

# Simulacija pogona ribarskog broda alternativnim gorivima u uvjetima stvarne eksploatacije

---

Curman, Dorian

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

*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:235:449683>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dorian Curman**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić, dipl. ing.

Student:

Dorian Curman

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. dc. Momiru Sjeriću, na znanjima i savjetima koji su mi mnogo pomogli u izradi ovog rada.

Zahvaljujem asistentu Josipu Krajnoviću, mag. ing. koji mi je također puno pomogao u izradi završnog rada.

Zahvaljujem se roditeljima Daliboru i Marini, bratu Lovri, djevojci Nikolini, prijateljima Dariu, Viktoru, Patriku, Ivanu, Jakovu na velikoj podršci i razumijevanju tijekom dosadašnjeg studiranja.

Dorian Curman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i 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 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dorian Curman** JMBAG: **0035235987**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija pogona ribarskog broda alternativnim gorivima u uvjetima stvarne eksploatacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of fishing vessel propulsion with alternative fuels in real operating conditions**

Opis zadatka:

Pogonski sustavi brodova bazirani su na primjeni Dieselovih motora. U cilju smanjenja uporabe fosilnih goriva i ugljičnog otiska u pomorskom transportu razmatraju se pogonski sustavi na različita alternativna goriva kao što su prirodni plin, metanol, vodik, amonijak, itd. Primjenom simulacijskih alata moguće je analizirati utjecaj primjene alterantivnog goriva na značajke rada i emisije štetnih tvari iz pogonskog sustava broda u uvjetima stvarne eksploatacije. U radu je potrebno za odabrani ribarski brod razmotriti mogućnost i utjecaj primjene nekoliko alternativnih goriva na dekarbonizacijski potencijal.

U radu je potrebno:

- opisati odabran ribarski brod i originalni pogonski sustav,
- izraditi 1D/0D simulacijski model pogonskog sustava ribarskog broda,
- provesti kalibraciju simulacijskog modela prema podacima o značajkama rada i emisijama iz motora dostupnima od proizvođača,
- definirati nekoliko plovnih ciklusa karakterističnih za odabrani ribarski brod u uvjetima rada,
- odabrati nekoliko alternativnih goriva i proširiti simulacijski model motora za njihovu primjenu,
- provesti simulacije plovnih ciklusa broda za originalni pogonski sustav i uz primjenu pogona na alternativna goriva,
- izračunati emisije ugljičnog dioksida i dušikovih oksida te ih međusobno usporediti za originalni pogonski sustav i uz primjenu pogona na alternativna goriva,
- izvesti zaključke.

Odabir ribarskog broda i alternativnih goriva će biti definirani u dogovoru s mentorom tijekom izrade rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.


Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.  
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.  
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

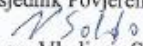
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.  
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.  
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. ODABRANI BROD I POGONSKI SUSTAV .....	2
2.1. Ribarski brod Jadran 3 .....	2
2.2. Pogonski sustav.....	3
3. SIMULACIJSKI MODEL POGONSKOG SUSTAVA RIBARSKOG BRODA .....	6
3.1. AVL .....	6
3.2. AVL BOOST .....	6
3.3. Simulacijski model.....	6
4. KALIBRACIJA SIMULACIJSKOG MODELA .....	9
4.1. Kalibracija snage i potrošnje goriva.....	9
4.2. Kalibracija emisija motora .....	11
4.3. Kalibracija snage za tipičnu propelersku krivulju.....	13
5. DEFINIRANJE PLOVNOG CIKLUSA RIBARSKOG BRODA .....	15
6. ODABIR ALTERNATIVNIH GORIVA .....	17
6.1. Metanol .....	17
6.2. Vodik.....	18
6.3. Prilagodba simulacijskog modela pogonskog sustava .....	18
7. IZRAČUN EMISIJA UGLJIČNOG DIOKSIDA I DUŠIKOVIH OKSIDA.....	21
7.1. Određivanje stacionarne radne točke na propelerskoj krivulji.....	21
7.2. Emisije originalnog pogonskog sustava.....	23
7.2.1. Emisije ugljičnog dioksida.....	23
7.2.2. Emisije dušikovih oksida .....	25
7.3. Emisije pogonskog sustava u kombinaciji s metanolom .....	26
7.3.1. Emisije ugljičnog dioksida.....	28
7.3.2. Emisije dušikovih oksida .....	31
7.4. Emisije pogonskog sustava u kombinaciji s vodikom .....	33
7.4.1. Emisije ugljičnog dioksida.....	34
7.4.2. Emisije dušikovih oksida .....	36
7.5. Usporedba dobivenih rezultata.....	38
8. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	43

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Ribarski brod Jadran 3.....	2
Slika 2.	Motor Cummins NT855-M300 .....	4
Slika 3.	Shema motora u programu AVL Boost.....	7
Slika 4.	Primjer zadavanja parametara Vibe-ove funkcije .....	8
Slika 5.	Deklarirana krivulja snage i potrošnje.....	9
Slika 6.	Dijagram usporedbe zadane i deklarirane potrošnje goriva .....	10
Slika 7.	Dijagram usporedbe dobivene i deklarirane snage.....	10
Slika 8.	IMO Tier standardi .....	12
Slika 9.	Topografski dijagram emisija NO <sub>x</sub> .....	12
Slika 10.	Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva .....	13
Slika 11.	Dijagram usporedbe zadane i deklarirane potrošnje goriva za tipičnu propellersku krivulju .....	14
Slika 12.	Dijagram usporedbe dobivene i deklarirane snage za tipičnu propellersku krivulju .....	14
Slika 13.	Dijagram brzine vožnje za vrijeme vuče mreže .....	15
Slika 14.	Dijagram kumulativnog utrošenog goriva za vrijeme vuče mreže.....	16
Slika 15.	Kemijska struktura molekule metanola .....	17
Slika 16.	Kemijska struktura molekule vodika.....	18
Slika 17.	Prilagođena shema motora za primjenu alternativnih goriva .....	19
Slika 18.	Prikaz stacionarne radne točke potrošnje goriva na propellerskoj krivulji .....	22
Slika 19.	Prikaz stacionarne radne točke snage na propellerskoj krivulji .....	22

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovne značajke motora .....	3
Tablica 2. Energetski i maseni udjeli metanola.....	27
Tablica 3. Masena potrošnja goriva po satu za određene energetske udjele metanola .....	28
Tablica 4. Vrijednosti ukupne mase utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni energetski udio metanola.....	28
Tablica 5. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetskom udjelu metanola .....	29
Tablica 6. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetskom udjelu metanola uz primjenu CCS sustava.....	30
Tablica 7. Vrijednosti emisije dušikovih oksida pri određenom energetskom udjelu metanola .....	31
Tablica 8. Vrijednosti masenog protoka dušikovih oksida pri određenom energetskom udjelu metanola .....	32
Tablica 9. Vrijednosti ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetskom udjelu metanola .....	32
Tablica 10. Energetski i maseni udjeli vodika .....	34
Tablica 11. Masena potrošnja goriva po satu za određene energetske udjele vodika .....	34
Tablica 12. Vrijednosti ukupne mase utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni energetski udio vodika.....	35
Tablica 13. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetskom udjelu vodika .....	36
Tablica 14. Vrijednosti emisije dušikovih oksida pri određenom energetskom udjelu vodika	36
Tablica 15. Vrijednosti masenog protoka dušikovih oksida pri određenom energetskom udjelu vodika .....	37
Tablica 16. Vrijednosti ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetskom udjelu vodika .....	37
Tablica 17. Usporedba dobivenih rezultata .....	38
Tablica 18. Usporedba dobivenih rezultata u postotcima .....	39



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$c$	$\frac{\text{kgC}}{\text{kgG}}$	Maseni udio ugljika u dizelskom gorivu
$G_h$	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Masena potrošnja goriva po satu
$G^{uk}$	kg	Ukupna masa utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa
$H_d$	$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$	Donja ogrjevna vrijednost
$M$	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	Molarna masa
$m_{NO_x, h}$	$\frac{\text{g}}{\text{h}}$	Maseni protok dušikovih oksida
$m_{CO_2}^{CCS}$	kgCO <sub>2</sub>	Ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida uz primjenu CCS sustava
$m_{CO_2}^{e\text{-metanol}}$	kgCO <sub>2</sub>	Ukupna masa ugljičnog dioksida koja je potrebna za proizvodnju e-metanola
$m_{CO_2}^{neto}$	kgCO <sub>2</sub>	Ukupna neto masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa
$m_{CO_2}^{uk}$	kgCO <sub>2</sub>	Ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa
$m_{NO_x}^{uk}$	kgNO <sub>x</sub>	Ukupna masa emitiranog dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa
$NO_x$	$\frac{\text{g}}{\text{kWh}}$	Emisija dušikovih oksida
$n$	min <sup>-1</sup>	Brzina vrtnje motora
$P$	kW	Snaga
$P_{potr}$	kW	Potrebna snaga motora
$p_e$	bar	Srednji efektivni tlak
$t$	min	vrijeme
$t_{uk}$	h	Ukupno vrijeme trajanja jednog ciklusa
$V_G$	L	Kumulativno utrošeno gorivo
$V_{G, h}$	$\frac{\text{L}}{\text{h}}$	Količina potrošenog goriva u satu
$v_{sr}$	$\frac{\text{km}}{\text{h}}$	Srednja brzina vožnje
$w_{CH_3OH}$	%	Maseni udio metanola
$w_{H_2}$	%	Maseni udio vodika
$x_{CH_3OH}$	%	Energetski udio metanola
$x_{H_2}$	%	Energetski udio vodika
$\eta_{CCS}$	%	Učinkovitost sustava za hvatanje CO <sub>2</sub>
$\rho_D$	$\frac{\text{kg}}{\text{L}}$	Gustoća dizelskog goriva

---

**SAŽETAK**

U svrhu smanjenja negativnog utjecaja brodskog transporta na okoliš, sve se više istražuju alternativna goriva koja mogu smanjiti emisije štetnih plinova. Među njima, metanol i vodik ističu se kao potencijalne opcije zbog svojih različitih kemijskih i gorivih karakteristika. Ovaj rad analizira utjecaj primjene metanola i vodika u kombinaciji s dizelskim gorivom na emisijske karakteristike brodskog motora.

Istraživanje je provedeno putem numeričkih simulacija u softverskom alatu AVL BOOST, pri čemu su ispitani različiti udjeli alternativnih goriva u smjesi. Prvo su analizirani osnovni parametri izgaranja i emisija pri radu motora na čisto dizelsko gorivo, a zatim su dobiveni rezultati uspoređeni s varijantama koje uključuju metanol i vodik. Posebna pažnja posvećena je emisijama dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) i ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), budući da imaju ključnu ulogu u ocjeni ekološke prihvatljivosti goriva.

Rezultati pokazuju da korištenje metanola u smjesi s dizelskim gorivom dovodi do smanjenja emisija  $\text{NO}_x$ , ali uz povećanje emisija  $\text{CO}_2$ . S druge strane, primjena vodika rezultira smanjenjem emisija  $\text{CO}_2$ , ali uz istovremeni porast emisija  $\text{NO}_x$ , što postavlja izazove u optimizaciji procesa izgaranja i kontrole emisija. Ove promjene u emisijama posljedica su različitih mehanizama sagorijevanja metanola i vodika te njihovog utjecaja na temperaturu i kemijski sastav izgaranja.

Dobiveni rezultati ukazuju na to da metanol i vodik mogu igrati značajnu ulogu u smanjenju određenih štetnih emisija u brodskom sektoru, ali je za njihovu širu primjenu potrebno dodatno istraživanje. Posebno je važno razviti strategije za smanjenje emisija  $\text{NO}_x$  kod vodika i optimizirati sustave sagorijevanja kako bi se iskoristile prednosti ovih alternativnih goriva u skladu s ekološkim regulativama.

Ključne riječi: alternativna goriva, metanol, vodik, emisije, dušikovi oksidi, ugljični dioksid, brodski motor

---

**SUMMARY**

In order to reduce the environmental impact of maritime transport, alternative fuels that can lower harmful emissions are being increasingly explored. Among them, methanol and hydrogen stand out as potential options due to their distinct chemical and combustion characteristics. This study analyzes the impact of using methanol and hydrogen in combination with diesel fuel on the emission characteristics of a marine engine.

The research was conducted through numerical simulations using the AVL BOOST software, where different proportions of alternative fuels in the mixture were examined. First, the fundamental combustion and emission parameters were analyzed for pure diesel fuel operation, and then the results were compared with variations that included methanol and hydrogen. Special attention was given to nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, as they play a key role in assessing the environmental acceptability of fuels.

The results indicate that using methanol in a diesel blend leads to a reduction in NO<sub>x</sub> emissions but increases CO<sub>2</sub> emissions. On the other hand, the application of hydrogen results in lower CO<sub>2</sub> emissions but causes an increase in NO<sub>x</sub> emissions, posing challenges for optimizing the combustion process and emission control. These changes in emissions are a consequence of the different combustion mechanisms of methanol and hydrogen, as well as their influence on combustion temperature and chemical composition.

The findings suggest that methanol and hydrogen could play a significant role in reducing certain harmful emissions in the maritime sector, but further research is necessary for their broader implementation. In particular, strategies need to be developed to reduce NO<sub>x</sub> emissions when using hydrogen and to optimize combustion systems to fully utilize the benefits of these alternative fuels while complying with environmental regulations.

Key words: alternative fuels, methanol, hydrogen, emissions, nitrogen oxides, carbon dioxide, marine engine

## 1. UVOD

Pomorski sektor ima značajnu ulogu u globalnoj ekonomiji, no tradicionalni pogonski sustavi brodova koji koriste fosilna goriva pridonose emisijama štetnih plinova i povećanju ugljičnog otiska. Većina brodova koristi Dieslove motore zbog njihove pouzdanosti, učinkovitosti i sposobnosti rada u teškim uvjetima. Dieselovi motori, koji spadaju u motore s unutarnjim izgaranjem, za razliku od Ottovih motora koriste veći kompresijski omjer i dizelsko gorivo koje se samozapali pod visokim tlakom. Ovi motori koriste unutarnje ubrizgavanje goriva, pri čemu se gorivo izravno ubrizgava u prostor za izgaranje pod visokim tlakom, čime se postiže učinkovito izgaranje i oslobađanje energije iz goriva. Dieselovi motori omogućuju visoku energetska gustoću i dugotrajnu, kontinuiranu upotrebu, zbog čega su široko primijenjeni u pomorskom sektoru. Međutim, iako su ti motori izuzetno korisni, oni također proizvode znatne količine štetnih emisija, uključujući ugljikov dioksid CO<sub>2</sub> i dušikove okside NO<sub>x</sub>, koji su glavni uzročnici zagađenja okoliša.

Alternativna goriva privlače posebnu pozornost zbog svojih potencijala za smanjenje ugljičnog otiska i negativnog utjecaja na okoliš. Uvođenje ovih goriva u pomorski sektor zahtijeva analizu njihovih utjecaja na emisije štetnih plinova, posebno CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, koji čine ključne zagađivače u ovom sektoru. Iako alternativna goriva kao što su vodik i metanol mogu donijeti značajna poboljšanja u smanjenju emisija tih plinova, njihova primjena zahtijeva pažljivo razmatranje specifičnih karakteristika svakog goriva u kontekstu pomorske industrije. Metanol, kao tekuće gorivo, može omogućiti lakšu integraciju u postojeće brodske sustave, dok vodik, s obzirom na svoje specifične zahtjeve u pogledu skladištenja i distribucije, predstavlja izazov, ali i priliku za smanjenje emisija.

U ovom radu će se analizirati utjecaj primjene alternativnih goriva, konkretno vodika i metanola, na emisije štetnih plinova kod ribarskog broda Jadran 3. Korištenjem simulacijskih alata razmotrit će se utjecaj primjene ovih goriva na emisije CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, kao i na značajke rada motora u uvjetima stvarne eksploatacije broda. Analiza će obuhvatiti usporedbu emisija kod korištenja tradicionalnih fosilnih goriva i alternativnih goriva.

## 2. ODABRANI BROD I POGONSKI SUSTAV

### 2.1. Ribarski brod Jadran 3

Brod Jadran 3 je ribarski brod dizajniran za obavljanje komercijalnog ribolova u obalnim i otvorenim morskim područjima. Njegova konstrukcija i tehničke karakteristike prilagođene su zahtjevima ribarskih operacija, uključujući kapacitet za skladištenje ulova, autonomiju plovidbe te pouzdanost u različitim vremenskim uvjetima.

Jadran 3 lovi ribu metodom kočarenja, pri čemu vuče veliku mrežu (koću) po morskom dnu, hvatajući razne vrste riba i morskih organizama dok se mreža polako zatvara i skuplja ulov. Plovni ciklus broda se dakle sastoji od isplovljavanja, spuštanja mreže, hvatanja ribe u mrežu te zatvaranja mreže i doplovljavanja u luku.

Opremljen je Dieselovim motorom koji osigurava dovoljnu snagu za dugotrajne plovidbe i rad ribolovnih alata. Pogonski sustav broda temelji se na motoru s unutarnjim izgaranjem i izravnim ubrizgavanjem goriva, što omogućuje optimalnu potrošnju goriva i kontinuirani rad tijekom dužih vremenskih razdoblja. Uz to, Jadran 3 ima kapacitet za smještaj posade, skladištenje goriva i opreme potrebne za ribolov, što ga čini praktičnim i funkcionalnim plovilom za svakodnevne operacije. Prikaz samog broda se vidi na [Slika 1].



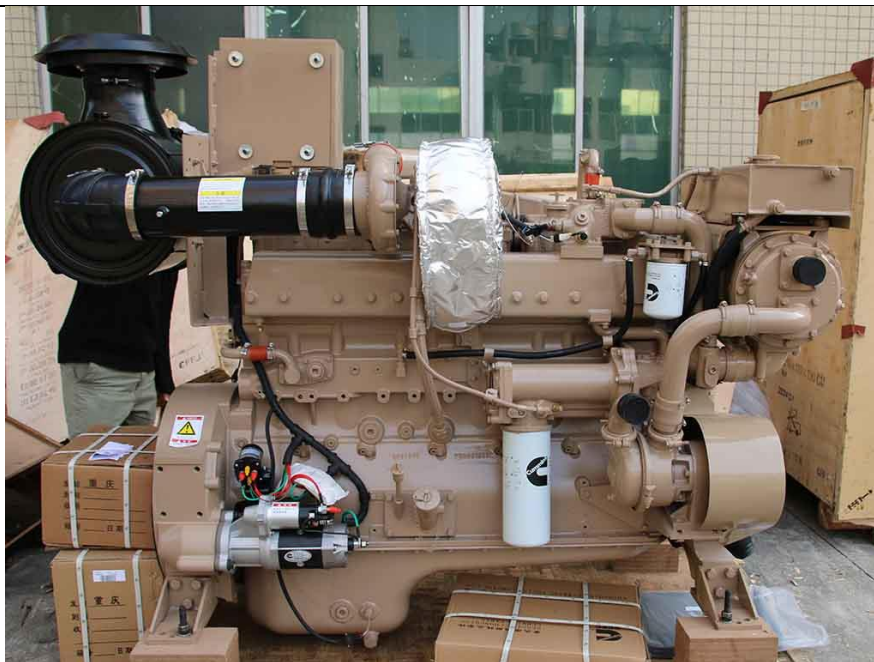
Slika 1. Ribarski brod Jadran 3

## 2.2. Pogonski sustav

Za pogon broda se koristi motor Cummins NT855-M300. Ovaj motor je dio NT serije, poznate po pouzdanosti i učinkovitosti u zahtjevnim primjenama. Oznaka NT855-M300 označava da motor ima N – četiri ventila po cilindru, T – turbopunjač, M – (marine) motor je za pomorsku primjenu, dok broj 855 označava radni volumen od 855 kubičnih inča (14 litara), a 300 predstavlja najveću nazivnu snagu od 300 konjskih snaga (224 kW). Opremljen je turbopunjačem, kao navedeno u prethodnoj rečenici, te naknadnim hlađenjem za poboljšanje performansi. Dizajniran je za jednostavno održavanje s lako dostupnim komponentama, što smanjuje vrijeme zastoja i operativne troškove. U [Tablica 1] su prikazane osnovne značajke motora, a na [Slika 2] je prikazan izgled motora.

**Tablica 1. Osnovne značajke motora**

Radni volumen, L	14
Promjer cilindra, mm	140
Hod klipa, mm	152
Broj cilindara	6
Raspored cilindara	Redni
Nazivna snaga, kW (hp)	224 (300)
Nazivna brzina vrtnje motora, $\text{min}^{-1}$	1800
Pogonsko gorivo	Plavi dizel
Kompresijski omjer	14.5:1
Nazivna potrošnja goriva, L/h	58



**Slika 2. Motor Cummins NT855-M300**

Rad motora se ugrubo može opisati na sljedeći način. Zrak ulazi u motor kroz usisnu cijev, a zatim prolazi kroz pročišćivač zraka koji uklanja sve nečistoće, prašinu i čestice koje bi mogle oštetiti unutarnje komponente motora. Nakon pročišćavanja, zrak putuje prema kompresoru turbopunjača. Ovdje dolazi do komprimiranja, čime se povećava tlak i gustoća zraka, što omogućava veći stupanj punjenja, veće snage i bolji efektivni stupanj djelovanja.

Zrak zatim prolazi kroz izmjenjivač topline, gdje se njegova temperatura smanjuje. Ovaj korak je važan jer hladniji zrak primarno dovodi do većeg stupnja punjenja. Hlađeni zrak potom ulazi u cilindar, gdje se proces izgaranja odvija. Zrak ulazi u cilindar otvaranjem usisnih ventila, a zatim se komprimira tijekom kretanja klipa prema gore. Kada je klip dođe blizu gornje mrtve točke, dizelsko gorivo se ubrizgava izravno u prostor za izgaranje putem brizgaljki. Ubrižgavanje goriva događa se pod visokim tlakom, čime se gorivo raspršuje u obliku fine magle unutar komprimiranog zraka. Zbog visokih temperatura i tlakova u cilindru, gorivo se samozapali u kontaktu s vrućim zrakom, što uzrokuje izgaranje. Ovaj proces samozapaljenja, karakterističan za dizelske motore, oslobađa energiju koja stvara visoki tlak unutar cilindra, čime se pokreće klip prema dolje. Ovaj pomak klipa generira mehaničku energiju koja omogućava koristan rad samog motora.

Nakon što izgaranje završi, produkti izgaranja izlaze iz cilindra otvaranjem ispušnih ventila. Radom navedenih usisnih i ispušnih ventila upravlja bregasto vratilo, koje se nalazi u

bloku motora. Nadalje, produkti izgaranja putuju prema ispušnoj cijevi i zatim ulaze u turbinu, koja se pokreće širenjem plinova, stvarajući rotacijsku energiju. Ta energija zatim pokreće kompresor, koji s druge strane komprimira dovedeni zrak.

Plinovi koji su prošli kroz turbinu zatim ulaze u katalizator. Ovdje dolazi do kemijskih reakcija koje smanjuju emisije štetnih plinova. Na kraju, pročišćeni plin prolazi kroz prigušivač zvuka, koji smanjuje buku, te izlazi iz motora u okolinu putem ispušnog sustava.



### **3. SIMULACIJSKI MODEL POGONSKOG SUSTAVA RIBARSKOG BRODA**

Simulacijski model pogonskog sustava ribarskog broda izrađen je korištenjem softverskog paketa AVL BOOST. Ovaj program pruža širok raspon alata za modeliranje i analizu rada motora s unutarnjim izgaranjem, uključujući procjenu performansi, potrošnje goriva te emisija štetnih plinova. Precizne simulacije omogućuju razumijevanje ponašanja motora u različitim uvjetima rada, što je ključno za optimizaciju pogonskih sustava.

#### **3.1. AVL**

AVL je renomirana tvrtka specijalizirana za razvoj, simulaciju i testiranje motora, pogonskih sustava i vozila. Osnovana u Austriji, AVL je globalni lider u primjeni naprednih simulacijskih tehnologija za optimizaciju rada motora i smanjenje emisija. Njihovi softverski alati omogućuju detaljnu analizu termodinamičkih procesa unutar motora, uključujući procese izgaranja, protok fluida i toplinsku učinkovitost. AVL-ova rješenja koriste se u automobilskoj, pomorskoj i zrakoplovnoj industriji, a njihov fokus na inovacije i održivost čini ih predvodnicima u području simulacija i razvoja pogonskih sustava.

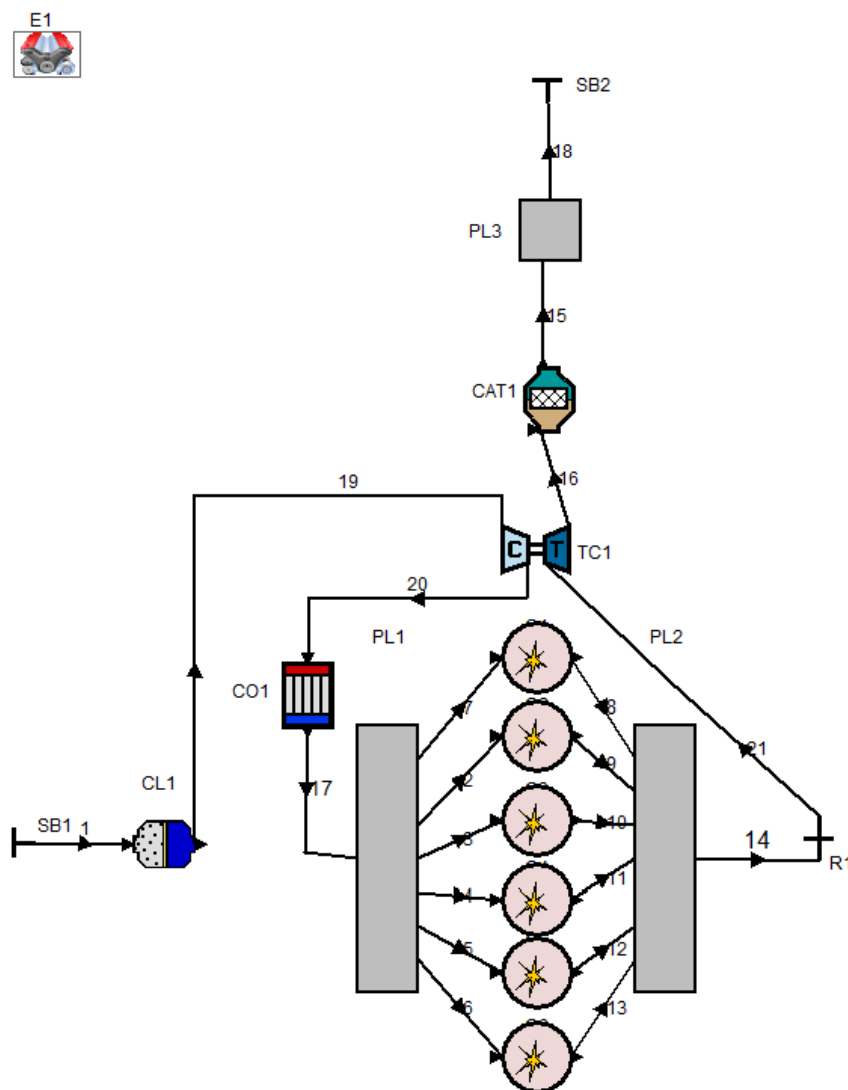
#### **3.2. AVL BOOST**

AVL BOOST je specijalizirani softverski alat unutar AVL-ovog portfelja, namijenjen simulaciji i analizi motora s unutarnjim izgaranjem. BOOST omogućuje izradu složenih modela motora, uključujući geometrijske značajke, termodinamičke parametre i radne cikluse. Ovaj alat podržava simulaciju različitih vrsta motora, od jednostavnih dvotaktnih motora do složenih višetaktnih i turbo-motora. Njegova fleksibilnost omogućuje korisnicima da analiziraju protok zraka i goriva, izgaranje, emisije i toplinsku raspodjelu unutar motora, pružajući cjelovit uvid u rad motora i potencijalne prilagodbe za povećanje učinkovitosti i smanjenje štetnih emisija.

#### **3.3. Simulacijski model**

Proces izrade simulacijskog modela započeo je dodavanjem osnovnih komponenti, koje uključuju: granične uvjete sustava (system boundary), pročišćivač zraka, turbopunjač, izmjenjivač topline, razdjelnika protoka (plenum) koji dijeli protok zraka u šest cilindara, samih šest cilindara, drugog razdjelnika (plenum) koji spaja protok iz svih cilindara, spojnog elementa (restriction), cijevi koje nastavljaju do turbine turbopunjača, katalizatora, prigušivača zvuka i konačno još jednog graničnog uvjeta sustava (system boundary). Sve ove komponente

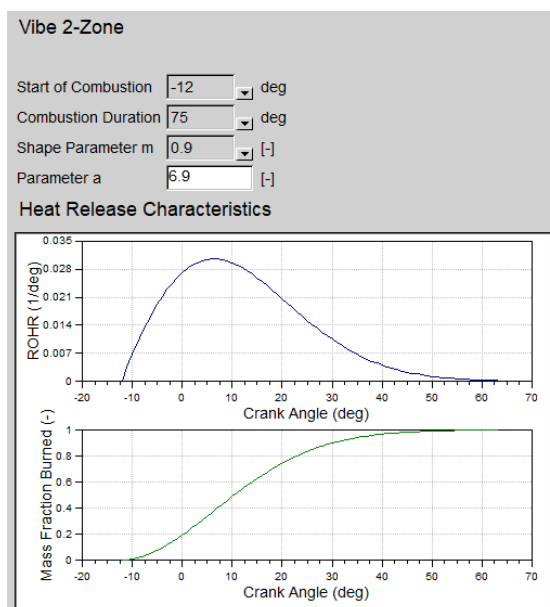
međusobno su povezane cijevima, a dodatno je zadan element motora (engine) za podešavanje brzine vrtnje, otpora trenja, redosljeda paljenja cilindara itd. Sve navedeno se vidi na [Slika 3].



**Slika 3. Shema motora u programu AVL Boost**

Nakon dodavanja komponenti, uneseni su potrebni podaci koji su preuzeti od proizvođača i iz vodiča AVL BOOST. Poseban naglasak stavljen je na definiranje procesa izgaranja u cilindru. Podaci za cilindar uključuju njegov promjer, hod klipa, kompresijski omjer i sl. Definiran je i model prijenosa topline preko površina te prisutnih temperatura, dok su karakteristike ventila zadane kroz dimenzije, krivulje podizaja ventila i koeficijent protoka. Proces izgaranja u cilindru opisan je pomoću Vibe-ovog modela.

Vibe-ov model izgaranja je matematički alat koji se koristi za simulaciju procesa izgaranja u cilindrima motora s unutarnjim izgaranjem. Temelji se na empirijskim podacima i fizikalnim zakonima, a koristi nekoliko ključnih parametara za opisivanje trajanja i oblika izgaranja goriva. Jedan od ključnih aspekata modela je početak izgaranja, koji označava trenutak kada gorivo započinje izgaranje nakon ubrizgavanja u komprimirani zrak. Početak izgaranja povezan je s uvjetima u cilindru, poput temperature i tlaka, i trenutkom kada gorivo dostigne uvjete potrebne za samozapaljenje. Trajanje izgaranja modelira koliko dugo traje proces izgaranja goriva, a ovisi o faktorima kao što su tlak, temperatura, brzina širenja plamena i karakteristike goriva. Ovaj parametar prikazuje vremenski interval u kojem gorivo potpuno sagori, što utječe na učinkovitost motora i emisiju štetnih plinova. Oblik izgaranja opisuje napredovanje izgaranja unutar cilindra tijekom vremena, što varira ovisno o uvjetima u cilindru. Parametri  $m$  i  $a$  definiraju oblik i tok izgaranja. Parametar  $m$  kontrolira brzinu prijelaza iz početne u fazu potpune oksidacije, dok parametar  $a$  određuje ukupnu energiju oslobođenu tijekom izgaranja, što utječe na tlak i temperaturu u cilindru. Vibe-ov model omogućuje duboko razumijevanje dinamike izgaranja, što je ključno za optimizaciju performansi motora, smanjenje emisije štetnih plinova i poboljšanje energetske učinkovitosti. Konkretno u ovom radu se koristi dvozonski Vibe (Vibe 2-Zone), koji koristi jednake ulazne podatke. Međutim, umjesto jedne maseno prosječne temperature, izračunavaju se dvije temperature (zona izgorjelog i neizgorjelog). Na [Slika 4] je prikazan primjer dijaloškog okvira gdje se unose potrebni parametri za Vibe-ovu funkciju.

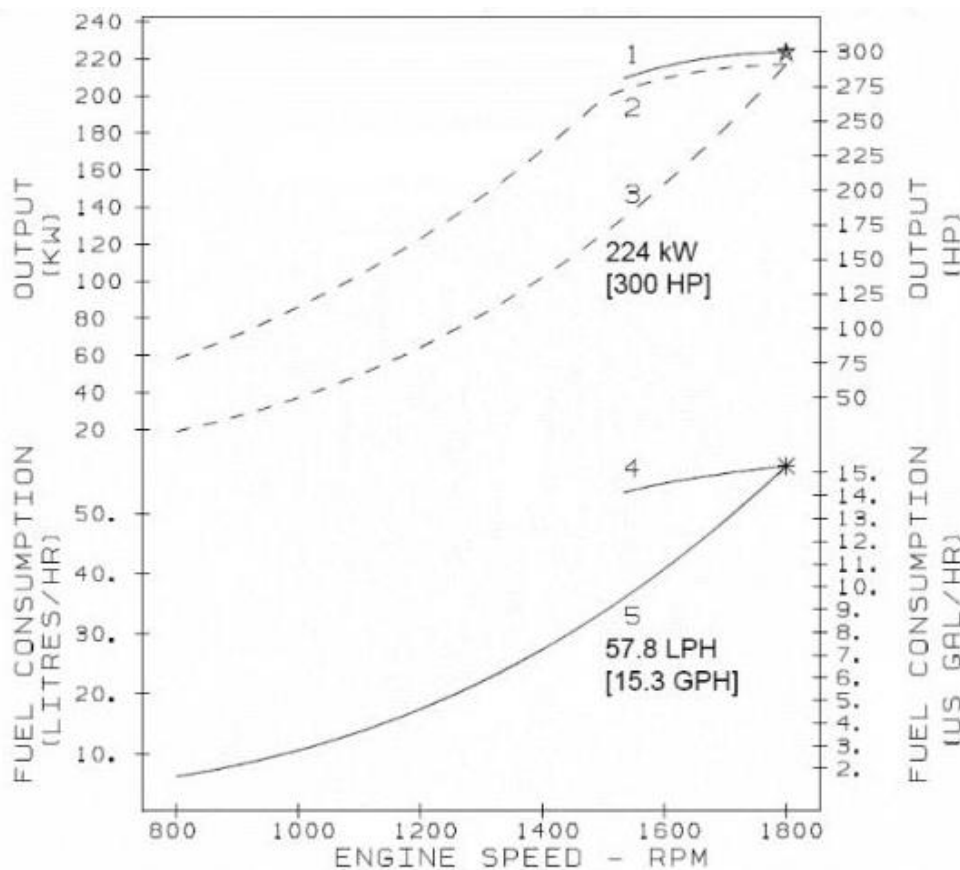


Slika 4. Primjer zadavanja parametara Vibe-ove funkcije

## 4. KALIBRACIJA SIMULACIJSKOG MODELA

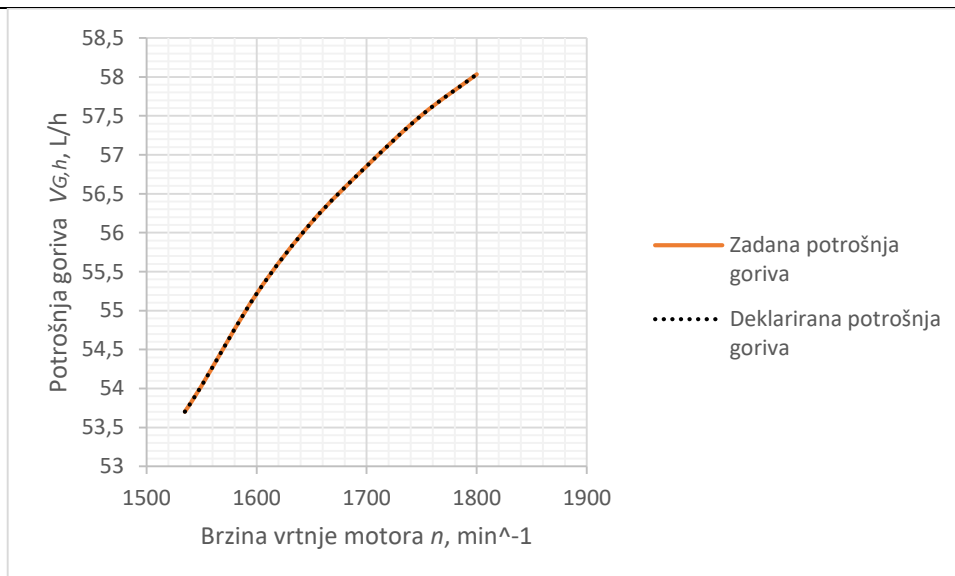
### 4.1. Kalibracija snage i potrošnje goriva

Krivulje snage i potrošnje dane od samog proizvođača su prikazane na [Slika 5].

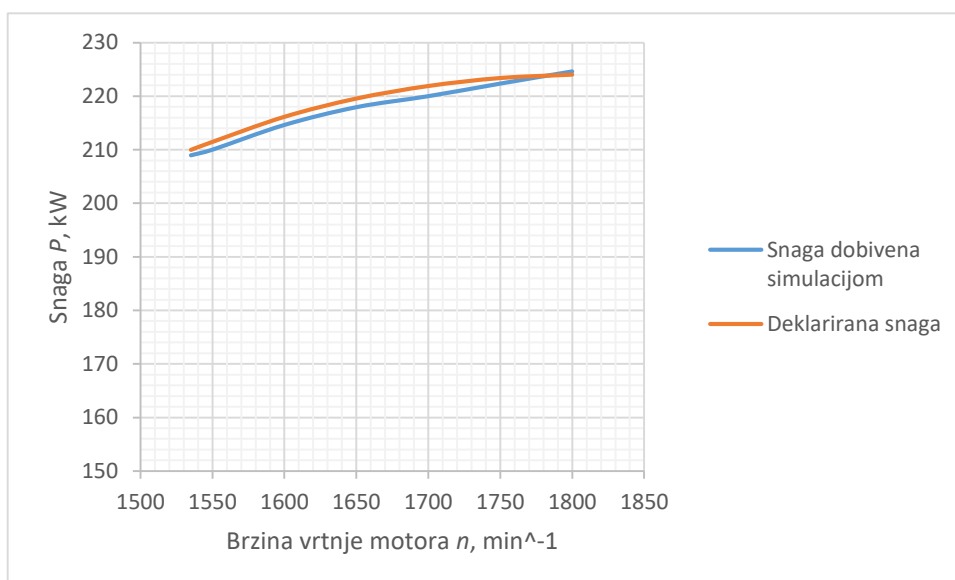


Slika 5. Deklarirana krivulja snage i potrošnje

Krivulja 1 prikazuje snagu na koljenastom vratilu motora, krivulja 2 snagu na vratilu propelera, krivulja 3 prikazuje snagu za tipičnu propelersku krivulju, dok krivulja 4 prikazuje potrošnju goriva za snagu na koljenastom vratilu, a krivulja 5 potrošnju za tipičnu propelersku krivulju. Prema tome krećemo s kalibracijom za nazivno opterećenje koje prikazuju krivulja 1 i 4 jer za te krivulje imamo zadane i ostale potrebne podatke od proizvođača. Unošenjem svih podataka u sami model te na kraju zadavanjem potrošnje da odgovara deklariranoj, vidljivo na [Slika 6], dolazimo do [Slika 7] gdje je prikazana usporedba deklarirane snage u odnosu na snagu dobivenu simulacijom.



**Slika 6. Dijagram usporedbe zadane i deklarirane potrošnje goriva**



**Slika 7. Dijagram usporedbe dobivene i deklarirane snage**

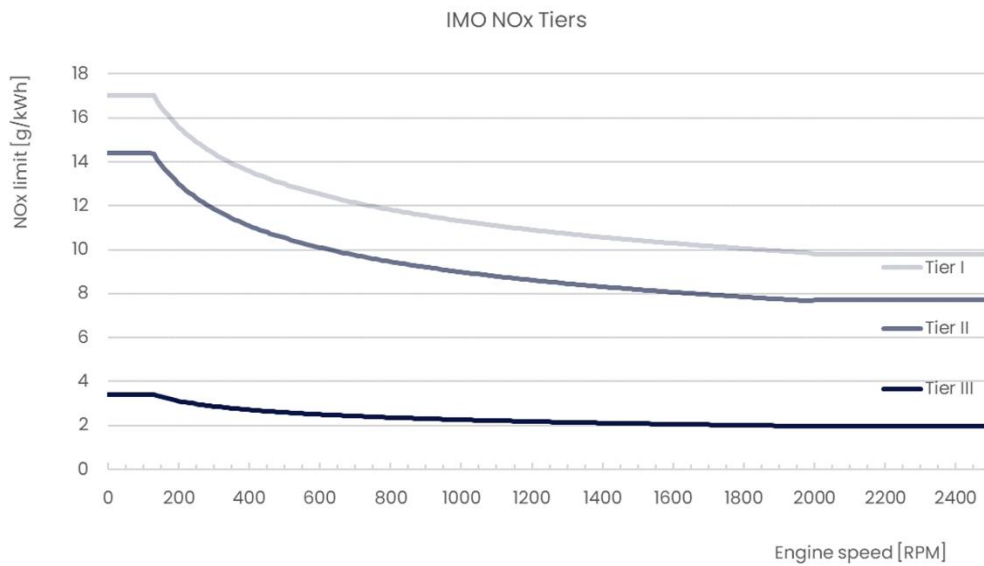
Na [Slika 6] možemo vidjeti da se zadana i deklarirana potrošnja savršeno poklapaju, dok na [Slika 7] vidimo da kod dobivene i deklarirane snage postoji blago odstupanje. S obzirom na to da je najveće odstupanje zabilježeno pri brzini vrtnje motora od  $1700 \text{ min}^{-1}$ , gdje snaga iznosi  $222 \text{ kW}$ , pogreška od  $2 \text{ kW}$  predstavlja manje od  $0,01\%$ , što je zanemarivo te omogućuje nastavak analize. U sljedećem koraku se preko postavke „BMEP control“ određuju djelomična opterećenja, BMEP je druga oznaka za srednji efektivni tlak  $p_e$ , na način da zadamo traženi srednji efektivni tlak te nam simulacija izbací vrijednost potrošnje goriva. Traženi

srednji efektivni tlak definiramo tako što za npr. 75% opterećenja uzmemo 75% vrijednosti tlaka pri punom opterećenju, krivulju tlaka pri punom opterećenju smo odredili kalibriranjem krivulje snage. Za zadnje opterećenje zadajemo vrijednost od 0.5 bar kao minimalnu vrijednost srednjeg efektivnog tlaka.

## 4.2. Kalibracija emisija motora

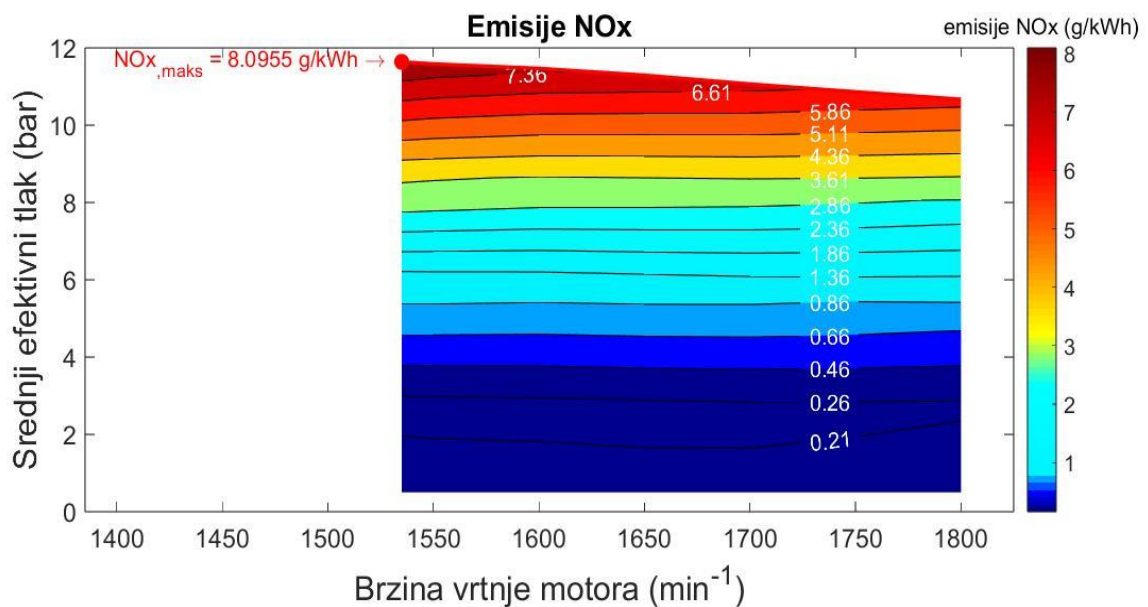
Pomorski sektor značajno doprinosi globalnim emisijama štetnih plinova. Stoga je nužno provoditi sustavne kontrole i mjerenja kako bi se osiguralo da emisije ostanu unutar prihvatljivih granica.

Jedno od najvažnijih regulatornih tijela koje se bavi ovim pitanjem je Međunarodna pomorska organizacija (IMO - International Maritime Organization). IMO je specijalizirana agencija Ujedinjenih naroda koja ima zadatak izraditi međunarodne norme za sigurnost pomorskog prometa i zaštitu okoliša. Kroz razvoj i implementaciju specifičnih zakonodavnih okvira, IMO se usmjerava na smanjenje emisija štetnih plinova iz brodskih motora, te promicanje energetske učinkovitosti i smanjenja onečišćenja mora. Jedan od najvažnijih alata IMO-a za smanjenje emisija je MARPOL (Međunarodna konvencija za sprječavanje onečišćenja mora brodovima), koja regulira emisije i zagađenje izazvano pomorskim transportom. MARPOL je usvojen 1973. godine, a sastoji se od više Aneksa, od kojih svaki pokriva različite vrste zagađenja. Za smanjenje emisija štetnih plinova iz brodskih motora, ključan je Aneks VI MARPOL-a, koji se specifično odnosi na kontrolu emisija dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ), sumpornih oksida ( $\text{SO}_x$ ), ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i drugih plinova. Uvođenjem tih propisa, IMO nastoji smanjiti onečišćenje zraka, poboljšati kvalitetu života u priobalnim područjima, te usmjeriti industriju prema održivijim praksama. Aneks VI postavlja stroge zahtjeve za emisije brodskih motora. Ovaj Aneks se primjenjuje u globalnom kontekstu, a posebno se ističu IMO Tier III standardi koji propisuju drastično smanjenje  $\text{NO}_x$  emisija u Emission Control Areas (ECA) – specifičnim zonama gdje su emisije motora podvrgnute strožim ograničenjima. Uz Tier III standarde, postoje i IMO Tier II i Tier I standardi, koji također postavljaju ograničenja emisija, ali s manje strogim zahtjevima u odnosu na Tier III. Prikaz vrijednosti opisanih standarda je na [Slika 8].



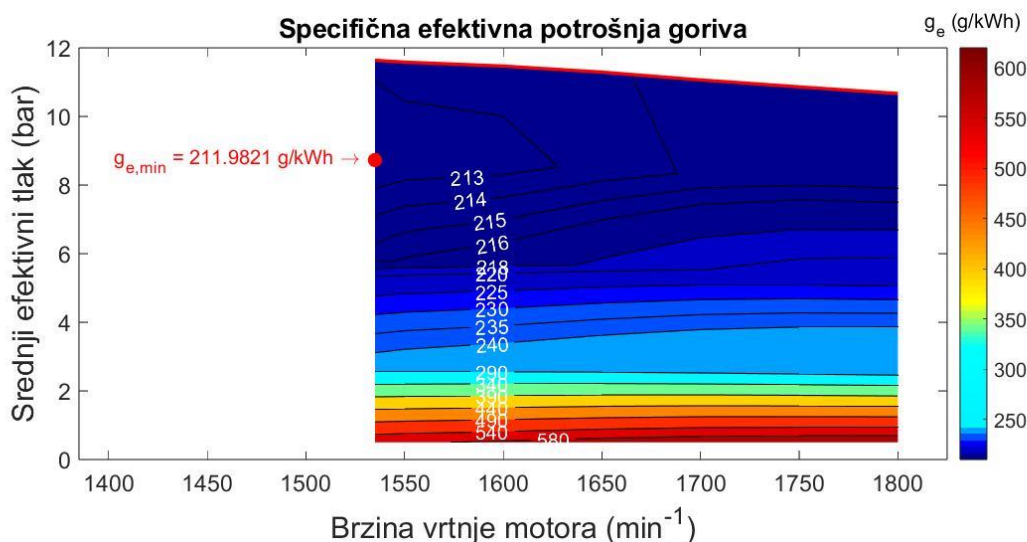
**Slika 8. IMO Tier standardi**

Očitavanjem rezultata simulacije zadanog motora te izradom topografskog dijagrama u programu MATLAB, dolazimo do prikaza emisija dušikovih oksida  $\text{NO}_x$  pri različitim opterećenjima motora koje su prikazane na [Slika 9].



**Slika 9. Topografski dijagram emisija  $\text{NO}_x$**

Sa [Slika 9] možemo uočiti da su emisije dušikovih oksida najveće kod punog opterećenja te maksimalna vrijednost iznosi 8,0955 g/kWh pri brzini vrtnje motora od 1535  $\text{min}^{-1}$ . Motor Cummins NT855-M300 spada u drugi stupanj (Tier II) IMO standarda. Pomoću krivulje sa [Slika 8] očitavamo da maksimalna vrijednost emisija  $\text{NO}_x$  pri navedenoj brzini vrtnje motora iznosi 8,223 g/kWh. Nadalje, na [Slika 10] imamo prikaz topografskog dijagrama specifične efektivne potrošnje goriva gdje vidimo da na prikazanom rasponu brzine vrtnje motora minimum postižemo u blizini punog opterećenja kod brzine vrtnje 1535  $\text{min}^{-1}$ .

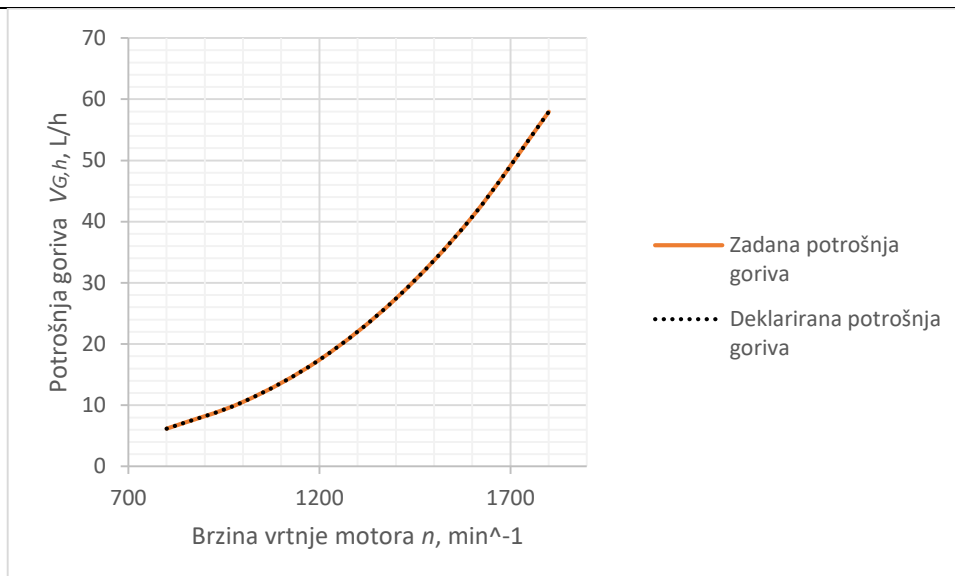


Slika 10. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva

### 4.3. Kalibracija snage za tipičnu propelersku krivulju

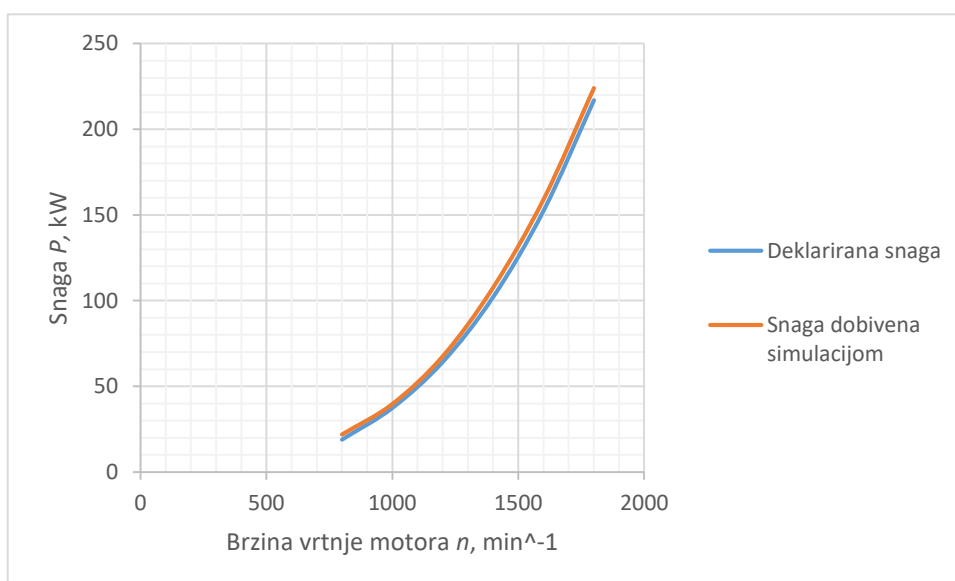
Od proizvođača, na [Slika 5], nam je još dostupna snaga i potrošnja za tipičnu propelersku krivulju. Prema tome još ćemo provest kalibraciju za navedene krivulje po jednakom postupku kao i za krivulju nazivnog opterećenja, osim što nećemo raditi djelomična opterećenja. Prvo odredimo nove radne točke jer se tipična propelerska krivulja proteže po širem rasponu brzine vrtnje motora. Zatim prilagodimo podatke Vibe-ove funkcije za tražene brzine vrtnje pomoću predloženih vrijednosti iz AVL-ovog priručnika. Podesimo rad kompresora turbopunjača i zadamo potrošnju goriva [Slika 11].





**Slika 11.** Dijagram usporedbe zadane i deklarirane potrošnje goriva za tipičnu propellersku krivulju

Konačno dolazimo i do vrijednosti snage na [Slika 12].

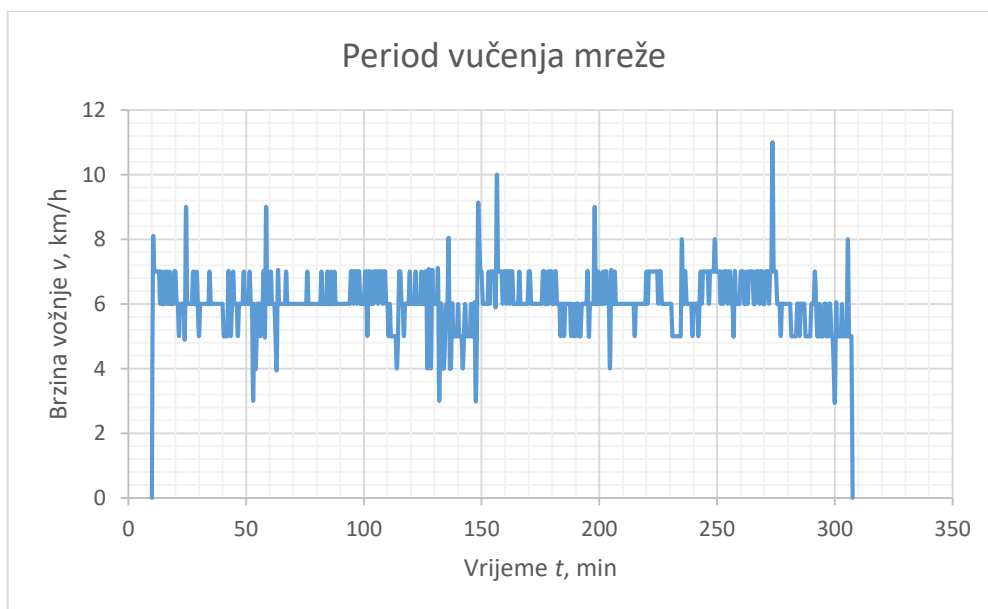


**Slika 12.** Dijagram usporedbe dobivene i deklarirane snage za tipičnu propellersku krivulju

## 5. DEFINIRANJE PLOVNOG CIKLUSA RIBARSKOG BRODA

Plovni ciklus ovog broda uključuje isplovljavanje, spuštanje mreže, hvatanje ribe dok se mreža postupno zatvara i povratak u luku. Svaka faza ima specifične zahtjeve za pogonski sustav, utječući na potrošnju goriva i emisije.

U ovom radu fokus će biti na periodu kada brod vuče mrežu, jer su za taj dio ciklusa dostupni izmjereni podaci o brzini plovidbe i potrošnji goriva. Ova faza, koja može trajati više sati, ključna je za ukupnu potrošnju goriva tijekom plovidbe i ima značajan utjecaj na ekonomske i ekološke performanse broda. Izmjerene brzine vožnje za period gdje brod vuče mrežu su prikazane na [Slika 13].



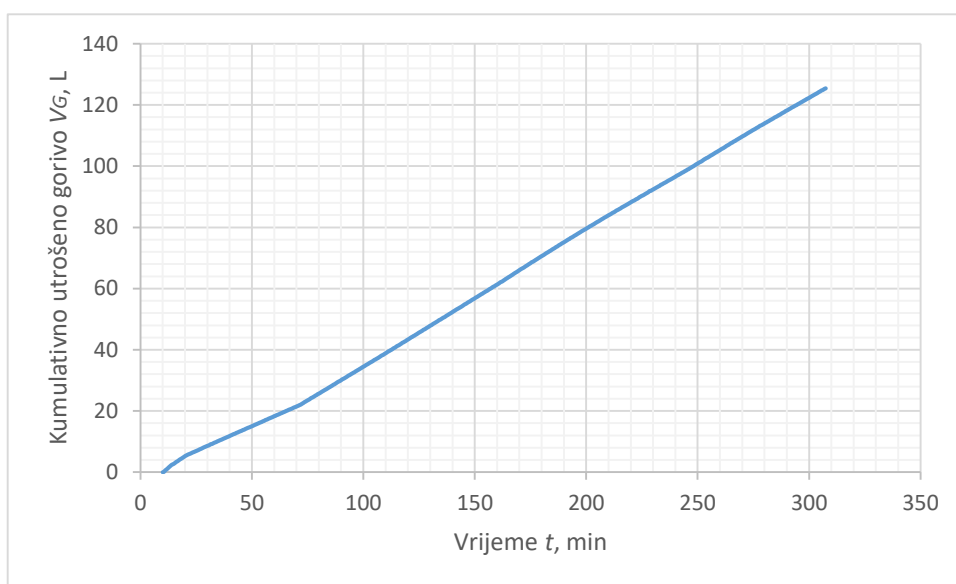
**Slika 13. Dijagram brzine vožnje za vrijeme vuče mreže**

Možemo primijetiti da postoje oscilacije u brzini vožnje koje mogu biti izazvane greškama u mjerenju ili vanjskim utjecajima. Za slučaj ovog rada uzimamo srednju vrijednost brzine vožnje koja je prikazana u izrazu (1).

$$v_{sr} = 6,069 \text{ km/h} \quad (1)$$

Iz [Slika 13] se također može vidjeti da prikazani period traje približno 300 minuta, točnije period traje 297,5 minuta što iznosi malo manje 5 sati. Na dijagramu izgleda kao da

trajanje iznosi 307,5 minuta, ali također se može vidjeti da početak mjerenja kreće od desete minute te stoga za ukupno trajanje ciklusa uzimamo konačni iznos i oduzmemo prvih deset minuta. U prvoj točki (vrijeme iznosi 10 minuta) mjerenje kreće tako da su brzina i potrošeno gorivo postavljeni na vrijednost 0. Kako vrijeme dalje nastavlja teći, tako se brzina i potrošeno gorivo kreću prema dobivenim vrijednostima gdje brzina postigne neku određenu vrijednost te oscilira oko nje, a vrijednost utrošenog goriva postepeno raste [Slika 14]. Brzina u zadnjoj točki mjerenja iznosi 0 što označava kraj mjerenja, a kumulativno utrošeno gorivo na kraju perioda iznosi 125,44 L.



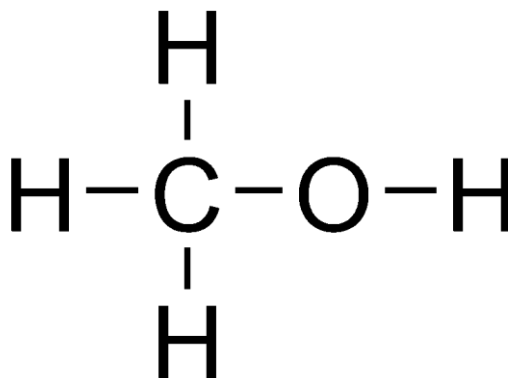
**Slika 14.** Dijagram kumulativnog utrošenog goriva za vrijeme vuče mreže

## 6. ODABIR ALTERNATIVNIH GORIVA

U ovom radu odabrana su alternativna goriva metanol i vodik. Ova goriva se sve više istražuju kao održiva alternativna goriva u pomorskoj industriji, s obzirom na potrebu za smanjenjem emisije štetnih plinova i zadovoljavanjem globalnih ciljeva smanjenja ugljičnog otiska.

### 6.1. Metanol

Metanol je tekuće alkoholno gorivo koje se sastoji se od jednog atoma ugljika, dva atoma vodika i jedne grupe -OH (hidroksilna skupina) [Slika 15]. Poprilično se lako skladišti i transportira, što ga čini praktičnim za primjenu u pomorskom sektoru. Iako se uglavnom koristi u industriji kao sirovina, njegovi ekološki i operativni aspekti čine ga atraktivnom opcijom za pomorski sektor. Također, metanol se može proizvoditi iz obnovljivih izvora, čime se dodatno smanjuje njegov ekološki otisak.



Slika 15. Kemijska struktura molekule metanola

Primjena metanola u brodskim motorima zahtijeva prilagodbe sustava ubrizgavanja goriva i procesa izgaranja. Metanol sagorijeva pri nižim temperaturama od dizelskih goriva, što može dovesti do smanjenja emisije dušičnih oksida, ali i do povećanja emisije neizgorjelih ugljikovodika. Zbog svojih specifičnih svojstava sagorijevanja, metanol zahtijeva dodatne prilagodbe u procesu izgaranja, ali omogućuje stabilan rad motora i manju potrebu za održavanjem sustava za ispuštanje plinova.

## 6.2. Vodik

Vodik je plinovito gorivo koje se sastoji samo od vodikovih atoma [Slika 16]. Smatra se jednim od najsvjetlijih kandidata za održivu budućnost pomorskog sektora, s obzirom na to da pri izgaranju ne proizvodi emisije CO<sub>2</sub>, već samo vodenu paru. Međutim, izazovi u primjeni vodika u brodovima proizlaze iz njegovih specifičnih zahtjeva za skladištenje i distribuciju. Zbog svoje niske gustoće, vodik zahtijeva posebne sustave za skladištenje pod visokim tlakom ili u tekućem obliku na vrlo niskim temperaturama (tekući vodik). Ovi sustavi skladištenja izazivaju tehničke i ekonomske izazove, uključujući visoke troškove infrastrukture, sigurno upravljanje i potencijalne probleme u vezi s gustoćom energije u odnosu na volumen.



Slika 16. Kemijska struktura molekule vodika

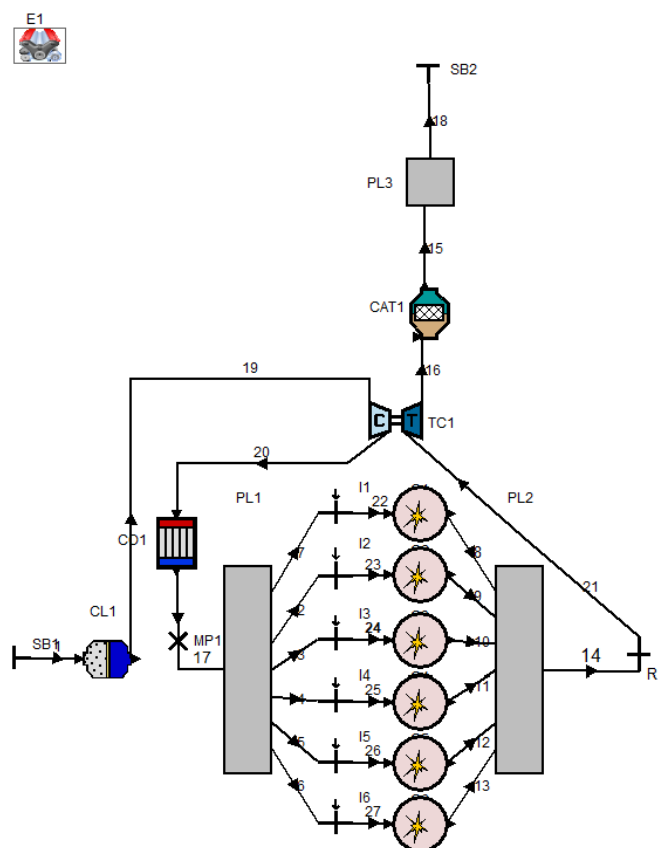
Iako su emisije ugljičnog dioksida pri izgaranju vodika gotovo nulte, proizvodnja vodika može biti ekološki zahtjevna ovisno o izvorima energije koji se koriste za njegovu proizvodnju. Ako se vodik proizvodi iz fosilnih izvora (tzv. sivi vodik), emisije CO<sub>2</sub> mogu biti značajne. Stoga se veliku pažnju posvećuje razvoju plavog i zelenog vodika, koji se proizvode korištenjem obnovljivih izvora energije poput solarnih ili vjetroelektrana.

Prilagodba motora za vodik će se izvesti na sličan način kao što je bila za metanol. Uključuje promjene u sustavu ubrizgavanja i procesa izgaranja, s obzirom na specifične zahtjeve za postizanje optimalnih uvjeta sagorijevanja vodika.

## 6.3. Prilagodba simulacijskog modela pogonskog sustava

Prilagodba simulacijskog modela pogonskog sustava za korištenje alternativnih goriva, poput metanola i vodika, zahtijeva prilagodbe na motoru kako bi mogao učinkovito sagorijevati ova goriva. U ovom radu, prilagodbe su provedene instalacijom brizgaljki na cijevima pred ulaz svakog cilindra, jer je ovo najjednostavnije i najpovoljnije rješenje. Ovakav način instalacije omogućava precizno doziranje goriva, što je ključno za postizanje optimalnih performansi

motora prilikom korištenja metanola i vodika. Prikaz dodavanja brizgaljki na simulacijski model se vidi na [Slika 17].



**Slika 17. Prilagođena shema motora za primjenu alternativnih goriva**

Za metanol, instalacija brizgaljki omogućuje učinkovito ubrizgavanje goriva u cilindre, čime se osigurava pravilno izgaranje i optimizacija potrošnje. Budući da metanol ima niži energetska sadržaj od dizelskog goriva, prilagodba motora zahtijeva precizno upravljanje količinom goriva koja ulazi u motor kako bi se izbjegli problemi poput nepravilnog izgaranja. Ova modifikacija omogućuje postizanje potrebne ravnoteže u procesu sagorijevanja i poboljšanje učinkovitosti motora.

Za vodik, koji zahtijeva specifične uvjete za izgaranje, instalacija brizgaljki također omogućuje precizno ubrizgavanje male količine goriva u motor. Vodik je vrlo zapaljiv, a pravilna distribucija u motoru ključna je za postizanje visoke učinkovitosti. Ovaj sustav također omogućava bolju kontrolu izgaranja, što je posebno važno zbog specifičnih uvjeta potrebnih za optimalno sagorijevanje vodika.

Osim toga, u simulacijskom modelu bit će potrebno prilagoditi Vibe-ov parametar  $m$  kako bi se uzeli u obzir različiti omjeri dizelskog i alternativnog goriva. S obzirom na razlike u energetske gustoći i kemijskim svojstvima dizelskog goriva, metanola i vodika, prilagodba parametra  $m$  omogućuje optimizaciju rada motora za različite omjere goriva.

Ova proširena simulacija omogućuje detaljnu analizu kako metanol i vodik utječu na performanse motora, potrošnju goriva i emisije štetnih plinova. Instalacija brizgaljki i prilagodba parametra  $m$  čine sustav jednostavnijim za implementaciju u stvarnim uvjetima, smanjujući troškove prilagodbe i vrijeme potrebno za testiranje novih goriva.

## 7. IZRAČUN EMISIJA UGLJIČNOG DIOKSIDA I DUŠIKOVIH OKSIDA

### 7.1. Određivanje stacionarne radne točke na propellerskoj krivulji

Određivanje stacionarne točke na propellerskoj krivulji može se ostvariti korištenjem podataka o kumulativnoj potrošnji goriva i srednjoj brzini broda u izmjerenom periodu trajanja. Ovaj pristup omogućava procjenu ravnotežnog stanja pogonskog sustava na temelju stvarnih podataka o potrošnji goriva i brzini plovidbe.

Kumulativna potrošnja goriva prati se tijekom određenog perioda plovidbe i pruža informacije o ukupnoj količini goriva koju je brod potrošio. Ovi podaci omogućuju izračun potrošnje po jedinici udaljenosti ili vremena, uzimajući u obzir specifične karakteristike goriva.

Srednja brzina broda tijekom izmjereneog perioda također je ključna u određivanju stacionarne točke. Srednja brzina odražava stvarne operativne uvjete broda, uzimajući u obzir varijacije u otporima, smjeru vjetra i stanju mora. Na temelju srednje brzine i kumulativne potrošnje goriva, možemo odrediti stacionarnu točku na propellerskoj krivulji.

Kako bismo odredili navedenu točku, prvo trebamo odrediti potrošnju goriva u jedinici vremena. To ćemo postići tako da ukupno utrošeno gorivo podijelimo s duljinom trajanja ciklusa. Oba podatka smo već naveli u prethodnim naslovima te ćemo ih razraditi u izrazu (2).

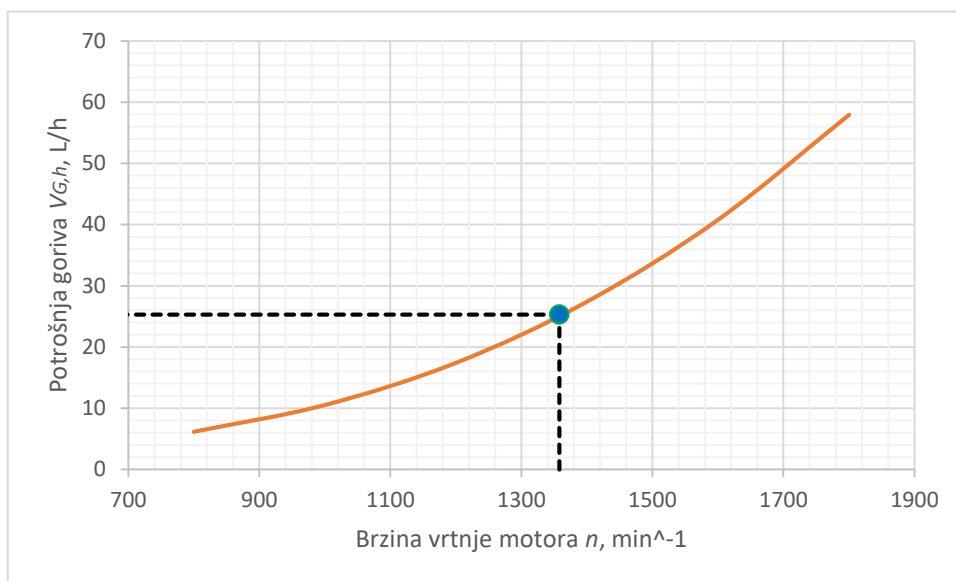
$$V_{G,h} = \frac{V_G}{t_{uk}} \quad (2)$$

Gdje je  $V_G = 125,44$  L kumulativno utrošeno gorivo, a  $t_{uk} = 297,5$  min = 4,9583 h ukupno vrijeme perioda mjerenja. Uvrštavanjem podataka u izraz (2), dolazimo do rješenja za potrošnju goriva po satu u izrazu (3).

$$V_{G,h} = \frac{125,44}{4,9583} = 25,3 \frac{\text{L}}{\text{h}} \quad (3)$$

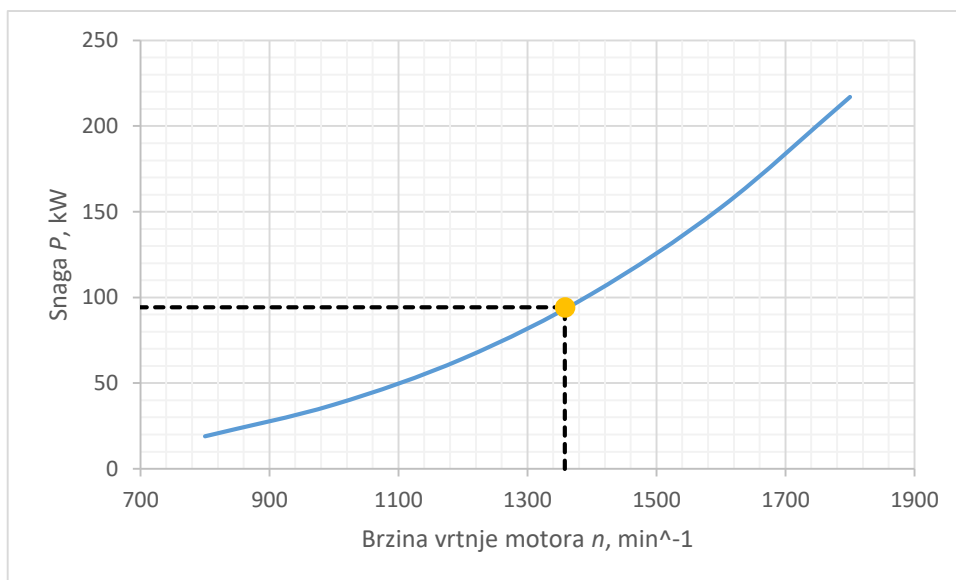


Očitavanjem krivulje potrošnje sa [Slika 11], pomoću ugrađenog očitavanja krivulji (Data reader) u programu AVL BOOST, određeno je da se izračunata potrošnja ostvaruje na brzini vrtnje motora od  $1358 \text{ min}^{-1}$  [Slika 18].



**Slika 18.** Prikaz stacionarne radne točke potrošnje goriva na propelerskoj krivulji

Na jednak način, sada pomoću podatka da je brzina vrtnje motora jednaka  $1358 \text{ min}^{-1}$ , je očitana snaga sa krivulje deklarirane snage na [Slika 12]. Potrebna snaga motora na propelerskoj krivulji u određenoj stacionarnoj točki iznosi  $P_{potr} = 94,18 \text{ kW}$  [Slika 19].



**Slika 19.** Prikaz stacionarne radne točke snage na propelerskoj krivulji

## 7.2. Emisije originalnog pogonskog sustava

U originalnom sustavu, koji se temelji na radu dizelskog motora, emisije su rezultat procesa izgaranja dizelskog goriva unutar cilindra. Količina i sastav emisija ovise o opterećenju motora, kvaliteti sagorijevanja te omjeru zraka i goriva. Rad dizelskog motora pri različitim režimima utječe na formiranje emisija, pri čemu veća opterećenja često dovode do povećanja temperature izgaranja i promjena u sastavu ispušnih plinova. Također, starost i stanje motora mogu dodatno utjecati na emisije, jer istrošenost komponenti može dovesti do smanjene učinkovitosti sagorijevanja i povećane potrošnje goriva.

Osim toga, karakteristike goriva, poput udjela sumpora i cetanskog broja, igraju važnu ulogu u procesu izgaranja i posljedično utječu na emisije motora. Učinkovitost izgaranja može biti poboljšana optimizacijom parametara rada motora, no dizelski motori inherentno proizvode određene emisije kao nusprodukt svog rada. Ove emisije mogu varirati ovisno o uvjetima eksploatacije, uključujući brzinu vrtnje motora, opterećenje i vanjske faktore poput temperature i tlaka zraka.

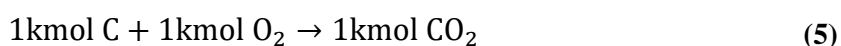
### 7.2.1. Emisije ugljičnog dioksida

Ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) nastaje kao izravna posljedica izgaranja dizelskog goriva u motoru, pri čemu se ugljik iz goriva spaja s kisikom iz zraka. Količina proizvedenog  $\text{CO}_2$  proporcionalna je količini izgorjelog goriva, što znači da veća potrošnja goriva dovodi do većih emisija. S obzirom na to da dizelski motori koriste fosilna goriva s visokim udjelom ugljika, emisije  $\text{CO}_2$  su neizbježne i značajne u pomorskom sektoru, gdje brodovi troše velike količine goriva tijekom dugih plovidbi.

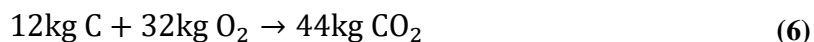
Kako bismo odredili emisije ugljika, prvo moramo krenuti sa samim izrazom nastajanja ugljičnog dioksida (4).



Izraz (4) ćemo nadalje proširiti tako da napišemo količinu u kmol, prikazano u izrazu (5).



Nama je potreban izraz u jedinici mase, a ne količine te ćemo iz tog razloga elemente iz izraza (5) pomnožiti s pripadajućim molarnim masama. Na taj način dolazimo do izraza (6):



gdje je  $M(\text{C}) = 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$  molarna masa atoma ugljika,  $M(\text{O}_2) = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$  molarna masa molekule kisika i  $M(\text{CO}_2) = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$  molarna masa ugljičnog dioksida. Jednadžbu (6) je još potrebno podijeliti s molarnom masom atoma ugljika kako bismo došli do omjera nastalog ugljičnog dioksida i potrošenog ugljika, izraz (7).

$$1\text{kg C} + \frac{32}{12}\text{kg O}_2 \rightarrow \frac{44}{12}\text{kg CO}_2 \quad (7)$$

Iz prethodnog izraza uzimamo omjer molarnih masa ugljičnog dioksida i ugljika  $\frac{44 \text{ kgCO}_2}{12 \text{ kgC}}$  te ga u izrazu (8) množimo s masenim udjelom ugljika u dizelskom gorivu  $c = 0,87 \frac{\text{kgC}}{\text{kgG}}$ .

$$\frac{44 \text{ kgCO}_2}{12 \text{ kgC}} \cdot c = \frac{44 \text{ kgCO}_2}{12 \text{ kgC}} \cdot 0,87 \frac{\text{kgC}}{\text{kgG}} = 3,19 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgG}} \quad (8)$$

Još je potrebno odrediti ukupnu masu utrošenog dizelskog goriva tijekom jednog ciklusa  $G^{uk}$ , do nje ćemo doći tako da ukupnu količinu utrošenog goriva pomnožimo s gustoćom dizelskog goriva. Navedeno je prikazano izrazom (9):

$$G^{uk} = V_G \cdot \rho_D = 125,44 \cdot 0,83 = 104,1152 \text{ kg} \quad (9)$$

gdje je  $V_G = 125,44 \text{ L}$  ukupni kumulativni utrošak goriva tokom jednog ciklusa, a  $\rho_D = 0,83 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$  je gustoća dizelskog goriva.

Konačno, možemo izračunati masu emitiranog ugljičnog dioksida tako da dobiveni rezultat u izrazu (8) pomnožimo s ukupnom masom utrošenog goriva za vrijeme jednog ciklusa. Ukupna masa utrošenog goriva je već prije određena u izrazu (9) i iznosi  $G^{uk} = 104,1152 \text{ kgG}$ , a masa nastalog ugljičnog dioksida po kilogramu goriva je prikazana izrazom (8). Slijedi jednačina (10) kojom izračunavamo ukupnu masu emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa  $m_{\text{CO}_2}^{uk}$ .

$$m_{\text{CO}_2}^{uk} = 3,19 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgG}} \cdot G^{uk} = 3,19 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgG}} \cdot 104,1152 \text{ kgG} = 332,127 \text{ kgCO}_2 \quad (10)$$

### 7.2.2. Emisije dušikovih oksida

Dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ) nastaju tijekom izgaranja goriva u dizelskim motorima pri visokim temperaturama i tlakovima. Oni se formiraju kao rezultat kemijskih reakcija između dušika i kisika iz zraka unutar komore za izgaranje. Količina proizvedenih  $\text{NO}_x$  emisija ovisi o uvjetima sagorijevanja, pri čemu više temperature i dulje trajanje izgaranja povećavaju njihovu koncentraciju. U dizelskim motorima, zbog visokih tlakova i temperatura potrebnih za učinkovito izgaranje goriva, emisije  $\text{NO}_x$  su značajnije nego kod Ottovih motora.

Do samih emisija dušikovih oksida ćemo doći na sličan, ali ne potpuno isti način kao što smo koristili kod izračunavanja emisija ugljičnog dioksida. Za početak, emisije dušikovih oksida možemo očitati iz simulacije motora. Za određenu stacionarnu radnu točku kod brzine vrtnje od  $1358 \text{ min}^{-1}$ , emisije dušikovih oksida iznose  $\text{NO}_x = 0,00522 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$ . Za navedenu stacionarnu točku znamo i potrebnu snagu motora koja iznosi  $P_{potr} = 94,18 \text{ kW}$ . Množenjem prikazanih veličina dolazimo do masenog protoka dušikovih oksida u izrazu (11).

$$m_{\text{NO}_x, h} = \text{NO}_x \cdot P_{potr} = 0,00522 \cdot 94,18 = 0,4916 \frac{\text{g}}{\text{h}} \quad (11)$$

Još nam preostaje samo pomnožiti maseni protok dušikovih oksida s ukupnim vremenom jednog ciklusa koje iznosi  $t_{uk} = 297,5 \text{ min} = 4,9583 \text{ h}$ . Spomenuti postupak je

prikazan izrazom (12) kojim je dobiven iznos ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa  $m_{\text{NO}_x}^{uk}$ .

$$m_{\text{NO}_x}^{uk} = m_{\text{NO}_x, h} \cdot t_{uk} = 0,4916 \cdot 4,9583 = 2,4375 \text{ gNO}_x = 0,00244 \text{ kgNO}_x \quad (12)$$

### 7.3. Emisije pogonskog sustava u kombinaciji s metanolom

Uvođenje metanola kao alternativnog goriva u brodski pogonski sustav moglo bi značajno utjecati na emisijski profil motora. S obzirom na njegov kemijski sastav i svojstva izgaranja, moguće su promjene u razinama različitih vrsta emisija u usporedbi s dizelskim gorivom. Metanol sadrži kisik u svojoj molekuli, što može poboljšati proces izgaranja i potencijalno smanjiti udio nepotpuno izgorjelih spojeva. Također, zbog manjeg udjela ugljika u odnosu na dizelsko gorivo, može se očekivati smanjenje određenih emisijskih komponenti.

Međutim, pri korištenju metanola postoje određena ograničenja koja utječu na učinkovitost izgaranja i formiranje emisija. Glavni razlozi za ta ograničenja uključuju djelomično izgaranje pri niskim opterećenjima, što dovodi do smanjenja učinkovitosti, te mogućnost preskakanja paljenja (misfire), gdje jedan od cilindara ne uspije proizvesti dovoljno iskre, kompresije ili goriva za pravilno sagorijevanje. Također, samozapaljenje smjese metanol-zrak nakon paljenja dizela može uzrokovati detonacije (knock), što se prepoznaje po karakterističnom zvuku u radu motora. Prijevremeno paljenje (pre-ignition) predstavlja još jedan izazov.

Osim toga, zabilježene su visoke temperature ispušnih plinova, i to 15% više od prosječne, što ukazuje na kasno izgaranje, a time i na potencijalni utjecaj na emisije dušikovih oksida. Ograničenja ovakvog rada dovela su do zaključka da najveći energetska udio metanola u gorivoj smjesi ne smije prelaziti 80%. Ovaj prag omogućuje stabilan rad motora uz smanjenje negativnih posljedica na izgaranje i emisije [11].

S obzirom na navedene izazove, daljnja analiza će biti provedena za energetska udio metanola od 25%, 50% i 80%. Zbog potrebe unošenja navedenih udjela u simulaciju, potrebno je izračunati kojim masenim udjelima odgovaraju spomenuti energetska udjeli. To će biti provedeno pomoću jednadžbe u izrazu (13):

$$w_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{\frac{x_{\text{CH}_3\text{OH}}}{H_{d,\text{CH}_3\text{OH}}}}{\frac{x_{\text{CH}_3\text{OH}}}{H_{d,\text{CH}_3\text{OH}}} + \frac{1 - x_{\text{CH}_3\text{OH}}}{H_{d,\text{Diesel}}}} \quad (13)$$

gdje je  $w_{\text{CH}_3\text{OH}}$  maseni udio metanola,  $x_{\text{CH}_3\text{OH}}$  energetska udio metanola,  $H_{d,\text{CH}_3\text{OH}} = 22 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  donja ogrjevna vrijednost metanola,  $H_{d,\text{Diesel}} = 42 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  donja ogrjevna vrijednost dizelskog goriva. Uvrštavanjem podataka u izraz (13), dobivamo rješenja u [Tablica 2].

**Tablica 2. Energetski i maseni udjeli metanola**

$x_{\text{CH}_3\text{OH}}$ energetska udio metanola	$w_{\text{CH}_3\text{OH}}$ maseni udio metanola
25%	39,3%
50%	66%
80%	88,6%

Pomoću izračunatih masenih udjela, koje ćemo unijeti u AVL BOOST simulaciju, odredit ćemo emisije za različite udjele metanola u smjesi s dizelskim gorivom. Cilj ove analize je utvrditi kako promjena sastava goriva utječe na emisijske karakteristike motora, pri čemu ćemo osigurati da motor i dalje radi unutar svojih operativnih ograničenja.

Kako bismo osigurali konzistentne uvjete za usporedbu, tijekom simulacije zadržat ćemo jednak tlak nabijanja kompresora, duljinu i početak izgaranja kao kod procesa sa samo dizelskim gorivom. Time ćemo eliminirati varijable koje bi mogle neovisno utjecati na emisije, omogućujući nam preciznije praćenje učinka metanola kao alternativnog goriva.

Prilagodba će se vršiti mijenjanjem Vibe-ovog parametra  $m$ , koji utječe na dinamiku izgaranja, kao i količine ubrizganog goriva. Kako bi se osiguralo da motor i dalje isporučuje traženu snagu za stacionarnu točku, količina goriva će se podešavati u skladu s energetska sadržajem smjese. Ovaj pristup omogućit će nam da analiziramo kako različiti omjeri metanola u gorivu utječu na emisije i potrošnju goriva.

### 7.3.1. Emisije ugljičnog dioksida

Emisije ugljičnog dioksida za kombinaciju metanola s dizelskim gorivom ćemo dobiti na sličan način kao što smo ih dobili kod primjene samog dizelskog goriva. Prvo će nam trebati podatak o potrošnji goriva koji dobivamo kalibracijom snage za stacionarnu radnu točku pri određenom udjelu metanola. Iznosi potrošnje goriva za različite energetske udjele metanola su prikazani u [Tablica 3].

**Tablica 3. Masena potrošnja goriva po satu za određene energetske udjele metanola**

Energetski udio metanola $x_{\text{CH}_3\text{OH}}$ , %	Masena potrošnja goriva po satu $G_h$ , $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$
25	24,93288
50	30,79944
80	38,13264

Sada samo još trebamo pomnožiti rezultate iz [Tablica 3] s ukupnim vremenom jednog ciklusa kako bismo dobili ukupnu masu utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa  $G^{uk}$ . Slijedimo s jednadžbom u izrazu (14):

$$G_i^{uk} = G_{h,i} \cdot t_{uk} \quad (14)$$

gdje je  $G_i^{uk}$  ukupna masa utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni udio metanola,  $G_{h,i}$  masena potrošnja goriva po satu za određeni udio metanola i  $t_{uk} = 297,5 \text{ min} = 4,9583 \text{ h}$  ukupno vrijeme jednog ciklusa. U [Tablica 4] su prikazani rezultati nakon uvrštavanja podataka u izraz (14).

**Tablica 4. Vrijednosti ukupne mase utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni energetske udio metanola**

Energetski udio metanola $x_{\text{CH}_3\text{OH}}$ , %	Ukupna masa utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa $G^{uk}$ , kgG
25	104,1114
50	123,6247
80	152,7129

Na kraju, dolazimo do iznosa ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom udjelu metanola  $m_{\text{CO}_2,i}^{uk}$  tako da pomnožimo ukupnu masu utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni udio metanola  $G_i^{uk}$  [Tablica 4] s omjerom mase nastalog ugljičnog dioksida  $\text{CO}_2$  i potrošenog goriva iz izraza (8). Postupak je prikazan u izrazu (15), a rezultati su prikazani u [Tablica 5].

$$m_{\text{CO}_2,i}^{uk} = 3,19 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgG}} \cdot G_i^{uk} \quad (15)$$

**Tablica 5. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu metanola**

Energetski udio metanola $x_{\text{CH}_3\text{OH}}$ , %	Ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa $m_{\text{CO}_2}^{uk}$ , kgCO <sub>2</sub>
25	332,1153
50	394,3628
80	487,154

Još možemo uzeti u obzir slučaj kada bismo primijenili sustav za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (CCS) u kombinaciji s korištenjem e-metanola, tada bi mogli značajno smanjiti emisije CO<sub>2</sub> u pomorskom sektoru.

E-metanol je sintetsko gorivo koje se proizvodi korištenjem obnovljive električne energije, vode i ugljikovog dioksida uhvaćenog iz atmosfere ili industrijskih izvora. Proces njegove proizvodnje temelji se na elektrolizi vode, pri čemu se dobiva vodik, koji se zatim u kemijskoj reakciji s uhvaćenim CO<sub>2</sub> sintetizira u metanol. Ova metoda omogućuje zatvaranje ugljičnog ciklusa, jer se CO<sub>2</sub> koji nastaje izgaranjem e-metanola može ponovno iskoristiti za njegovu proizvodnju.

CCS (Carbon Capture and Storage) je tehnologija koja omogućava hvatanje CO<sub>2</sub> iz ispušnih plinova brodskih motora, njegovo skladištenje ili daljnju upotrebu u industrijskim procesima. U kontekstu brodskog pogona, CCS sustav bi bio integriran u ispušni sustav brodskog motora, gdje bi putem kemijske apsorpcije ili fizikalne adsorpcije izdvajao CO<sub>2</sub> iz



dimnih plinova. Tako uhvaćeni CO<sub>2</sub> mogao bi se skladištiti na brodu ili koristiti za proizvodnju e-metanola, čime bi se smanjila potreba za fosilnim gorivima i dodatno doprinijelo dekarbonizaciji pomorstva.

Kako bi se kvantificirao učinak CCS-a na ukupne emisije CO<sub>2</sub> brodskog motora, potrebno je korigirati izračun mase emitiranog CO<sub>2</sub> za vrijeme jednog ciklusa. Budući da CCS sustav ima učinkovitost od 70% [14], korigirana masa emitiranog CO<sub>2</sub> nakon primjene CCS-a,  $m_{CO_2,i}^{CCS}$ , može se izračunati prema izrazu (16):

$$m_{CO_2,i}^{CCS} = m_{CO_2,i}^{uk} \cdot (1 - \eta_{CCS}) \quad (16)$$

gdje je  $m_{CO_2,i}^{uk}$  ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom udjelu metanola bez CCS sustava [Tablica 5],  $\eta_{CCS}$  učinkovitost sustava za hvatanje CO<sub>2</sub>, uzeta kao 70% (0.70).

Primjenom izraza (16), dobivaju se nove vrijednosti ukupne mase emitiranog CO<sub>2</sub> nakon primjene CCS-a, prikazane u [Tablica 6]:

**Tablica 6. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu metanola uz primjenu CCS sustava**

Energetski udio metanola $x_{CH_3OH}$ , %	Ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa nakon CCS-a $m_{CO_2}^{CCS}$ , kgCO <sub>2</sub>
25	99,6346
50	118,3088
80	146,1462

Dodatno, kada bi se koristio e-metanol, emisija CO<sub>2</sub> mogla bi se dodatno smanjiti ili potpuno neutralizirati. E-metanol se proizvodi sintetskim putem korištenjem uhvaćenog CO<sub>2</sub> iz CCS sustava, čime se omogućava zatvaranje ciklusa ugljika. Ako pretpostavimo da se sav uhvaćeni CO<sub>2</sub> koristi za proizvodnju e-metanola, tada ukupna neto emisija CO<sub>2</sub> može se izraziti kao u izrazu (17):

$$m_{\text{CO}_2}^{\text{neto}} = m_{\text{CO}_2}^{\text{CCS}} - m_{\text{CO}_2}^{\text{e-metanol}} \quad (17)$$

gdje je  $m_{\text{CO}_2}^{\text{neto}}$  ukupna neto masa emitiranog ugljičnog dioksida,  $m_{\text{CO}_2}^{\text{CCS}}$  ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida uz primjenu CCS sustava,  $m_{\text{CO}_2}^{\text{e-metanol}}$  ukupna masa ugljičnog dioksida koja je potrebna za proizvodnju e-metanola.

U idealnom scenariju, gdje se sav uhvaćeni CO<sub>2</sub> iskoristi za proizvodnju e-metanola, neto emisija CO<sub>2</sub> postaje blizu nule. Ova integracija CCS sustava i e-metanola omogućila bi značajno smanjenje ekološkog otiska broda, što je ključno za postizanje ciljeva dekarbonizacije u pomorskom sektoru.

### 7.3.2. Emisije dušikovih oksida

Za emisije dušikovih oksida kod kombinacije metanola s dizelskim gorivom opet ponavljamo sličan postupak kao za slučaj sa samo dizelskim gorivom. Emisije dušikovih oksida ponovo možemo očitati iz simulacije motora za određenu stacionarnu radnu točku kod brzine vrtnje od 1358 min<sup>-1</sup>. Iznos emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu metanola u gorivu je prikazan u [Tablica 7]. Potrebna snaga motora i dalje iznosi  $P_{\text{potr}} = 94,18$  kW.

**Tablica 7. Vrijednosti emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu metanola**

Energetski udio metanola $x_{\text{CH}_3\text{OH}}$ , %	Emisije dušikovih oksida $\text{NO}_x$ , $\frac{\text{g}}{\text{kWh}}$
25	0,000752
50	0,000459
80	0,000325

Množenjem veličina iz [Tablica 7] s potrebnom snagom motora dolazimo do izraza za maseni protok dušikovih oksida  $m_{\text{NO}_x, h}$  u (18), s rezultatima u [Tablica 8].

$$m_{NO_x,h,i} = NO_{x,i} \cdot P_{potr} \quad (18)$$

$m_{NO_x,h,i}$  predstavlja maseni protok dušikovih oksida za određeni udio metanola,  $NO_{x,i}$  emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu metanola, a  $P_{potr} = 94,18$  kW potrebnu snagu motora.

**Tablica 8. Vrijednosti masenog protoka dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu metanola**

Energetski udio metanola $x_{CH_3OH}$ , %	Maseni protok dušikovih oksida $m_{NO_x,h}$ , $\frac{g}{h}$
25	0,0708
50	0,0432
80	0,0306

Za kraj množimo maseni protok dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu metanola [Tablica 8] s ukupnim vremenom jednog ciklusa koje iznosi  $t_{uk} = 297,5$  min = 4,9583 h. Postupak je prikazan izrazom (19) gdje dobivamo iznos ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu metanola  $m_{NO_x,i}^{uk}$ . Rezultati su vidljivi u [Tablica 9].

$$m_{NO_x,i}^{uk} = m_{NO_x,h,i} \cdot t_{uk} \quad (19)$$

**Tablica 9. Vrijednosti ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu metanola**

Energetski udio metanola $x_{CH_3OH}$ , %	Ukupna masa emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa $m_{NO_x}^{uk}$ , kgNO <sub>x</sub>
25	0,000351
50	0,000214
80	0,000152

#### 7.4. Emisije pogonskog sustava u kombinaciji s vodikom

Korištenje vodika kao dodatnog goriva u brodskom pogonskom sustavu moglo bi također imati značajan utjecaj na emisijski profil motora zbog njegovih jedinstvenih karakteristika izgaranja. Zbog svojih kemijskih svojstava, vodik sagorijeva bez izravnih emisija ugljikovog dioksida, što ga čini privlačnim kao alternativa fosilnim gorivima. Odsustvom ugljika u njegovoj molekularnoj strukturi, može se očekivati smanjenje emisija povezanih s ugljikovim spojevima u usporedbi s dizelskim gorivom. Također, njegova visoka brzina izgaranja može poboljšati učinkovitost procesa sagorijevanja i smanjiti udio nepotpuno izgorjelih spojeva.

Međutim, upotreba vodika donosi i određene izazove koji mogu utjecati na emisije motora. Vodikova sklonost samozapaljenju može dovesti do nepravilnosti u radu motora, poput prijevremenog paljenja (pre-ignition). Osim toga, zbog visoke temperature plamena, može doći do povećane formacije dušikovih oksida, što predstavlja izazov u kontroli emisija.

Tijekom testiranja, najveći energetska udio vodika dosegao je 92% [12]. Međutim, ovo je ujedno bila i granica zbog nekoliko ograničavajućih čimbenika. Brže izgaranje i veći tlak u cilindru u usporedbi s izgaranjem čistog dizela dovode do mehaničkih ograničenja sustava. Osim toga, pri nižim udjelima vodika nije dolazilo do širenja predmiješanog plamena, što je smanjilo učinkovitost izgaranja i povećalo emisije neizgorenog vodika. Zbog ovih faktora, maksimalni energetska udio vodika je ograničen kako bi se održala stabilnost i sigurnost rada sustava.

Uzimajući u obzir navedena ograničenja za daljnju analizu će biti korišteni energetska udjeli vodika od 30%, 60% i 92%, a spomenute energetske udjele ćemo ponovno pretvoriti u masene pomoću izraza (20).

$$w_{H_2} = \frac{\frac{x_{H_2}}{H_{d,H_2}}}{\frac{x_{H_2}}{H_{d,H_2}} + \frac{1 - x_{H_2}}{H_{d,Diesel}}} \quad (20)$$

gdje je  $w_{H_2}$  maseni udio vodika,  $x_{H_2}$  energetska udio vodika,  $H_{d,H_2} = 120 \frac{MJ}{kg}$  donja ogrjevna vrijednost vodika,  $H_{d,Diesel} = 42 \frac{MJ}{kg}$  donja ogrjevna vrijednost dizelskog goriva. Uvrštavanjem podataka u izraz (20), dobivamo rješenja u [Tablica 10].

**Tablica 10. Energetski i maseni udjeli vodika**

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	$w_{H_2}$ maseni udio vodika
30%	13,3%
60%	34,9%
92%	80,4%

Izračunate masene udjele ponovno unosimo u AVL BOOST simulaciju što će odrediti iznos emisija za različite udjele vodika u smjesi s dizelskim gorivom. Ovime ponovno utvrđujemo kako promjena sastava goriva utječe na emisijske karakteristike motora.

Tijekom simulacije ne mijenjamo tlak nabijanja kompresora, duljinu te početak izgaranja kao i kod kombinacije s metanolom. Dok, s druge strane ponovo mijenjamo samo Vibe-ov parametar  $m$  i količinu ubrizganog goriva.

#### 7.4.1. Emisije ugljičnog dioksida

Daljnji postupak dobivanja emisije ugljičnog dioksida za kombinaciju vodika s dizelskim gorivom provodimo jednako kao što smo provodili za kombinaciju s metanolom. Krećemo s nalaženjem podatka o potrošnji goriva dobivenog kalibracijom snage za stacionarnu radnu točku pri određenom udjelu vodika. Iznosi potrošnje goriva za različite energetske udjele vodika su prikazani u [Tablica 11].

**Tablica 11. Masena potrošnja goriva po satu za određene energetske udjele vodika**

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Masena potrošnja goriva po satu $G_h$ , $\frac{kg}{h}$
30	16,37748
60	12,95532
92	9,04428

Množenjem rezultata iz [Tablica 11 Tablica 3] s ukupnim vremenom jednog ciklusa dobivamo ukupnu masu utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa  $G^{uk}$ . Navedeno je prikazano u izrazu (21):

$$G_i^{uk} = G_{h,i} \cdot t_{uk} \quad (21)$$

gdje je  $G_i^{uk}$  ukupna masa utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni udio vodika,  $G_{h,i}$  masena potrošnja goriva po satu za određeni udio vodika i  $t_{uk} = 297,5 \text{ min} = 4,9583 \text{ h}$  ukupno vrijeme jednog ciklusa. U [Tablica 12] su prikazani rezultati nakon uvrštavanja podataka u izraz (21).

**Tablica 12. Vrijednosti ukupne mase utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni energetske udio vodika**

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Ukupna masa utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa $G^{uk}$ , kgG
30	81,20446
60	64,23636
92	44,84425

Na kraju, dolazimo do iznosa ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom udjelu vodika  $m_{CO_2,i}^{uk}$  tako da pomnožimo ukupnu masu utrošenog goriva tijekom jednog ciklusa za određeni udio vodika  $G_i^{uk}$  [Tablica 12] s omjerom mase nastalog ugljičnog dioksida  $CO_2$  i potrošenog goriva iz izraza (8). Postupak je prikazan u izrazu (22), a rezultati su prikazani u [Tablica 13].

$$m_{CO_2,i}^{uk} = 3,19 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgG}} \cdot G_i^{uk} \quad (22)$$

**Tablica 13. Vrijednosti ukupne mase emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu vodika**

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Ukupna masa emitiranog ugljičnog dioksida za vrijeme jednog ciklusa $m_{CO_2}^{uk}$ , kgCO <sub>2</sub>
30	259,04222
60	204,914
92	143,05317

**7.4.2. Emisije dušikovih oksida**

Emisije dušikovih oksida kod kombinacije vodika s dizelskim gorivom ponavljamo isti postupak kao kod kombinacije metanola s dizelskim gorivom. Emisije dušikovih oksida očitavamo iz simulacije motora za određenu stacionarnu radnu točku kod brzine vrtnje od 1358 min<sup>-1</sup>. Iznos emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu vodika u gorivu je prikazan u [Tablica 14]. Potrebna snaga motora iznosi  $P_{potr} = 94,18$  kW.

**Tablica 14. Vrijednosti emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu vodika**

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Emisije dušikovih oksida $NO_x$ , $\frac{g}{kWh}$
30	0,00222
60	0,00432
92	0,0145

Množenjem veličina iz [Tablica 14] s potrebnom snagom motora dobivamo izraz za maseni protok dušikovih oksida  $m_{NO_x,h}$  u (23), s rezultatima u [Tablica 15].

$$m_{NO_x,h,i} = NO_{x,i} \cdot P_{potr} \quad (23)$$

$m_{NO_x,h,i}$  predstavlja maseni protok dušikovih oksida za određeni udio vodika,  $NO_{x,i}$  emisije dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu vodika, a  $P_{potr} = 94,18$  kW potrebnu snagu motora.

**Tablica 15.** Vrijednosti masenog protoka dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu vodika

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Maseni protok dušikovih oksida $m_{NO_x,h}$ , $\frac{kg}{h}$
30	0,20908
60	0,406858
92	1,36561

Za kraj množimo maseni protok dušikovih oksida pri određenom energetsom udjelu vodika [Tablica 15] s ukupnim vremenom jednog ciklusa koje iznosi  $t_{uk} = 297,5$  min = 4,9583 h. Postupak je prikazan u izrazu (24) gdje dobivamo iznos ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu metanola  $m_{NO_x,i}^{uk}$ . Rezultati su vidljivi u [Tablica 16].

$$m_{NO_x,i}^{uk} = m_{NO_x,h,i} \cdot t_{uk} \quad (24)$$

**Tablica 16.** Vrijednosti ukupne mase emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa pri određenom energetsom udjelu vodika

Energetski udio vodika $x_{H_2}$ , %	Ukupna masa emitiranih dušikovih oksida za vrijeme jednog ciklusa $m_{NO_x}^{uk}$ , kgNO <sub>x</sub>
30	0,001037
60	0,002017
92	0,006771



## 7.5. Usporedba dobivenih rezultata

Na temelju dobivenih podataka iz simulacija za različite kombinacije goriva, analizirane su emisije štetnih plinova, uključujući dušikove okside ( $\text{NO}_x$ ) i ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), za različite energetske udjele metanola, vodika i dizelskog goriva. Ovi podaci omogućuju usporedbu emisijskih karakteristika motora, kao i promjene u količini utrošenog goriva s obzirom na različite energetske udjele goriva. Usporedba dobivenih podataka je prikazana u [Tablica 17] i [Tablica 18].

**Tablica 17. Usporedba dobivenih rezultata**

Gorivo	Energetski udio alternativnog goriva, %	Ukupna masa emisije ugljičnog dioksida $m_{\text{CO}_2}^{uk}$ , $\text{kgCO}_2$	Ukupna masa emisije dušikovih oksida $m_{\text{NO}_x}^{uk}$ , $\text{kgNO}_x$	Masena potrošnja goriva po satu $G_h$ , $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$
Dizelsko gorivo	-	332,127	0,00244	20,99816
Dizel-metanol	25	332,1153	0,000351	24,93288
	50	394,3628	0,000214	30,79944
	80	487,154	0,000152	38,13264
Dizel-vodik	30	259,04222	0,001037	16,37748
	60	204,914	0,002017	12,95532
	92	143,05317	0,006771	9,04428

**Tablica 18. Usporedba dobivenih rezultata u postotcima**

Gorivo	Energetski udio alternativnog goriva, %	Promjena ukupne mase emisije ugljičnog dioksida $m_{CO_2}^{uk}$ u odnosu na čisto dizelsko gorivo, %	Promjena ukupne mase emisije dušikovih oksida $m_{NO_x}^{uk}$ u odnosu na čisto dizelsko gorivo, %	Promjena masene potrošnja goriva po satu $G_h$ u odnosu na čisto dizelsko gorivo, %
Dizelsko gorivo	-	0	0	0
Dizel-metanol	25	-0,0035	-85,61	18,74
	50	18,74	-91,23	46,68
	80	46,68	-93,77	81,6
Dizel-vodik	30	-22,01	-57,5	-22,01
	60	-38,3	-17,34	-38,3
	92	-56,93	177,5	-56,93

Prvo, analiza emisija dušikovih oksida ( $NO_x$ ) pokazuje smanjenje emisija s povećanjem udjela metanola u gorivu. Naime, dok je emisija  $NO_x$  za dizelsko gorivo bila znatno veća, povećanje energetske udjela metanola rezultiralo je smanjenjem emisije ovih štetnih plinova. U [Tablica 17] vidljivo je da su emisije  $NO_x$  najniže pri udjelu metanola od 80%, što sugerira da upotreba metanola kao dodatnog goriva može značajno smanjiti emisije  $NO_x$ .

S druge strane, emisije dušikovih oksida za kombinaciju vodika s dizelskim gorivom pokazuju drugačiji obrazac. Iako vodik ne sadrži ugljik, što dovodi do smanjenja emisija  $CO_2$ , njegov visoki temperaturni plamen može uzrokovati povećanje emisija  $NO_x$ , osobito pri višim udjelima vodika. Emisije  $NO_x$  pri udjelu vodika od 92% bile su značajno više nego pri nižim udjelima vodika, što ukazuje na izazove u kontroli ovih emisija pri korištenju vodika u motorima.

Kada se uspoređuju emisije  $CO_2$ , vidi se da vodik ima potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Kako je vodik gorivo bez ugljika, upotrebom većih udjela vodika u smjesi s dizelskim gorivom drastično se smanjuje emisija  $CO_2$ . Na primjer, kod 92% udjela vodika,

ukupna masa emitiranog CO<sub>2</sub> tijekom jednog ciklusa bila je značajno manja nego kod kombinacije s metanolom ili čistog dizelskog goriva. Dok se emisije CO<sub>2</sub> kod 25% energetskog udjela metanola nalaze približno vrijednostima za čisto dizelsko gorivo, porastom udjela metanola rastu i emisije ugljičnog dioksida.

U vezi s potrošnjom goriva, promjena udjela goriva izravno utječe na količinu utrošenog goriva. Na primjer, za kombinaciju metanola i dizelskog goriva, potrošnja goriva raste s povećanjem udjela metanola. Ovi rezultati su prikazani u [Tablica 17], gdje je vidljivo da bi kod većeg udjela metanola ukupna potrošnja goriva bila viša u usporedbi s čistim dizelskim gorivom, što je posljedica niže energetske gustoće metanola. Slično tome, kod korištenja vodika kao dodatnog goriva, zabilježena je niža potrošnja goriva u odnosu na dizelsko gorivo zbog veće energetske gustoće vodika. Na primjer, pri udjelu vodika od 92%, potrošnja goriva je bila niža nego kod nižih udjela vodika. Ovi rezultati pokazuju da promjena sastava goriva utječe na ukupnu količinu goriva koja je potrebna za postizanje iste snage motora, što također utječe na emisije štetnih plinova.

## 8. ZAKLJUČAK

Iz izvedenih simulacija i usporedbe rezultata za različite kombinacije goriva, možemo zaključiti da promjena u sastavu goriva ima značajan utjecaj na emisijske karakteristike motora, kao i na ukupnu potrošnju goriva. Korištenje metanola i vodika kao alternativnih goriva u kombinaciji s dizelskim gorivom pokazalo je potencijal za smanjenje emisija štetnih plinova, dok je također uočena promjena u količini utrošenog goriva ovisno o udjelu alternativnih goriva.

U slučaju metanola, emisije  $\text{NO}_x$  značajno su smanjene. Pri najvećem udjelu metanola od 80% emisija  $\text{NO}_x$  smanjena je za više od 93% u odnosu na čisto dizelsko gorivo. Međutim emisije  $\text{CO}_2$  su povećane, pri 50% udjela metanola zabilježen je porast od gotovo 19%, dok je pri 80% taj porast dosegnuo 47%. Također, potrošnja goriva raste proporcionalno s udjelom metanola zbog niže energetske gustoće metanola u odnosu na dizelsko gorivo, gdje je pri najvećem udjelu od 80% potrošnja bila čak 82% viša od one kod čistog dizelskog goriva. Primjena CCS-a (Carbon capturing system) i e-metanola može smanjiti emisije  $\text{CO}_2$ , ali zahtijeva dodatnu opremu i povećava energetske troškove.

S druge strane, dodavanje vodika u gorivo dovelo je do smanjenja emisija  $\text{CO}_2$ . Pri udjelu vodika od 92%, emisije  $\text{CO}_2$  su bile manje za gotovo 57% u odnosu na čisto dizelsko gorivo. Istovremeno, emisije  $\text{NO}_x$  su značajno porasle. Pri istom udjelu vodika, emisije  $\text{NO}_x$  bile su gotovo 178% više nego kod čistog dizelskog goriva, što predstavlja izazov za daljnju optimizaciju motora i sustava za kontrolu emisija. U pogledu potrošnje goriva, povećanje udjela vodika dovelo je do značajnog smanjenja ukupne masene potrošnje zbog veće energetske gustoće vodika. Pri 92% vodika zabilježeno je smanjenje od 57% u odnosu na dizelsko gorivo, što ukazuje na potencijal vodika za poboljšanje energetske učinkovitosti.

S obzirom na rezultate, važno je napomenuti da bi implementacija metanola i vodika kao alternativnih goriva u brodskim pogonskim sustavima zahtijevala pažljivo planiranje i prilagodbu postojećih motora. Iako vodik nudi izvanredne ekološke prednosti u smislu smanjenja emisija  $\text{CO}_2$  i poboljšanja energetske učinkovitosti, izazovi u vezi s emisijama dušikovih oksida i potrebom za većim kompresijskim tlakom mogli bi zahtijevati dodatne tehničke prilagodbe motora i sustava za kontrolu emisija. U slučaju metanola, on omogućava smanjenje emisija  $\text{NO}_x$ , ali povećana potrošnja goriva i veće emisije  $\text{CO}_2$  mogu ograničiti njegovu široku primjenu bez daljnje optimizacije izgaranja. Dok primjena CCS-a može pomoći

u smanjenju emisija CO<sub>2</sub>, istovremeno donosi dodatne tehničke i ekonomske izazove zbog povećane potrošnje energije i potrebe za dodatnom infrastrukturom na brodovima.

Također, za široku primjenu ovih alternativnih goriva nužno je razviti infrastrukturu za njihovu proizvodnju, distribuciju i pohranu, kao i implementirati odgovarajuće sigurnosne protokole, posebno za vodik, koji je vrlo zapaljiv i zahtijeva visoke tlakove za pohranu. Nadalje, ekonomska isplativost i tržišna prihvatljivost ovih goriva ovisit će o daljnjim istraživanjima u smanjenju troškova proizvodnje, što uključuje i razvoj novih tehnologija za masovnu proizvodnju vodika i metanola iz obnovljivih izvora.

Zaključno, i metanol i vodik predstavljaju obećavajuće alternative fosilnim gorivima s potencijalom za smanjenje emisija štetnih plinova i unapređenje energetske učinkovitosti. Međutim, daljnja istraživanja i razvoj su potrebni kako bi se osigurala optimalna primjena ovih goriva u realnim uvjetima rada motora.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.ecofishing.com.hr>
- [2] <https://www.cummins.com/>
- [3] <https://www.coopalpower.com/tag/cummins-nt855-m300>
- [4] <https://www.avl.com/en/simulation-solutions>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/>
- [6] <https://www.researchgate.net/>
- [7] AVL guide
- [8] <https://www.imo.org/>
- [9] <https://www.techcummins.com/>
- [10] <https://www.sustainable-ships.org/>
- [11] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666052021000030>
- [12] <https://era.library.ualberta.ca/items/b5d14b7a-a335-4126-95f8-e1bc6a2c2571>
- [13] <https://www.methanology.com/mymethanol#no-back>
- [14] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262401480X>