pri prilazu i manevriranju u luci koristiti 100 % električni pogon, [18].

Elektrifikacija pogodnih brodova dovodi do smanjenje emisija plinova proporcionalno elektrificiranosti samog broda. Za potpunu eliminaciju emisija brod mora biti 100 % električan. Cjelokupni ciklus bez emisije zahtijeva električnu energiju proizvedenu pomoću metode sa skupljanjem i spremanjem ugljikovog dioksida.

Potencijal za elektrifikaciju ovisi o nekoliko faktora. Najvažniji faktori koji definiraju mogućnost elektrifikacije su kapaciteti električne mreže na obali, kapaciteti punionica, vrijeme provedeno na obali, kapacitet baterija te ruta na kojoj brod plovi, odnosno njena duljina.

Ugrađivanje baterija i uz to očekivana zamjena baterija kroz rok između 8-10 godina predstavlja znatno veći trošak naspram tradicionalnih dizelskih motora. Kada se u obzir uzme ograničenje mogućnosti plovidbe, nesigurnost u buduće cijene električne energije i same varijacije cijena struje između različitih regija, baterijski sustavi s visokim stupnjem elektrifikacije postaju neatraktivni i nepraktični brodovlasnicima, pogotovo kod prekoceanskih brodova, [20].

## 3.2. Usporedba alternativnih goriva

### 3.2.1. Osnovna svojstva goriva

Važno svojstvo goriva je točka zapaljenja koja predstavlja najnižu temperaturu pri kojoj tekućina može stvoriti zapaljivu mješavinu sa zrakom u blizini svoje površine. Temperatura samozapaljenja je minimalna temperatura pri kojoj se plin ili para u zraku može zapaliti bez prisustva iskre ili otvorenog plamena.

Granica zapaljivosti, predstavlja spektar koncentracija pare određene kemikalije u kojem se ona pomiješana sa zrakom može zapaliti pri temperature 25 °C i atmosferskom tlaku. Široki rasponi ukazuju na to da se kemikalija može zapaliti pri različitim uvjetima i upozoravaju na korištenje sigurnosnih mjera, [21].

**Tablica 3. Karakteristike goriva**

Gorivo	Točka zapaljenja °C	Temperatura samozapaljenja °C	Granice zapaljivosti % u zraku	Toksičnost
LNG	-188	537	4 do 15	Nije toksično
Vodik	Nije definirano	500	4 do 74	Nije toksično
Amonijak	132	630	15 do 28	Vrlo toksično
Metanol	11	470	6,7 do 36	Toksično
LPG	-104	410 do 580	1,8 do 10	Nije toksično
HVO	> 61	204	0,6 do 7,5	Nije toksično
Baterija	Nije moguće	Nije moguće	Nije moguće	Nije toksično

### 3.2.2. Dostupnost goriva

Dugoročna dostupnost goriva jedan je od preduvjeta za njegovo korištenje u pomorskom sektoru. LNG je globalno dostupan uslijed razvijenog sektora. Razvijena svjetska infrastruktura s tendencijom sve bržeg razvoja na ključnim mjestima za pomorski promet postavljaju LNG daleko ispred ostalih alternativnih goriva po pitanju dostupnosti. Budući da je ekvivalenta cjelokupna potrošnja pomorskog sektora jednaka tek desetini industrijske proizvodnje LNG-a, u teoriji je moguć prijelaz cjelokupne svjetske flote na LNG. U nadolazećim godinama se očekuje razvoj brodova koji će na otvorenom moru moći opskrbljivati preoceanske brodove LNG gorivom [22].

LPG je globalno vrlo dostupno gorivo, a prepreku za korištenje u pomorstvu stvara nedostatno razvijena tehnologija skladištenja. Teoretski je moguće cijelu energetska potrošnju globalne flote opskrbiti LPG-om, ali bi to zahtijevalo cijelu svjetsku proizvodnju [23]. Električna energija je također globalno vrlo dostupna. Najbolji regionalni primjer razvoja i primjene tehnologije u pomorskom sektoru je Norveška [18].

Vodik je uz trenutno nedostupnu infrastrukturu i nerazvijenu tehnologiju skladištenja u pomorstvu ograničen na pilot projekte. Globalno je vrlo dostupan i moguće ga je proizvoditi pomoću energije iz obnovljivih izvora uz nultu emisiju CO<sub>2</sub>. Prirodni plin je glavna sirovina od koje se proizvodi vodik.

Primjena amonijaka stvara se mogućnost iskorištavanja već razvijene infrastrukture za prijevoz i skladištenje budući da se koristi kao glavna komponenta poljoprivrednog gnojiva. Nedostatak razvoja tehnologije skladištenja u pomorstvu te manjak iskustva u rukovanju toksičnim amonijakom glavni su uzrok nekorištenja kao goriva u pomorskom sektoru [24].

Metanol predstavlja lako dostupno gorivo s obzirom na razvijenu lučku infrastrukturu namijenjenu transportu metanola. Trenutno je najveći problem specijalizirana tehnologija skladištenja kao goriva u pomorstvu [25].

Biogoriva imaju ograničenu dostupnost uslijed nedostatka interesa od strane brodovlasnika. Izravni konkurent pomorskom sektoru je cestovni prijevoz koji uspješnije koristi biogoriva. Skladištenje i korištenje biogoriva se ne smatra problematičnim u pomorstvu [19].



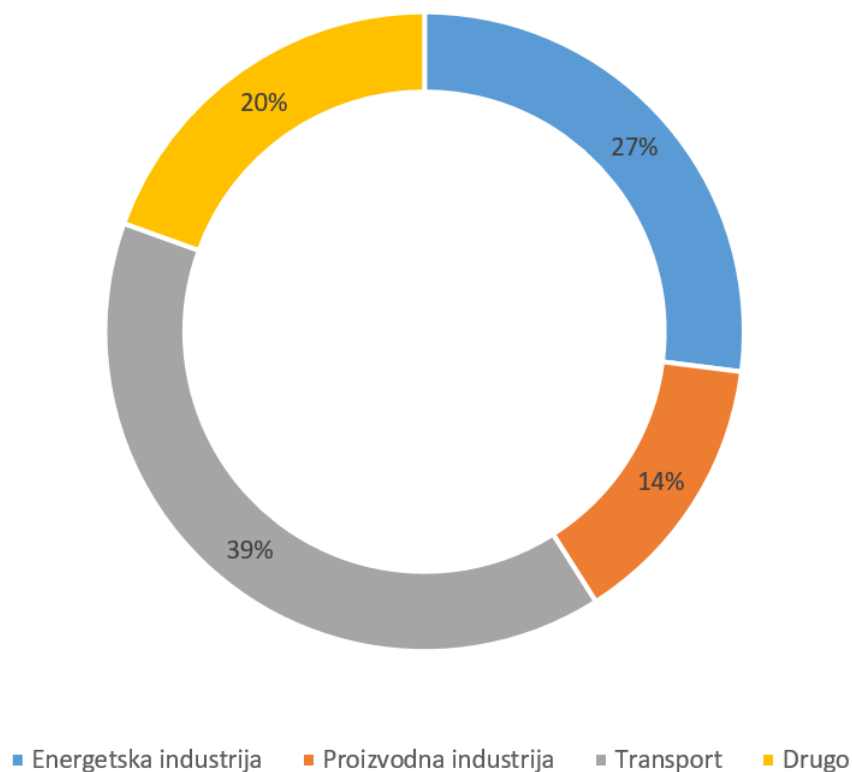
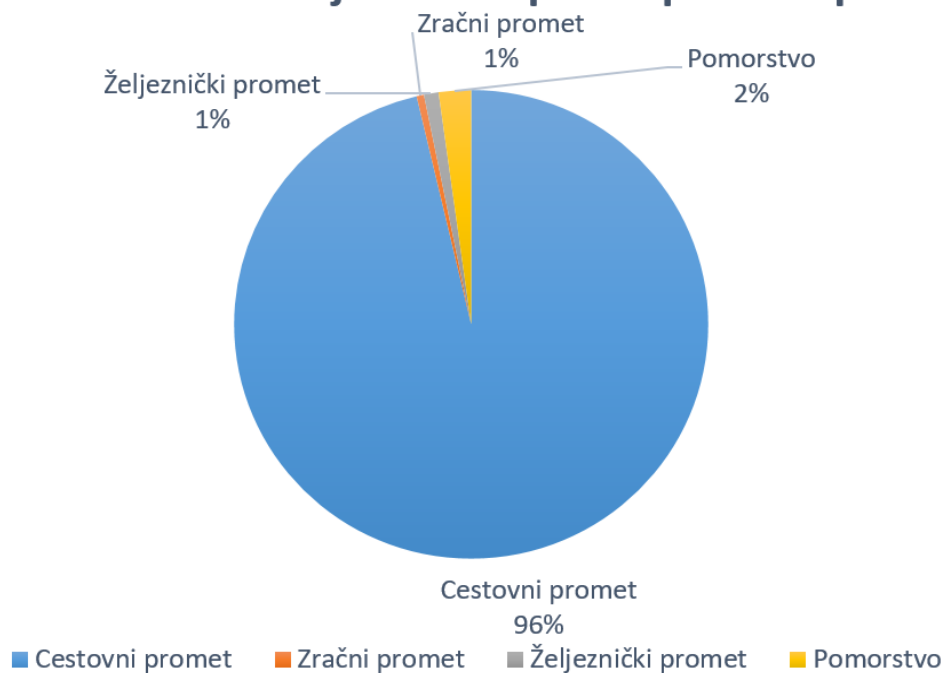
## 4. HRVATSKI ENERGETSKI SEKTOR

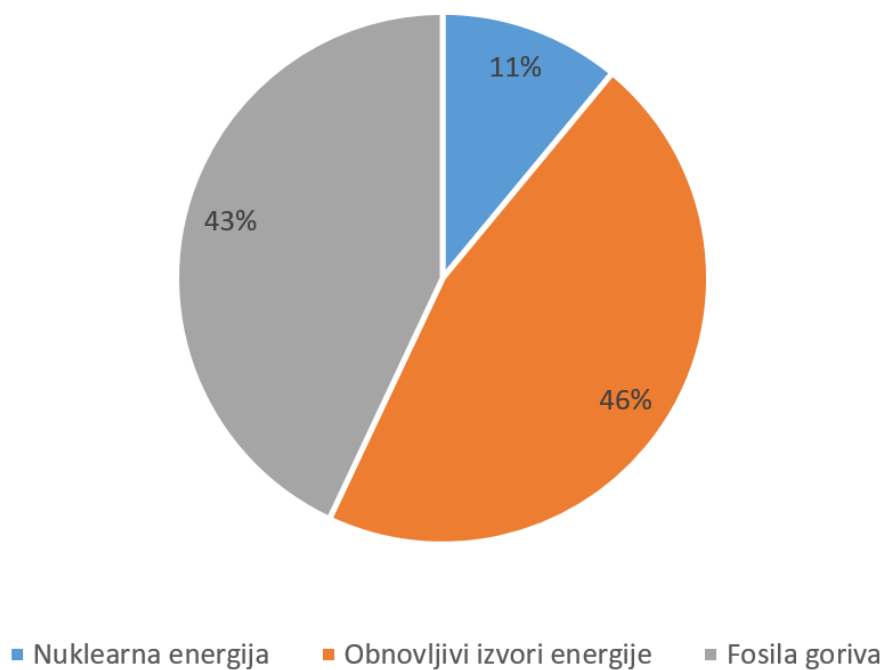
U suvremenom svijetu energija se nameće kao jedan od ključnih faktora razvoja te je nezaobilazna osnova materijalnih i društvenih djelatnosti. Energetski sektor pripada skupini infrastrukturnih djelatnosti, što znači da je temelj drugim proizvodnim i uslužnim djelatnostima. Odnosno energetski sektor je povezan sa svim granama gospodarstva te je njegova uloga od jasne važnosti za razvoj cjelokupnog gospodarstva.

Važni čimbenici su raspored stanovništva u samoj državi, razvijenost tržišta i visina BDP-a. Veliku važnost u samom sustavu imaju i distribucijski sustavi energije. Nacionalna ekonomija jedan je on najvažnijih čimbenika koji utječe na potrebe za energije i pokreće razvoj samog sustava. Hrvatska se ne ubraja u zemlje bogate rudnim sirovinama, te stoga ne postoji razvijeno rudarstvo. Ipak, Hrvatska eksploatacijom prirodnog plina i nafte zadovoljava gotovo polovicu potreba za primarnim energentima. Prirodni plin i nafta su primarni energenti u Hrvatskoj. Tijekom idućih 25 godina očekuje se znatno smanjenje proizvodnje nafte, čime će se trenutni udio uvoza nafte od oko 75 % morati dodatno povećati ukoliko izostane tranzicija na alternativne oblike energije. Kada je u pitanju prirodni plin, uz očekivanu stagnaciju proizvodnje, ali porast potražnje uslijed razvoja ekonomije također će se morati povećati udio uvoznog plina s trenutnih 30 % [26].

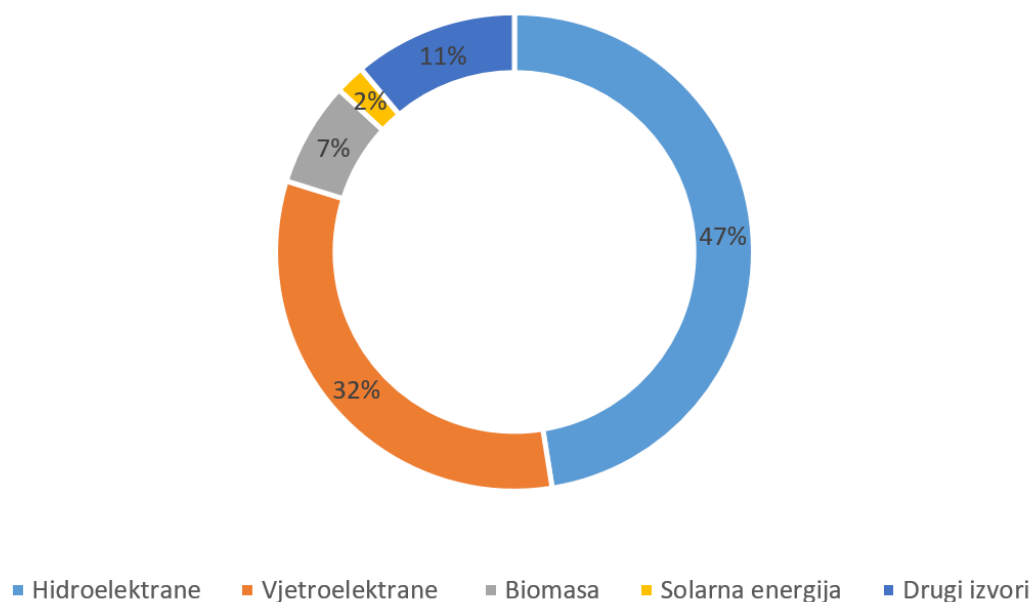
Zakonom o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva (NN 120/16) u pravni poredak Republike Hrvatske prenesene su odredbe Direktive 2014/94/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 22. listopada 2014. uspostavi infrastrukture za alternativna goriva (SL L 307, 28.10.2014.) u onom dijelu koji se odnosi na državu članicu. Ovim Zakonom se utvrđuje zajednički okvir mjera za uspostavljanje infrastrukture za alternativna goriva, kako bi se na najmanju moguću mjeru smanjila ovisnost o nafti te ublažio negativni utjecaj prometa na okoliš. Zakonom se utvrđuju minimalni zahtjevi za izgradnju infrastrukture za alternativna goriva, uključujući mjesta za punjenje, utvrđuju se zajedničke tehničke specifikacije za mjesta za punjenje i opskrbu, zahtjevi za informiranje korisnika, kao i način izvršavanja obveza izvješćivanja o provedbi mjera uspostavljanja infrastrukture za alternativna goriva [27].

Tijekom 2016. godine u Republici Hrvatskoj je proizvedeno 1118 tona biodizela od čega je oko 85 % plasirano na domaće tržište. Dostupnost alternativnih goriva i uz to prateća infrastruktura za pomorski sektor je nezadovoljavajuća uslijed nepostojećeg interesa za njima [28].

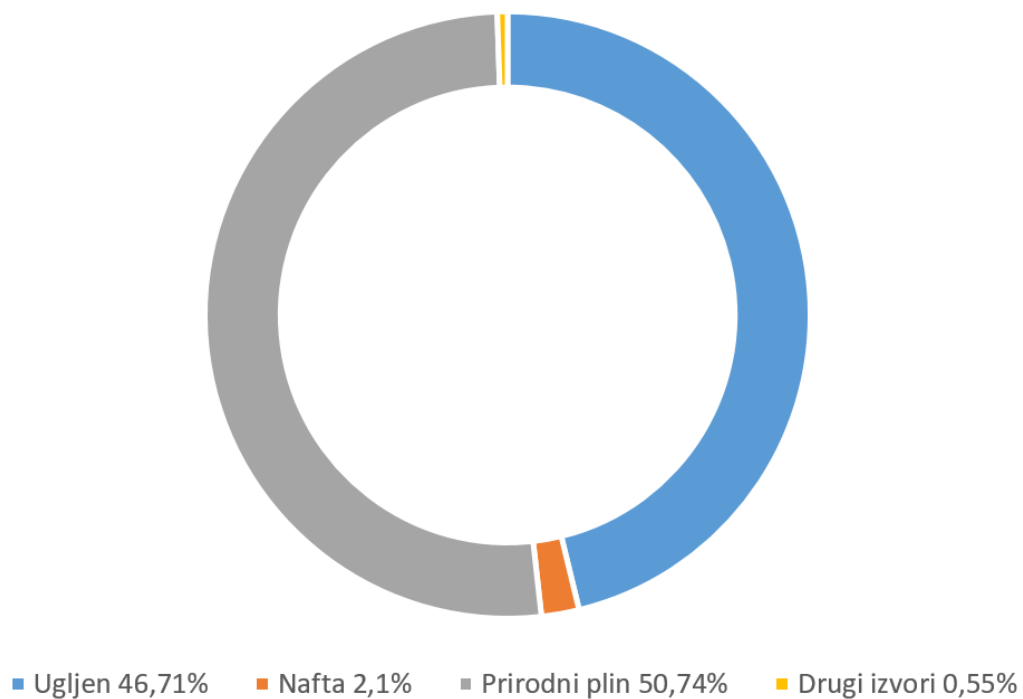
Emisije CO<sub>2</sub>-eq energetskega sektorjaSlika 2. Emisija CO<sub>2</sub>-eq energetskega sektorja [29]Ekvivalentna emisija CO<sub>2</sub>-eq transportnih podsektorjaSlika 3. Ekvivalentna emisija CO<sub>2</sub> transportnih podsektorja [29]



**Slika 4. Struktura izvora električne energije dostavljene krajnjim kupcima [14]**



**Slika 5. Struktura obnovljivih izvora električne energije [14]**



**Slika 6. Struktura fosilnih izvora električne energije [14]**

## 5. ANALIZA HRVATSKE RO-RO PUTNIČKE FLOTE

### 5.1 Referentni putnički Ro-Ro brod

Za usporedbu dva različita energetska sustava razmatrat će se dizelski Ro-Ro putnički brod s navedenim značajkama.

Duljina preko svega:	99,8 m
Duljina između okomica:	89,1 m
Širina:	17,5 m
Gaz:	2,4 m
Nosivost pri maksimalnom gazu:	950 t
Projektna brzina:	12,5 kn



Slika 7. Ro-Ro putnički brod Kornati [30]

Brod je opremljen s 4 Volvo Penta motora pojedinačne trajne nazivne snage 450 kW. Projektna brzina broda iznosi 12,5 čvorova pri 80 % MCR (1440 kW). Brod može primiti 600 putnika, 320 u zatvorenom dijelu i 280 na otvorenim palubama. Kapacitet vozila je 145 automobila standardnih dimenzija. Na samom jugu Hrvatske ovaj trajekt povezuje luku Ploče i luku Trpanj. Udaljenost između dvije luke od 8,15 nautičkih milja u jednom smjeru prelazi za 60 minuta. Isključujući vrijeme manevriranja u luci, smatra se kako brod plovi 50 minuta prosječnom brzinom od 9,8 čvorova.

## 5.2 Podaci o floti

S ciljem procjene mogućnosti elektrifikacije Ro-Ro putničke flote Jadranskog mora, prvo je potrebno analizirati trenutno stanje hrvatske Ro-Ro putničke flote. Glavni razlozi unaprijeđena energetske učinkovitosti ovih brodova su regulacije vezane za emisije ispušnih plinova i sama fosilna goriva. Prvotno je važno odrediti trenutnu energetska učinkovitost flote, te odrediti ukupnu potrošnju goriva (eng. *Fuel Consumption, FC*).

Analiza energetske učinkovitosti temeljena je na podacima Svjetskog registra brodova IHS Fairplay (eng. World register of ships, WROS) korištenjem pristupa prihvaćenog za proračun EEDI-a, [31]. Sveukupna društvena, odnosno ekonomska korist Ro-Ro putničkog broda iskazuje se u broju transportiranih putnika i vozila. Podaci o prevezenom broju putnika i vozila preuzeti su od Hrvatske agencije za kratka linijska putovanja [32]. Postoje dvije metode analize ukupne potrošnje hrvatske Ro-Ro putničke flote. Prva i direktna metoda je skupiti podatke o potrošenom gorivu od strane tvrtki koje obavljaju prijevoz. Problem predstavlja javna nedostupnost ovih podataka. Druga metoda je zbrojimo ukupnu godišnju potrošnju tokom svake rute. Kako bi se izračunala prosječna potrošnja goriva na ruti ( $FC_{route}$ ), potrošnja u jednom smjeru puta svake rute ( $FC_{trip}$ ) mora biti pomnožena s brojem putovanja tokom godine na toj ruti  $N$ .

$$FC_{annual} = \sum_{i=0}^n FC_{route,i} \quad (1)$$

$$FC_{route} = FC_{trip} \times N_{trips} \quad (2)$$

$$FC_{trip} = P_t \times SFOC \times T_{trip} \quad (3)$$

Potrošnju u jednom smjeru računamo pomoću prosječne potražnje snage ( $P_T$ ), specifične potrošnje goriva (eng. *Specific Fuel Oil Consumption, SFOC*) i vremenu trajanja rute ( $t_{trip}$ ).

Vrijednosti prosječne ukupne potrebne snage i specifične potrošnje goriva ovise o mnogim parametrima poput samog broda, rute, vremena, popunjenosti broda. Budući da prijevoznici često mijenjaju brodove na rutama bez prevelikog pravila u rasporedu, vrlo je teško procijeniti potrošnju na specifičnoj ruti. Unatoč tome relativno je lagano odrediti prosječnu brzinu plovidbe na ruti s obzirom da se raspored polazaka ne mijenja u ovisnosti o trajektu. Ukoliko brži brod s većom nazivnom snagom motora preuzme rutu od prethodno sporijeg broda, jednostavno će se smanjiti opterećenje motora čime će se smanjiti i brzina plovidbe. Predpostavlja se kako će ploveći smanjenom brzinom, ukupna snaga biti slična onoj sporijeg broda, odnosno predpostavlja se kako snaga korištena tijekom rute ovisi o brzini broda, a ne o brodu korištenom na toj ruti. Regresijska krivulja koja povezuje propulzijsku snagu  $P_p$  i brzinu broda  $v$  može biti definirana kao funkcija snage uz dodane parameter  $a$  i  $c$ , gdje je parametar  $c$  vrijednosti blizu broja 3.

$$P_p = a \times v^a \quad (4)$$

Parametri su određeni prema podacima iz WROS baze podataka ro-ro putničkih brodova. Kako bi se u račun uvrstila potreba za pomoćnom snagom, snaga propulzije  $P_p$  uvećana je za 10 % kako bi se dobila ukupna snaga  $P_t$ . Pretpostavka o povećanju snage za 10 % definitivno izaziva odstupanja od stvarne potrošnje, ali jedini alternativni način je pratiti svaki brod, njegovu snagu i brzinu tijekom godine na svakoj ruti, a takvi podatci su nedostupni. Specifična potrošnja goriva ovisna je o broju okretaja motora, predpostavljeno za motore sa srednjom brzinom okretaja  $SFOC$  je 180 g/kWh, dok je za brže motore  $SFOC$  215 g/kWh. Analiza flote pokazuje kako su 44 ro-ro putnička broda koja plove Hrvatskom stranom Jadranskog mora zastarjela. Prosječna starost flote je 26 godina, uz samo 6 brodova ispod 10 godina starosti. Energetska učinkovitost tipičnog ro-ro putničkog broda u Jadranskom moru nije u skladu s EEDI zahtjevima, odnosno postignuti EEDI je 83,41 g CO<sub>2</sub>/t-nm što je značajno više od referentne vrijednosti od 71,57 g CO<sub>2</sub>/t-nm za brod iste vrste i veličine [29]. Ukupno je 27 trajektnih linija Jadranskog mora obuhvaćeno ovom analizom. 21 linija povezuje kopno i otoke, 1 linija povezuje dva kopnena dijela Hrvatske, 2 linije povezuju otoke, dok postoje i 3 međunarodne

linije koje povezuju Hrvatsku i Italiju. Sveukupno se godišnje isplovi 50 000 puta tijekom kojih se preplovi 400 000 nautičkih milja. Podaci o broju prevezenih putnika i vozila na svim rutama dani su u Tablici 4.

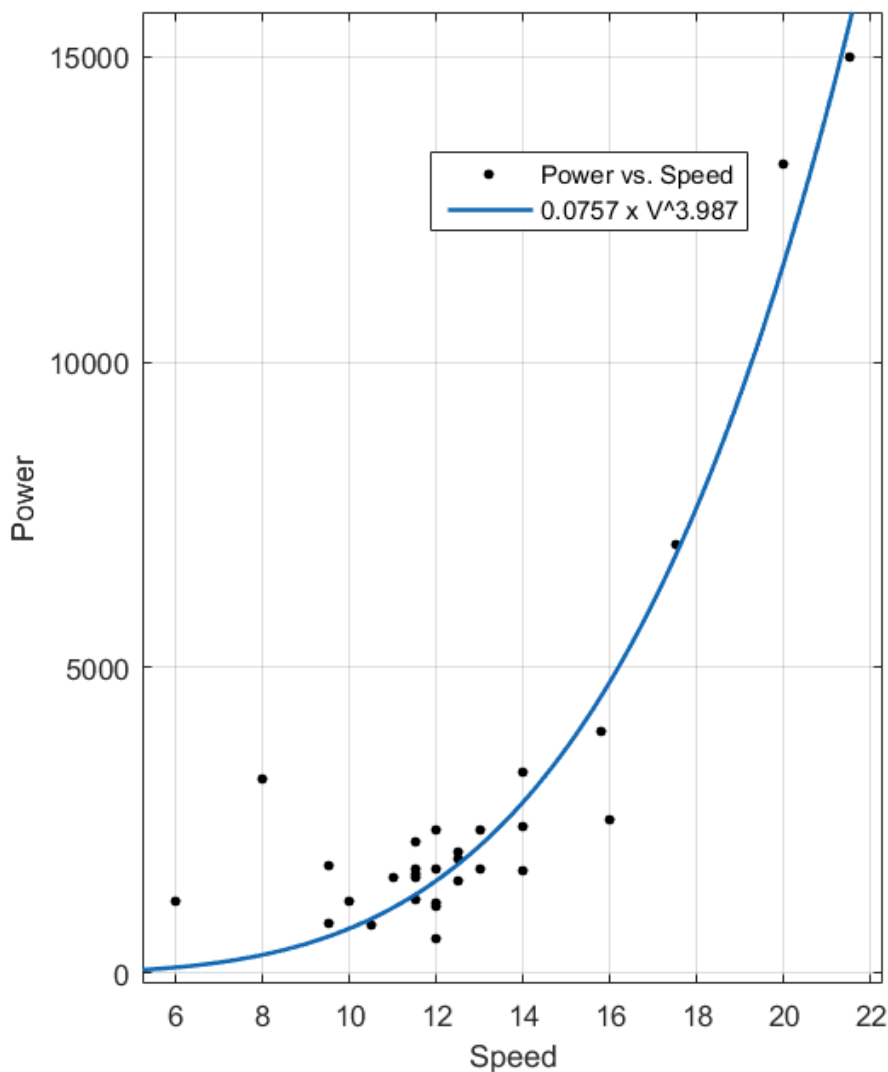
**Tablica 4. Broj prevezenih putnika i vozila u Hrvatskoj pomoću trajekata**

Godina	Ukupni broj putnika	Ukupni broj vozila
2017.	10 899 630	3 294 172
2016.	10 236 946	3 102 264
2015.	9 851 454	2 993 793
2014.	9 350 276	2 825 886
2013.	9 271 372	2 771 168
2012.	9 149 478	2 764 073

### 5.3. Ukupna potrošnja goriva

Temeljeno na podacima u WROS bazi podataka, izračunata je regresijska krivulja ovisnosti brzine broda i potrebne snage. Za 10 brodova nije dostupan podatak o projektnoj brzini broda, stoga je regresijska krivulja dobivena analizom 34 broda.





**Slika 8. Ovisnost snage motora o brzini broda [29]**

Analiza pokazuje da je snaga glavnog motora ovisna o brzina broda približno na četvrtu potenciju, odnosno parametar  $a$  je jednak 0,0757, dok je parametar  $c$  jednak 3,987, s relativno visokim faktorom korelacije koji je jednak  $R^2 = 0,91$ .

Korištenom metodologijom analiza pokazuje kako je ukupna godišnja potrošnja goriva Ro-Ro putničkih brodova na obuhvaćenim rutama Jadranskog mora približno 9100 tona.

S obzirom na prosječnu starost flote vrlo je teško izvesti modifikacije potrebne za prijelaz na alternativna goriva. Kako većina alternativnih goriva nije u odgovarajućoj mjeri dostupna, pobliže će se sagledati mogućnost elektrifikacije referentnog broda. Napretkom tehnologije baterija, cijena tehnologije se znatno spustila. Danas dostupne nove tehnologije su znatno olakšale masu bateriju, spram starih olovnih baterija današnje litij-ionske baterije mogu pohraniti jednaku količinu energije uz samo 10 % mase čime su prihvatljive za uporabu u

pomorstvu [33]. Kod obrađenog referentnog broda postoji mogućnost zamjene dizelskih motora električnima snage 1800 kW i uz njih pratećim baterijskim sustavom. Takav prijelaz na električnu energiju bi smanjio emisiju stakleničkih plinova za 95 %, dok bi se operativni troškovi spustili za 80 % uslijed jednostavnijeg održavanja elektromotora i povoljnije cijene električne energije u usporedbi s dizelskim gorivom. Glavna mana i prepreka razvoju su velike početne investicije. Jafarzadef i Schjøberg u svojoj studiji zaključili su kako Ro-Ro brodovi imaju pogodan operativni profil za prelazak na elektro-propulzijske sustave [34].

#### **5.4. Prednosti elektrifikacije**

Trenutno je većina Europskih Ro-Ro broda starija od 20 godina i potrebna su nova ulaganja u efikasnije brodove s manjim emisijama. Koncept električnih Ro-Ro brodova cilja na potpunu preobrazbu na kratkim i srednje dugim trajektnim linijama. Koncept predstavlja više od samo održivog ekološkog aspekta i smanjenja emisija. Energetski učinkovitiji brodovi nude manju potrošnju energenata uz kod električnog broda i nižu cijenu samog energenta po jedinici snage, čime se postiže manji operativni trošak uz viša početna ulaganja. Inovativan dizajn može pružiti mogućnosti postizanja većih brzina budući da o brzina plovidbe ne utječe na emisiju plinova što je bitno u područjima ograničenja emisija gdje konvencionalni trajekti moraju eventualno i usporiti radi smanjenja emisije. Jednostavnija konstrukcija s mogućnošću odabira različitih mjesta za smještaj baterija u za druge namjene teško iskoristive prostore pruža mogućnosti različitog dizajna. Inovativan dizajn oplata broda značajna je prednost na područjima vrlo promjenjivih vremenskih uvjeta s posebnim osvrtom na vjetrovita područja poput tjesnaca u Skandinaviji. Komfor je također na strani električnog broda uslijed smanjenja buke na brodu [35].



**Slika 9.** Norveški potpuno električni trajekt MV Ampere [36]

## 6. ZAKLJUČAK

Većina današnjih brodova kao primarne pokretače propulzora koristi dizelske motore. Razlog je njihova učinkovitost, konceptualna jednostavnost i veća pouzdanost u odnosu na dizelske motore. Negativni utjecaj na okoliš s posljedično sve strožom regulacijom emisija štetnih plinova te rastuće cijene goriva stvaraju potrebu za alternativnim izvorima energije za pogon broda. Uvođenjem novih regulativa vezanih za zaštitu okoliša te napretkom tehnologija vezanih uz korištenje i proizvodnju alternativnih goriva ona postaju sve konkurentniji energent. Nedvojbeno je i da se izvori fosilnih goriva sve više smanjuju, stoga je uvođenje alternativnih energenata gotovo neizbježno. Alternativna goriva razlikuju se po porijeklu, a također i prema različitim prednostima i ograničenjima primjene. Neka od alternativnih goriva, poput etanola i biodizela, proizvedena su iz obnovljivih izvora kao što je šećerna trska ili kukuruz, dok je LPG proizvod procesa destilacije nafte. Često su ova goriva učinkovitija i proizvode manje zagađenja od konvencionalnih goriva. Kroz provedenu analizu prikazana je mogućnost elektrifikacije flote Ro-Ro putničkih brodova. Ukoliko je, s obzirom na specifične okolnosti primjene elektrifikacija broskog sustava moguća ona donosi znatne mogućnosti uštede i pojednostavljenja cjelokupnog sustava pogona broda. Prednosti elektrificiranog broda poput nulte emisije plinova (u eksploataciji) i minimalnog utjecaja na prirodni okoliš pri plovidbi u naseljenom priobalnom području predstavljaju upravo ciljeve zacrtane regulativom. Nedostaci elektrifikacije su velika početna ulaganja i ograničeni operativni profili elektrificiranih brodova. Za sada alternativna goriva nalaze primjenu u specifičnim slučajevima i pilot projektima, dok njihovo vrijeme zasigurno tek dolazi. U svakom slučaju, u budućnosti je potrebno poduzeti daljnja detaljnija istraživanja svojstava pojedinih alternativa u svrhu otkrivanja alternative ili pak kombinacija alternativa koje su najprikladnije u određenoj situaciji, a koje imaju najbolje performanse, najmanje štetan učinak na okoliš, kao i najveću financijsku isplativost u usporedbi s ostalim postojećim opcijama.

---

**LITERATURA**

- [1] Babatunde J.A., Pilatb R.: Crude oil reserve estimation: An application of the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model, 1991.
- [2] Odeh N.A., Cockerill T.T.: Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. *Energy Policy*, 36 (1), 367-380, 2008.
- [3] International Maritime Organization (IMO), 2014. Third IMO GHG Study. Executive Summary and Final Report, <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>, pristup: 7. rujna 2020.
- [4] Chen L., Yip T.L., Mou J.: Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 280-291, 2018.
- [5] Sofiev M., Winebrake J.J., Johansson L., Carr E.W., Prank M., Soares J., Vira J., Kouznetsov R., Jalkanen J., Corbet J.J.: Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. *Nature Communications*. 9 (1), doi: 10.1038/s41467-017-02774-9, 2018.
- [6] MEPC.203(62): Amendments to the Annex of Protocol of 1997 to amend the International convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI), 2011.
- [7] MEPC.213(63): Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan, 2012.
- [8] MEPC.214(63): Guidelines on the survey and certification of energy efficiency design index (EEDI), 2012.
- [9] MEPC.224(64): Amendments to the 2012 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships, 2014.
- [10] MEPC.245(66): Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, London, UK, 2014.
- [11] MEPC.251(66): Amendments to MARPOL Annex VI and the 2008 NOX Technical Code, 2014.

- [12] MEPC.215(63): Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), 2012.
- [13] <https://dieselnet.com/standard/inter/imo.php>, pristup: 14. rujna 2020.
- [14] Perčić M., Vladimir N., Fan A.: Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia. *Applied Energy*, 279, 115848, 2020.
- [15] Brynolf S., Fridell E., Andersson K.: Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production*, 74, 86-95, 2014.
- [16] Wan C., Yan X., Zhang D., Yang Z.: Novel policy making aid model for the development of LNG fuelled ships. *Transportation Research Part A*, 119, 29–44, 2014.
- [17] Ekanem Attah E. and Bucknall R.: An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI. *Ocean Engineering*, 110, 62-74, 2015.
- [18] Bronzan, B.: LNG, Energetika marketing Zagreb, 1999.
- [19] DNV GL-Maritime.: Assessment of selected alternative fuels and technologies, 2018.
- [20] IRENA.: Hydrogen from renewable power – Technology outlook for the energy transition, 2018.
- [21] DNV GL.: Assessment of selected alternative fuels and technologies, DNV GL position paper, 2018.
- [22] Brohi E. A.: Ammonia as fuel for internal combustion engines?”, Master’s Thesis in Sustainable Energy Systems, Chalmers University, Sweden, 2014.
- [23] Labudović, B.:Ukapljeni naftni plin osnovne primjene, Energetika marketing Zagreb, 2007.
- [24] REN21.: Renewables 2018 Global Status Report. Market and Industry Trends, 2018.
- [25] <http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>, pristup: 7. rujna 2020.
- [26] Toljan, I.: Reforma hrvatskog elektroenergetskog sektora, 2017.
- [27] <https://www.zakon.hr/z/891/Zakon-o-uspostavi-infrastrukture-za-alternativna-goriva>, pristup: 7. rujna 2020.
- [28] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike: Godišnji energetske pregled 2016. godine, <http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2018/06/EUH2016.pdf>, pristup: 11. rujna 2020.

- [29] 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, 122638, 2020.
- [30] <https://www.jadrolinija.hr/o-nama/brodovi/trajekti/trajekti-lokalnih-linija/kornati>, pristup: 14. rujna 2020.
- [31] <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/ihs-maritime-data-world-register-of-ships-wros-dot-n6600117q0212-1>, pristup: 4. rujna 2020.
- [32] <https://agencija-zolpp.hr/pristup-informacijama>, pristup: 2. rujna 2020.
- [33] Taljegård M., Brynolf S., Hansson J., R. Hackl.: *Electrofuels – A possibility for shipping in a low carbon future*, 2015.
- [34] Jafarzadeh S., Schjøberg I.: *Operational profiles of ships in Norwegian waters: An activity-based approach to assess the benefits of hybrid and electric propulsion*, 2018.
- [35] Gagatsi E., Estrup T.: *Exploring the Potentials of Electrical Waterborne Transport in Europe: The E-ferry Concept*, 2016.
- [36] [https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:1189801/mmsi:257642000/im\\_o:9683611/vessel:AMPERE](https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:1189801/mmsi:257642000/im_o:9683611/vessel:AMPERE), pristup: 14. rujna 2020.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc