

# Primjena dvogorivnog izgaranja u međunarodnom pomorskom transportu

---

**Markovinović, Jakov**

**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:235:053961>

*Rights / Prava:* [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Jakov Markovinović**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Jakov Markovinović

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se prvenstveno svojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje i bili mi podrška sve vrijeme. Hvala mentoru, prof. dr.sc. Momiru Sjeriću, na prenesenim znanjima i usmjeravanju tokom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima na podršci i društvu tijekom studiranja.

Jakov Markovinović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске 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: **Jakov Markovinović** JMBAG: 0035235721

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena dvogorivnog izgaranja u međunarodnom pomorskom transportu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of dual-fuel combustion in international maritime transport**

Opis zadatka:

Pogonski sustavi brodova bazirani su na primjeni Diesellovih 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 alternativnog goriva na značajke rada i emisije štetnih tvari iz pogonskog sustava broda. U radu je potrebno za odabrani brod koji sudjeluje u međunarodnoj plovidbi simulacijski analizirati utjecaj primjene dvogorivnog izgaranja na smanjenje ugljičnog otiska i emisije štetnih tvari.

U radu je potrebno:

- opisati odabrani brod koji sudjeluje u međunarodnoj plovidbi i njegov originalni pogonski sustav,
- izraditi 1D/0D simulacijski model pogonskog sustava broda,
- provesti kalibraciju simulacijskog modela prema podacima o značajkama rada i emisijama iz motora dostupnima od proizvođača,
- definirati propelersku krivulju (otpor propelera),
- definirati reprezentativni vozni ciklus broda obzirom na njegovu maksimalnu brzinu plovidbe,
- za različite udjele supstitucije dizelskog goriva alternativnim gorivom izračunati emisije ugljičnog dioksida i dušikovih oksida te ih međusobno usporediti s rezultatima za originalni pogonski sustav,
- izvesti zaključke.

Odabir 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 .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. ODABRANI BROD I POGONSKI SUSTAV .....	2
2.1. Trajekt „Dalmacija“ .....	2
2.2. Pogonski sustav.....	2
3. SIMULACIJSKI MODEL POGONSKOG SUSTAVA BRODA.....	4
3.1. Računalni paket AVL BOOST .....	4
3.1.1. Tvrtka AVL.....	4
3.1.2. BOOST .....	4
3.2. Simulacijski model.....	4
3.2.1. Vibe-ov model izgaranja.....	5
4. KALIBRACIJA MODELA PREMA PODACIMA PROIZVOĐAČA .....	7
4.1. Kalibracija parametara izgaranja .....	7
4.2. Kalibracija snage motora .....	8
4.3. Kalibracija potrošnje goriva i emisija .....	9
5. PROPELERSKA KRIVULJA.....	13
6. VOZNI CIKLUS BRODA .....	15
7. UPRAVLJANJE RADOM MOTORA I OČITANJE PODATAKA .....	17
7.1. Upravljanje brzine vrtnje propelera .....	17
7.2. Diskretizacija ciklusa plovidbe .....	17
7.3. Izrada topografskih dijagrama i očitavanje podataka.....	19
8. IZRAČUNAVANJE EMISIJA.....	21
8.1. Originalni pogonski sustav broda – dizelsko gorivo.....	21
8.1.1. Emisija ugljikovog dioksida .....	21
8.1.2. Emisija dušikovih oksida .....	23
8.2. Prenamjena motora i prilagodba simulacijskog modela na dvogorivni rad.....	25
8.3. Supstitucija dizelskog goriva metanolom .....	28
8.3.1. Emisija ugljikovog dioksida .....	28
8.3.2. Emisije dušikovih oksida .....	32
8.4. Supstitucija dizelskog goriva vodikom .....	35
8.4.1. Emisija ugljikovog dioksida .....	35
8.4.2. Emisija dušikovih oksida .....	38
9. ZAKLJUČAK.....	41

---

LITERATURA..... 42

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Trajekt „Dalmacija“ [2].....	2
Slika 2.	Motor 8ZA40S [3].....	3
Slika 3.	Brzina oslobađanja topline u Vibe-ovoj funkciji [5].....	6
Slika 4.	Model u BOOST-u .....	6
Slika 5.	Brzina oslobađanja topline u cilindru – simulacija .....	7
Slika 6.	Brzina oslobađanja topline u cilindru – eksperimentalno dobivena [6].....	7
Slika 7.	Krivulja snage od proizvođača [7] .....	8
Slika 8.	Kalibracija snage .....	9
Slika 9.	Specifična efektivna potrošnja goriva .....	10
Slika 10.	Države članice MARPOL konvencije [8] .....	10
Slika 11.	MARPOL Annex VI [5].....	11
Slika 12.	Emisije NOx .....	12
Slika 13.	Propelerska krivulja.....	14
Slika 14.	Relacija Dubrovnik–Bari [11] .....	15
Slika 15.	Ciklus plovidbe.....	16
Slika 16.	Upravljanje propelerom.....	17
Slika 17.	Diskretizirani ciklus plovidbe .....	18
Slika 18.	Diskretizirane radne točke.....	19
Slika 19.	Simulirane radne točke .....	20
Slika 20.	Specifična efektivna potrošnja goriva, dizelsko gorivo .....	22
Slika 21.	Emisije NOx, dizelsko gorivo .....	23
Slika 22.	Prenamjena motora na rad s brizgaljkama .....	25
Slika 23.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 20%.....	28
Slika 24.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 50%.....	28
Slika 25.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 80%.....	29
Slika 26.	Utjecaj udjela metanola na emisije ugljikovog dioksida.....	31
Slika 27.	Emisija NOx, supstitucija metanolom 20% .....	32
Slika 28.	Emisija NOx, supstitucija metanolom 50% .....	32
Slika 29.	Emisija NOx, supstitucija metanolom 80% .....	33
Slika 30.	Utjecaj udjela metanola na emisije dušikovih oksida .....	34
Slika 31.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 20% .....	35
Slika 32.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 50% .....	36
Slika 33.	Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 80% .....	36
Slika 34.	Utjecaj udjela vodika na emisije ugljikovog dioksida.....	38
Slika 35.	Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 20%.....	38
Slika 36.	Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 50% .....	39
Slika 37.	Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 80%.....	39
Slika 38.	Utjecaj udjela vodika na emisije dušikovih oksida .....	40



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovni podaci o motoru .....	3
Tablica 2. Podaci u putovanju .....	15
Tablica 3. Ciklus plovidbe.....	16
Tablica 4. Diskretizacija ciklusa plovidbe .....	18
Tablica 5. Očitane vrijednosti potrošnje goriva .....	22
Tablica 6. Emisije NOx, dizelsko gorivo .....	24
Tablica 7. Pregled podataka o smjesama goriva .....	27
Tablica 8. Očitavanje potrošnje goriva, supstitucija metanolom .....	29
Tablica 9. Utrošak goriva, supstitucija metanolom .....	30
Tablica 10. Emisije ugljikovog dioksida, supstitucija metanolom.....	30
Tablica 11. Analiza kemijskog sastava metanola i dizelskog goriva.....	31
Tablica 12. Emisije ugljikovog dioksida primjenom „zelenog“ metanola.....	31
Tablica 13. Očitavanje emisije NOx, supstitucija metanolom .....	33
Tablica 14. Ukupne emisije dušikovih oksida, supstitucija metanolom .....	34
Tablica 15. Očitavanje potrošnje goriva, supstitucija vodikom .....	37
Tablica 16. Utrošak goriva, supstitucija vodikom.....	37
Tablica 18. Emisije ugljikovog dioksida, supstitucija vodikom .....	37
Tablica 19. Očitavanje emisije dušikovih oksida, supstitucija vodikom .....	40
Tablica 20. Ukupna emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom .....	40

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$a$	-	Parametar u Vibe-ovoj funkciji
$c$	-	Maseni udio ugljika u gorivu
$g_e$	g/kWh	Specifična efektivna potrošnja goriva
$G$	kg	Masa goriva
$H_d$	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost goriva
$m$	-	Parametar oblika u Vibe-ovoj funkciji
$m$	kg	Masa
$\dot{m}$	kg/h	Maseni protok
$M$	kg/kmol	Molarna masa
$n$	min <sup>-1</sup>	Brzina vrtnje
$P$	kW	Snaga
$t_i$	h	Trajanje segmenta plovidbe
$Z_0$	kg/kg	Stehiometrijska količina zraka za izgaranja 1kg goriva
$w$	kg/kg	Maseni udio
$x$	-	Udio izgorene mase goriva
$x$	-	Energetski udio određenog goriva u smjesi
$Q$	J	Toplinska energija sadržana u gorivu
$\alpha$	°	Kut zakreta koljenastog vratila
$\alpha_0$	°	Početak izgaranja u Vibe-ovoj funkciji
$\Delta\alpha_c$	°	Trajanje izgaranja

**SAŽETAK**

Radi ekoloških i zdravstvenih razloga smanjenje emisija štetnih tvari je cilj koji je zadan svim motorima s unutarnjim izgaranjem, što obuhvaća i dizelske brodske motore namijenjene za pogon trajekata na međunarodnim linijama. Potpisivanjem konvencija poput MARPOL, velik broj država usvojio je određene granice emisija štetnih tvari kao što su ugljikov dioksid i dušikovi oksidi. U radu je razmatrana primjena alternativnih goriva metanola i vodika te je razmotrena prenamjena motora na rad s ovakvim gorivima.

Korištenjem programskog paketa AVL BOOST izrađen je i kalibriran simulacijski model originalnog pogonskog sustava broda. Utjecaji alternativnih goriva na značajke štetnih emisija analizirani su simuliranjem dvogorivnog izgaranja s različitim udjelom supstituiranog dizelskog goriva. Rezultati rada motora prikazani su topografskim dijagramima. Nakon definiranja reprezentativnog plovnog ciklusa trajekta i otpora motoru koji se javljaju tokom plovidbe izračunate su konkretne mase štetnih tvari ispušnih plinova koje trajekt na svojoj plovidbi uzrokuje. Pokazana je ovisnost ispušnih emisija o udjelu supstituiranog dizelskog goriva i važnost pravilno odabranog supstituiranog udjela.

Ključne riječi: AVL BOOST, štetne emisije, ugljikov dioksid, dušikovi oksidi, dvogorivno izgaranje, metanol, vodik

**SUMMARY**

Because of environmental and health issues, reducing emissions of harmful substances is a goal set for all internal combustion engines, including diesel marine engines intended for driving ferries on international routes. By signing conventions such as MARPOL, a large number of countries have adopted certain limits for harmful exhaust emissions such as carbon dioxide and nitrogen oxides. This paper considers the use of alternative fuels such as methanol and hydrogen with consideration of measures needed to successfully operate engines with such fuels.

Using the AVL BOOST software package, a simulation model of the original ship's propulsion system was created and calibrated. The effects of alternative fuels on harmful emission characteristics were analyzed by simulating dual-fuel combustion with different proportions of substituted diesel fuel. The results of engine operation are shown in topographic diagrams. After defining a representative ferry operation cycle and engine resistance that occur during voyage, the specific masses of harmful exhaust gases that the ferry causes during its voyage were calculated. The dependence of exhaust emissions on the proportion of substituted diesel fuel and the importance of a properly selected substituted proportion are shown.

Keywords: AVL BOOST, harmful emissions, carbon dioxide, nitrogen oxides, dual-fuel combustion, methanol, hydrogen

## 1. UVOD

Dobivanje korisne energije oduvijek je bila jedna od glavnih zanimanja čovječanstva. U tu svrhu razvili su se razni koncepti i konstrukcije. Uz pomoć motora s unutarnjim izgaranjem moguće je pretvoriti kemijsku energiju goriva u poželjan mehanički rad. Radna smjesa motora s unutarnjim izgaranjem sastoji se od mješavine zraka i goriva u određenom omjeru. Prema načinu upaljivanja te smjese razlikujemo motore s kompresijskim paljenjem i motore s vanjskim paljenjem smjese. Zbog višeg termičkog stupnja djelovanja, pouzdanosti i trajnosti, motori s kompresijskim paljenjem stekli su popularnost u pojedinim područjima. Međutim, pokazuju značajno veće emisije dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) i krutih čestica (PM). Poveznice između ispušnih emisija motora s unutarnjim izgaranjem i ljudskog zdravlja te utjecaja na okoliš razlog su sve strožim normama i regulacijama kojima se nastoje smanjiti te iste štetne emisije.

Jedno brojnih područja primjene motora s unutarnjim izgaranjem i kompresijskim paljenjem smjese su brodovi za međunarodnu plovidbu kod kojih prednosti poput bolje iskoristivosti goriva i pouzdanosti igraju značajnu ulogu. Na međunarodni brodski promet također se postavljaju ograničenja ispušnih emisija kao i na ostale primjene takvih motora.

Takvi motori s kompresijskim paljenjem koriste dizelsko gorivo te će u ovom radu biti analiziran utjecaj supstitucije originalnog dizelskog goriva alternativnim gorivima vodikom i metanolom u različitim energetske udjelima na emisije štetnih tvari. Analiza će se vršiti na pogonskom sustavu i plovnom ciklusu trajekta „Dalmacija“ tvrtke Jadrolinija.

## 2. ODABRANI BROD I POGONSKI SUSTAV

### 2.1. Trajekt „Dalmacija“

Odabrani brod za čiji će pogonski sustav i vozni ciklus biti uspoređivani rezultati je trajekt „Dalmacija“ tvrtke Jadrolinija. Brod je izrađen 1993. godine u norveškom brodogradilištu Fosen Mekaniske Verksteder AS. Od 2024. godine plovi za tvrtku Jadrolinija na liniji Dubrovnik – Bari (Italija). „Dalmacija“ je najveći brod u povijesti flote Jadrolinije. Dužina mu je 134,4 metra, a gaz broda je 5,2 metra. Na svojem putovanju postiže najveću brzinu od 17 čvorova te sa svojih 8 paluba smješta 1800 putnika i 250 automobila. [1]



Slika 1. Trajekt „Dalmacija“ [2]

### 2.2. Pogonski sustav

Pogonski sustav trajekta „Dalmacija“ sastoji se od dva motora finskog proizvođača Wärtsilä oznake 8ZA40S. Navedeni motor dio je ZA40S serije čiji motori posjeduju iste osnovne karakteristike i dimenzije klipova, ali se razlikuju po broju i smještaju cilindara.

Ovakav modularni princip građe motora gdje se osnovom jedne dimenzije promjera cilindra i hoda klipa izvode motori različitih snaga čest je kod motora ovakve namjene. Takvi motori imaju veliki broj potpuno jednakih dijelova kao klipovi, klipnjače, cilindarske košuljice, cilindarske glave, ventile, ležajeve itd. čime se smanjuju troškovi proizvodnje, održavanja i količine rezervnih dijelova na skladištu.

Osnovne karakteristike motora dane su u tablici 1.:

**Tablica 1. Osnovni podaci o motoru**

Snaga motora, kW	5760
Nazivna brzina vrtnje, $\text{min}^{-1}$	510
Broj cilindara, -	8
Promjer cilindra, mm	400
Hod cilindra, mm	560
Kompresijski omjer, -	14,05



**Slika 2. Motor 8ZA40S [3]**

Navedeni motor je dizelski četverotaktni motor s prednabijanjem. Osim svoje dimenzije u svojem osnovnom principu rada ne razlikuje se od dizelskih motora dostupnih u komercijalnim vozilima i osobnim automobilima. Osam cilindara posloženo je u rednu konfiguraciju te svaki cilindar vrši izmjenu radne tvari kroz 4 ventila. Otvaranje i zatvaranje ventila kontrolirano je bregastim vratilom smještenim u bloku motora koje je preko zupčanika povezano na koljenasto vratilo. Nabijanje motora vrši se pomoću kompresora pogonjenog turbinom na ispušne plinove.

Pokretanje motora se zbog dimenzija ne vrši putem elektropokretača kao kod osobnih vozila već pomoću stlačenog zraka iz spremnika. Spremnik stlačenog zraka puni se kompresorom koji se pogoni preko pomoćnog motora.

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

Za danje potrebe ovog rada izrađen je i kalibriran simulacijski model pogonskog sustava broda u računalnom paketu za simulacije motora s unutarnjim izgaranje AVL BOOST.

#### **3.1. Računalni paket AVL BOOST**

##### **3.1.1. Tvrtka AVL**

AVL List GmbH jedna je od vodećih svjetskih tehnoloških tvrtki u području mobilnosti za razvoj, simulaciju i testiranje u automobilske industriji, kao i u željezničkoj i pomorskoj industriji te energetici. Tvrtka zapošljava 12 200 zaposlenika na preko 90 lokacija. U godini 2023. tvrtka je ostvarila promet od 2,3 milijarde eura, od čega preko 10% se ulaže nazad u istraživanje i razvoj. [4]

##### **3.1.2. BOOST**

AVL BOOST je simulacijski program za motore s unutarnjim izgaranjem. Pruža sofisticirane modele za analizu performansi motora, ispušnih emisija i akustike kanala u stacionarnim i tranzijentnim uvjetima. BOOST omogućava simuliranje svih vrsta motora s unutarnjim izgaranjem: motori s kompresijskim paljenjem smjese i motori s vanjskim paljenjem smjese; četverotaktni i dvotaktni motori. Moguća je simulacija od malih motora za pogon motocikala sve do najvećih motora kakvi se pronalaze u brodovima za međunarodni promet. Također, posjeduje mogućnosti prilagodbe korištenog goriva, tako je moguće koristiti klasična goriva kao što su benzin i dizelsko gorivo sve do alternativnih goriva poput vodika, metana, amonijaka, prirodnog plina itd.

#### **3.2. Simulacijski model**

Simulacijski model građen je dodavanjem, definiranjem i međusobnim povezivanjem elemenata dostupnih u programskog paketu koji predstavljaju osnovne elemente motora s unutarnjim izgaranjem. Izgaranje goriva opisano je dvozonskim Vibe modelom koji oslobađanje topline u cilindru opisuje Vibe-ovom funkcijom. Ovaj model tokom izgaranja razlikuje temperaturu izgorene i neizgorene smjese što je bitan uvjet kod računanja emisija.



### 3.2.1. Vibe-ov model izgaranja

Vibe-ova funkcija koristi se za aproksimiranje karakteristika oslobađanja topline u motoru:

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m + 1) \cdot \gamma^m \cdot e^{-a\cdot\gamma^{m+1}} \quad (1)$$

$$dx = \frac{dQ}{Q} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{dQ}{Q} \quad (3)$$

Gdje je:

$x$  – udio izgorene mase goriva,

$Q$  – ukupni toplina od goriva,

$\alpha$  – kut koljenastog vratila,

$\alpha_o$  – početak izgaranja ,

$\Delta\alpha_c$  – trajanje izgaranja,

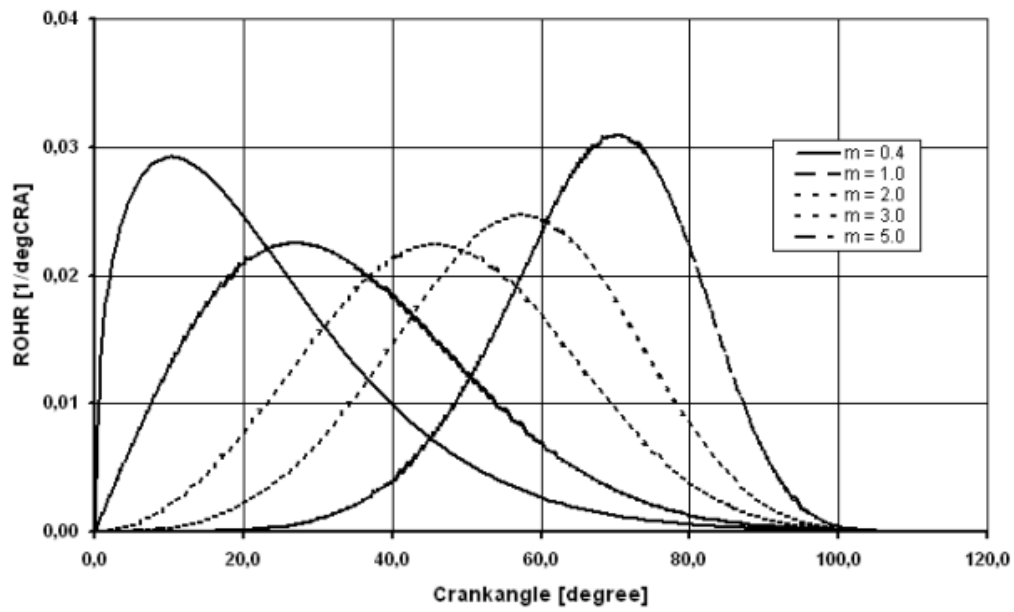
$m$  – parametar oblika,

$a$  – Vibe-ov parametar,  $a = 6,9$  za potpuno izgaranje.

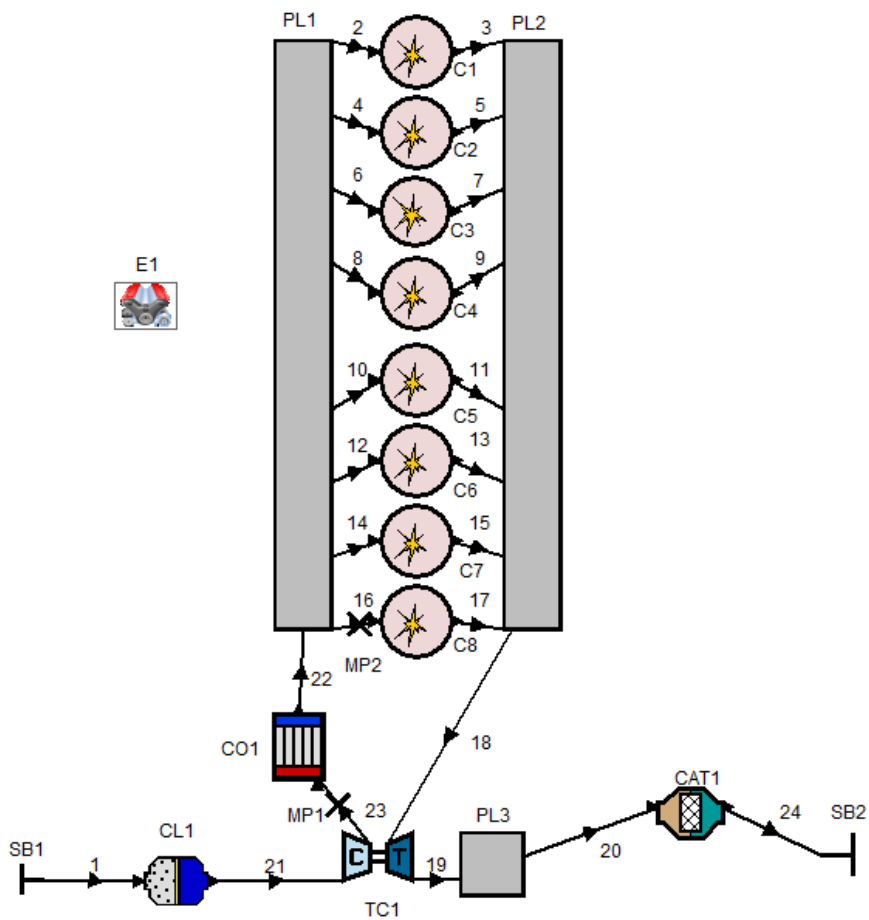
Integriranjem Vibe-ove funkcije dobiva se udio izgorenog goriva od početka izgaranja:

$$x = \int \frac{dx}{d\alpha} \cdot d\alpha = 1 - e^{-a\cdot\gamma^{m+1}} \quad (4)$$

Na slici 3. prikazan je utjecaj parametra oblika  $m$  na brzinu oslobađanja topline. Slika 4. prikazuje model motora u sučelju programskog paketa BOOST.



Slika 3. Brzina oslobađanja topline u Vibe-ovoj funkciji [5]

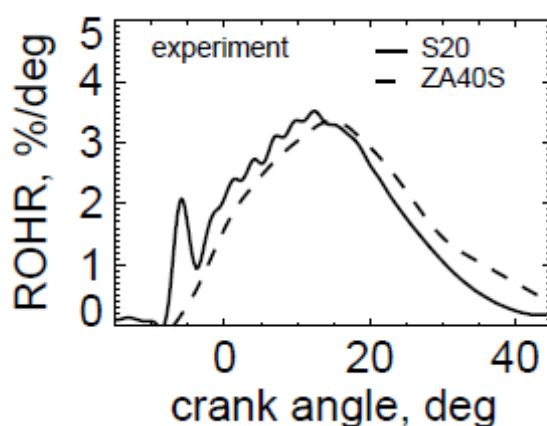


Slika 4. Model u BOOST-u

## 4. KALIBRACIJA MODELA PREMA PODACIMA PROIZVOĐAČA

### 4.1. Kalibracija parametara izgaranja

Osnovna značajka motora s unutarnjim izgaranjem je sagorijevanje goriva i oslobađanje energije u obliku topline unutar cilindra. Prema podacima iz [5] i eksperimentalnog mjerenja za zadani motor [6] kalibrirani su parametri Vibe-ove funkcije: parametar oblika  $m$ , početak izgaranja i trajanje izgaranja. Slika 5. prikazuje oslobađanje topline u cilindru prema Vibe-ovoj funkciji u sučelju programa BOOST. Slika 6. prikazuje eksperimentalno izmjerenu krivulju oslobađanja topline u cilindru [6] koja je korištena kao referenca za kalibriranje.

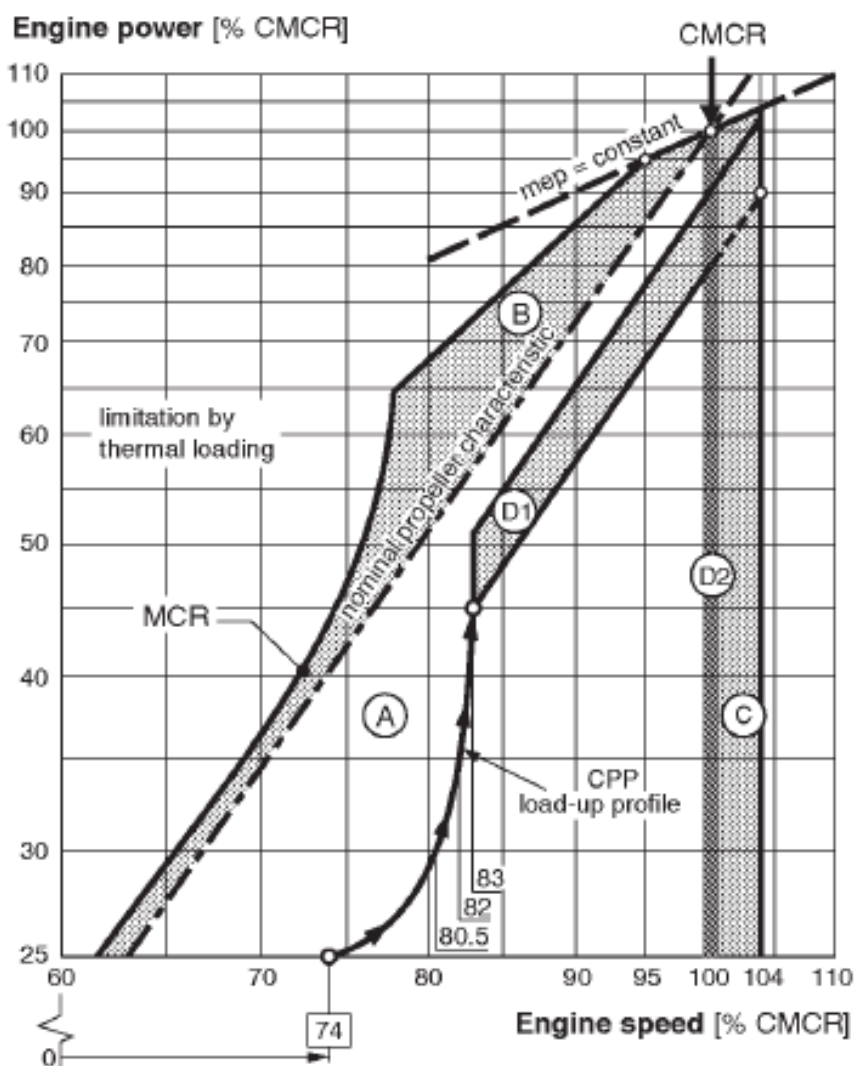


Slika 6. Brzina oslobađanja topline u cilindru – eksperimentalno dobivena [6]



Slika 5. Brzina oslobađanja topline u cilindru – simulacija

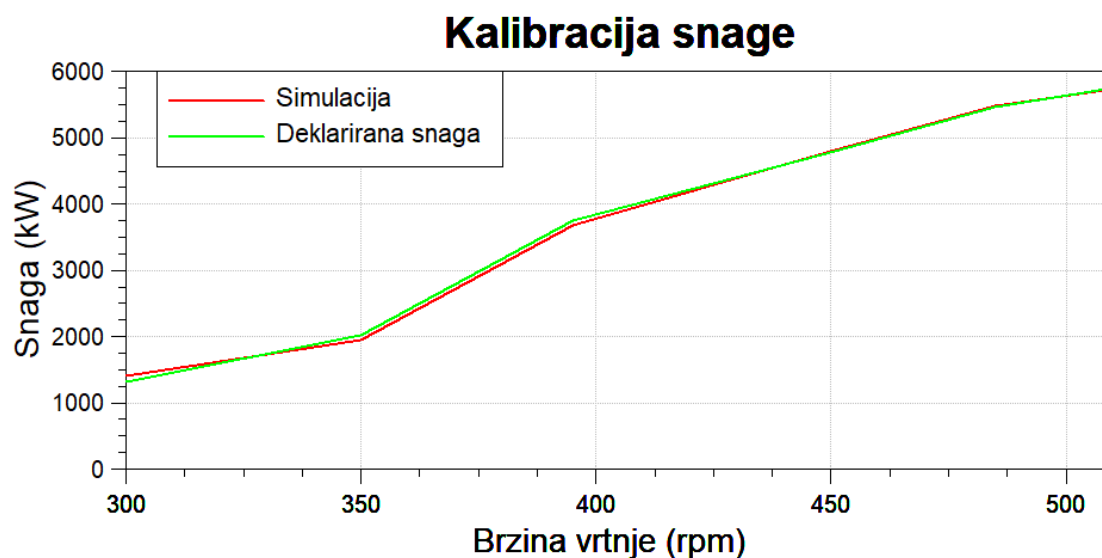
## 4.2. Kalibracija snage motora



Slika 7. Krivulja snage od proizvođača [7]

Na slici 7. najgornja krivulja označena s „MCR“ (eng. Maximum Continuous Rating) predstavlja snagu koju je motor sposoban držati kontinuirano. Za točku na MCR krivulji pri 100% nazivne brzine, označena s „CMCR“ (eng. Contracted Maximum Continuous Rating) od proizvođača [7] zadan je podatak o specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva te iznosi:

$$g_{e,min} = 186 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \quad (5)$$



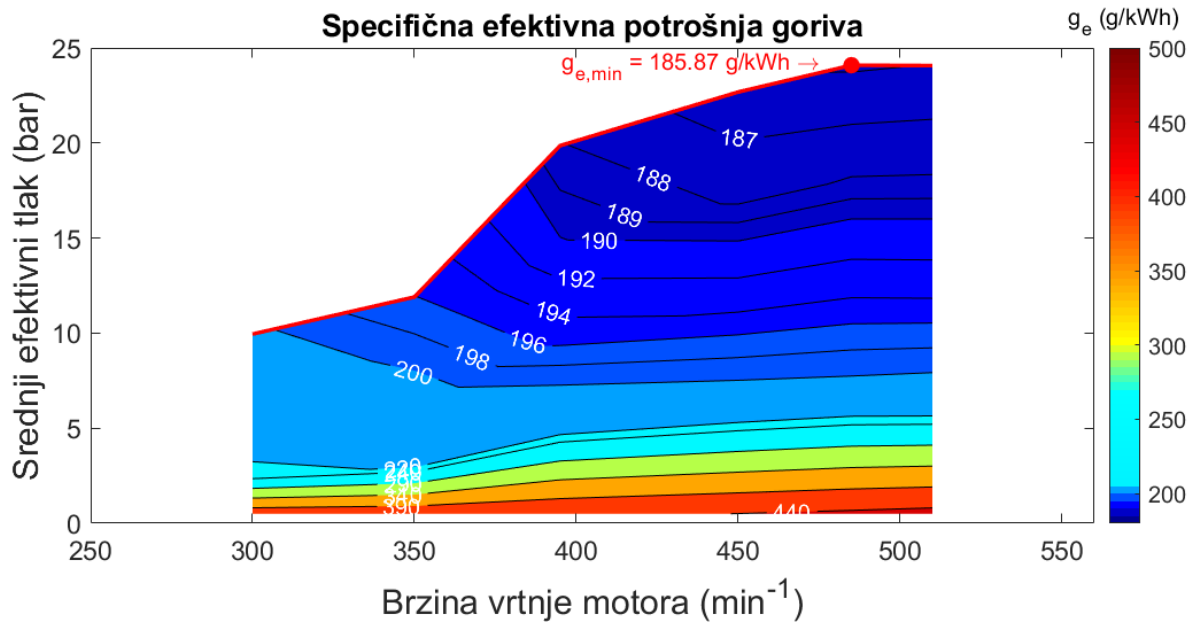
Slika 8. Kalibracija snage

Kod motora s kompresijskim paljenjem smjese snaga se kontrolira količinom ubrizgavanog goriva. Regulacijom količine goriva ubrizganog u cilindar svakog ciklusa prilagođena je snaga dobivena simulacijom kako bi odgovarala deklariranoj. Slika 8. prikazuje rezultate kalibracije snage dobivene simulacijskim modelom i snage deklarirane od proizvođača prema slici 7.

### 4.3. Kalibracija potrošnje goriva i emisija

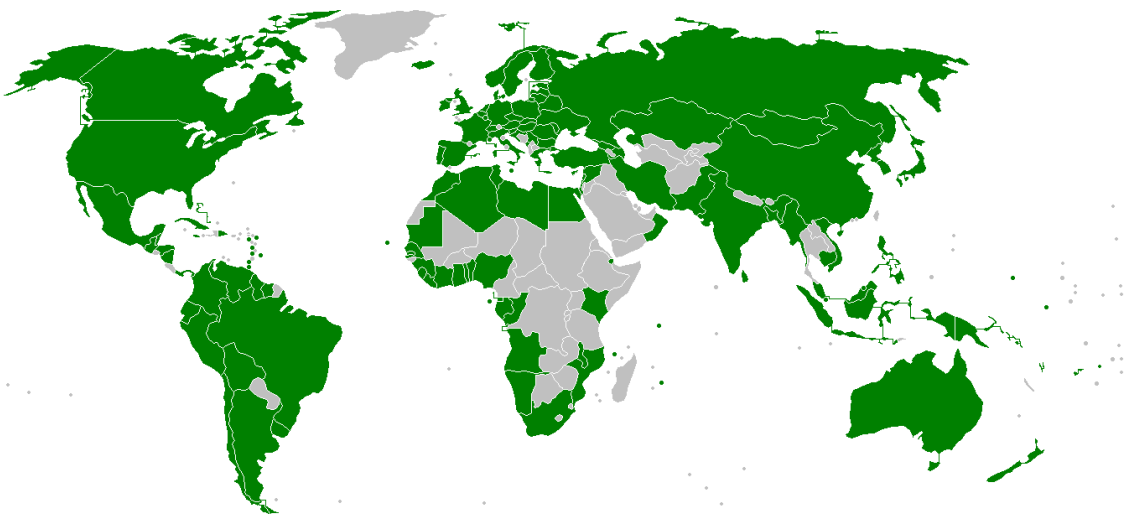
Efektivna potrošnja goriva ovisi o parametrima izgaranja, svojstvima goriva, mehaničkim gubitcima u motoru, radu potrebnom za izmjenu radne tvari itd. Prema proizvođaču deklarirana je specifična efektivna potrošnja  $g_{e,min} = 186 \text{ g/kWh}$ . Minimalna potrošnja goriva očekuje se na najvećem opterećenju motora. Smanjenjem opterećenja motora povećava se specifična efektivna potrošnja goriva prvenstveno zbog većeg udjela dobivene snage koja je potrebna za svladavanje mehaničkih gubitaka.

Slika 9. prikazuje topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o brzini vrtnje motora i opterećenju motora prikazanog preko srednjeg efektivnog tlaka. Kao i pretpostavljeno, najbolja iskoristivost goriva dobiva se pri višim opterećenjima.



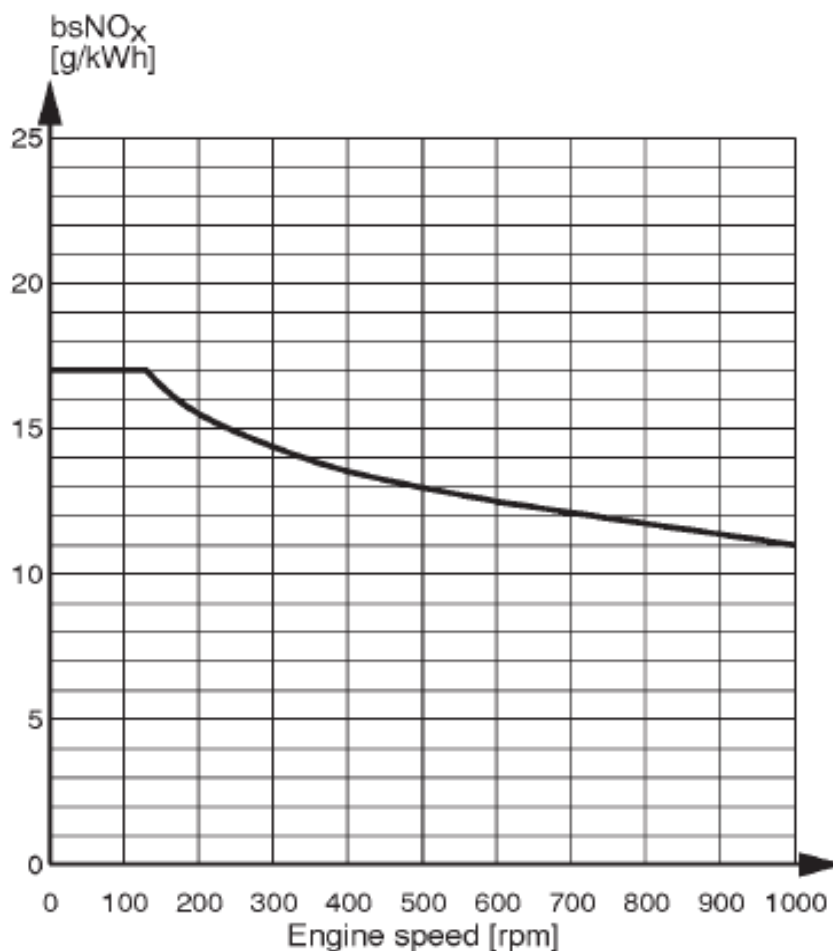
**Slika 9. Specifična efektivna potrošnja goriva**

Međunarodna pomorska organizacija IMO specijalizirana je agencija Ujedinjenih Naroda koja se bavi tehničkim aspektima pomorskog prometa. U Međunarodnoj konvenciji o sprječavanju onečišćenja brodova, poznatoj po kratici MARPOL, propisana su pravila s ciljem smanjenja onečišćenja morskog okoliša. Svi brodovi koji plove pod zastavama država članica ove konvencije podliježu njenim pravilima, neovisno kamo plove. Također, države članice odgovorne su za sve brodove koji plove unutar njihovih voda.



**Slika 10. Države članice MARPOL konvencije [8]**

MARPOL konvencija podijeljena je na šest aneksa od koji se posljednji odnosi na onečišćenje zraka.[8] Aneks VI propisuje maksimalne emisije dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) i količine sumpora u gorivu koja direktno utječe na emisije sumporovih oksida ( $\text{SO}_x$ ). Kroz godine Aneks VI postrožen je dodatno uvođenjem 2011. godine drugog stupnja i 2016. godine trećeg stupnja sa sve nižim dopuštenim emisijama. Motor obuhvaćen u ovom radu podliježe prvom stupnju iz 2000. godine. Slika 11. prikazuje maksimalne dopuštene emisije dušikovih oksida u zavisnosti brzine vrtnje motora.

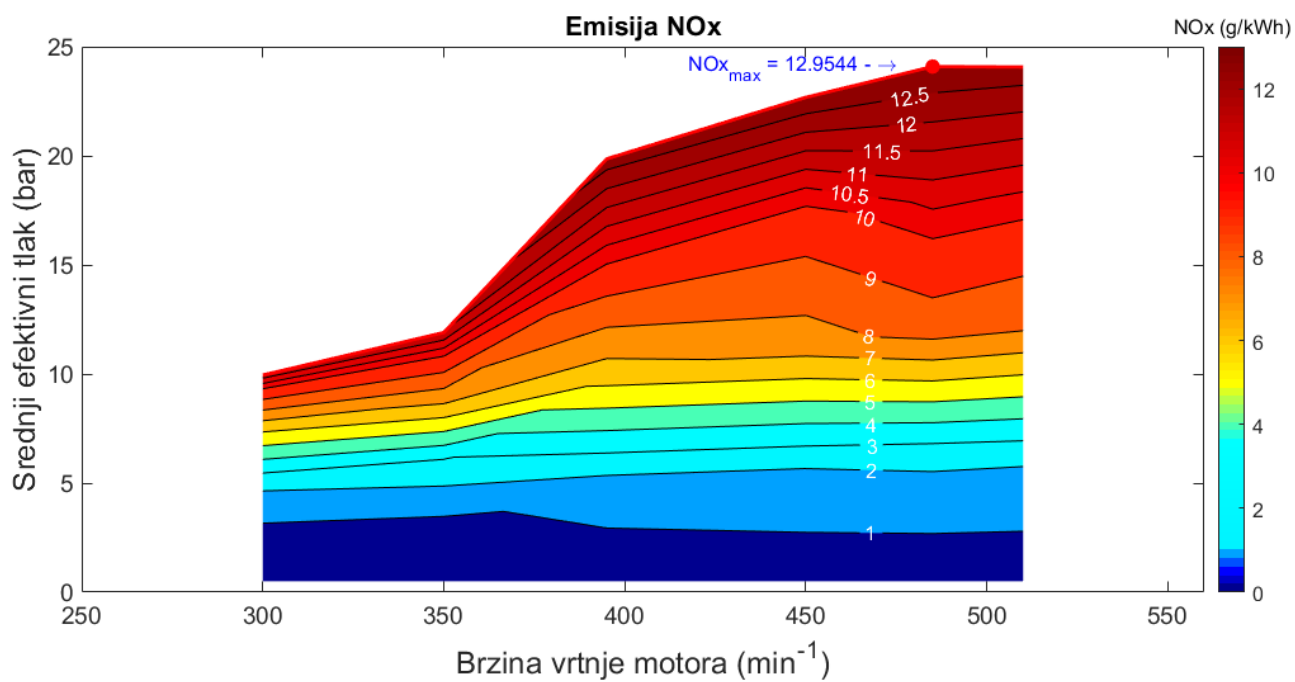


Slika 11. MARPOL Annex VI [5]

Očitavanjem iz dijagrama za odabrani motor određuje se maksimalna dopuštena emisija dušikovih oksida:

$$\text{NO}_{x\min} = 13 \text{ g/kWh.} \quad (6)$$

Prema navedenim podacima, kalibriran je model u BOOST-u. Emisije dušikovih oksida prema simulaciji prikazane su na topografskog dijagramu u ovisnosti o brzini vrtnje motora i opterećenju na slici 12.



Slika 12. Emisije NOx



## 5. PROPELERSKA KRIVULJA

Područje rada motora ovisi uvelike o tome što je potrošač energije kojeg motor pogoni. U slučaju brodova otpore motoru pruža propeler. Snaga propelera funkcija je brzine vrtnje propelera na treću potenciju.[9]

$$P = f(n^3) \quad (7)$$

Radna točka motora stoga leži na propelerskoj krivulji. Kod projektiranja pogonskog sustava broda predviđa se da će motor raditi na 90% opterećenja na nazivnoj brzini vrtnje pri najvećoj brzini plovidbe. [7] Na taj način ostavlja se određena rezerva snage.

Iz navedenih podataka moguće je definirati izraz za snagu propelera u ovisnosti brzine vrtnje. Poznato opterećenje na nazivnoj brzini vrtnje možemo zapisati na sljedeći način:

$$P_p(n) = a \cdot n^3, \quad (8)$$

gdje je:

$P_p$  – snaga propelera, kW,

$n$  – brzina vrtnje motora, min<sup>1</sup>,

$a$  – faktor kojeg je potrebno odrediti,  $\frac{\text{kW}}{\text{min}^3}$ .

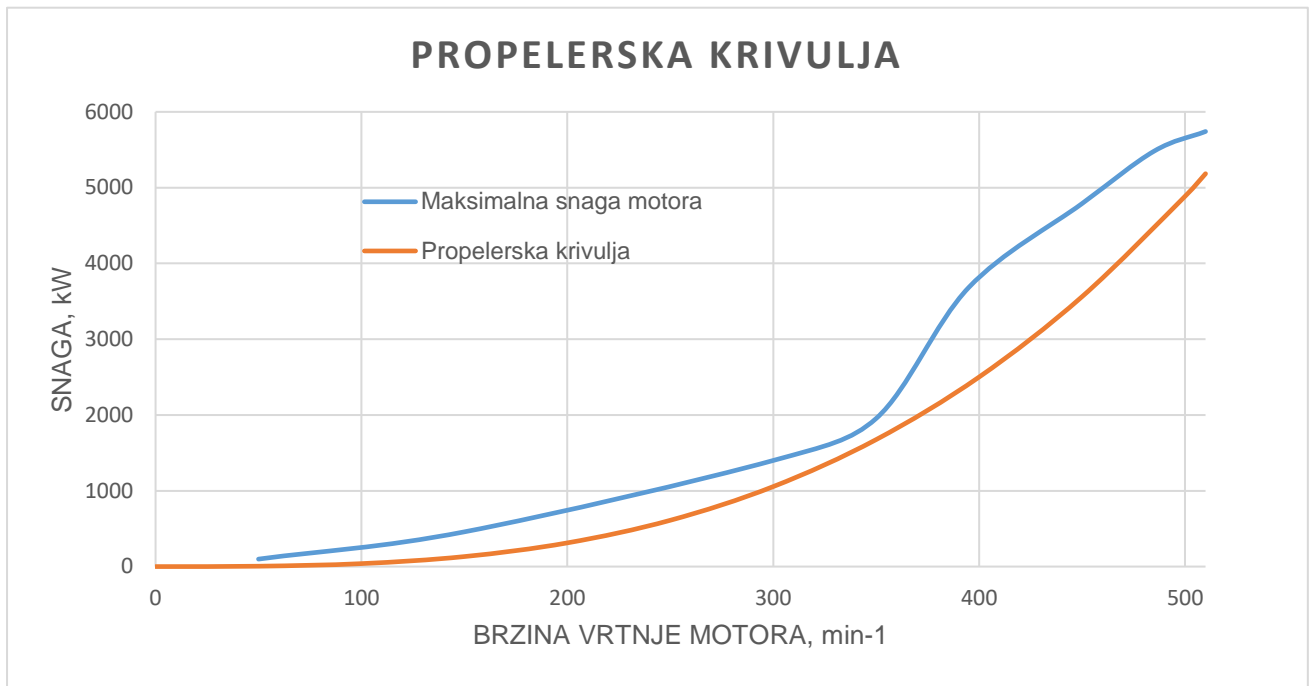
Poznato je  $P_p(n_{max}) = 0,9 \cdot P_{max}$ , gdje je  $P_{max}$  snaga na punom opterećenju i nazivnoj brzini vrtnje, a  $n_{max}$  nazivna brzina vrtnje; odakle možemo izraziti:

$$a = \frac{0,9P_{max}}{n_{max}^3} = \frac{0,9 \cdot 5760}{510^3} = 3,908 \cdot 10^{-5} \text{ kW/min}^3 \quad (9)$$

Konačno dobivamo izraz za snagu propelera u ovisnosti o brzini vrtnje motora:

$$P_p(n) = 3,908 \cdot 10^{-5} n^3 \quad (10)$$

Propelerska krivulja zajedno s maksimalnom snagom motora prikazana je na slici 13.



Slika 13. Propelerska krivulja

## 6. VOZNI CIKLUS BRODA

Za izračunavanje emisija broda na svome putovanju potrebno je definirati reprezentativni vozni ciklus. Putovanje trajektom od luke Dubrovnik do luke Bari traje 7 sati i 30 minuta te u tome periodu trajekt prijeđe 108 nautičkih milja, odnosno neznatno više od 200 kilometara[10]. Nadalje, najveća brzina trajekta jest 17 čvorova, odnosno 31,48 km/h. Podaci o plovidbi prikazani su u tablici 2.

**Tablica 2. Podaci u putovanju**

Maksimalna brzina plovidbe	17 čvorova
Duljina puta	108 nautičkih milja
Trajanje puta	7 h 30 min

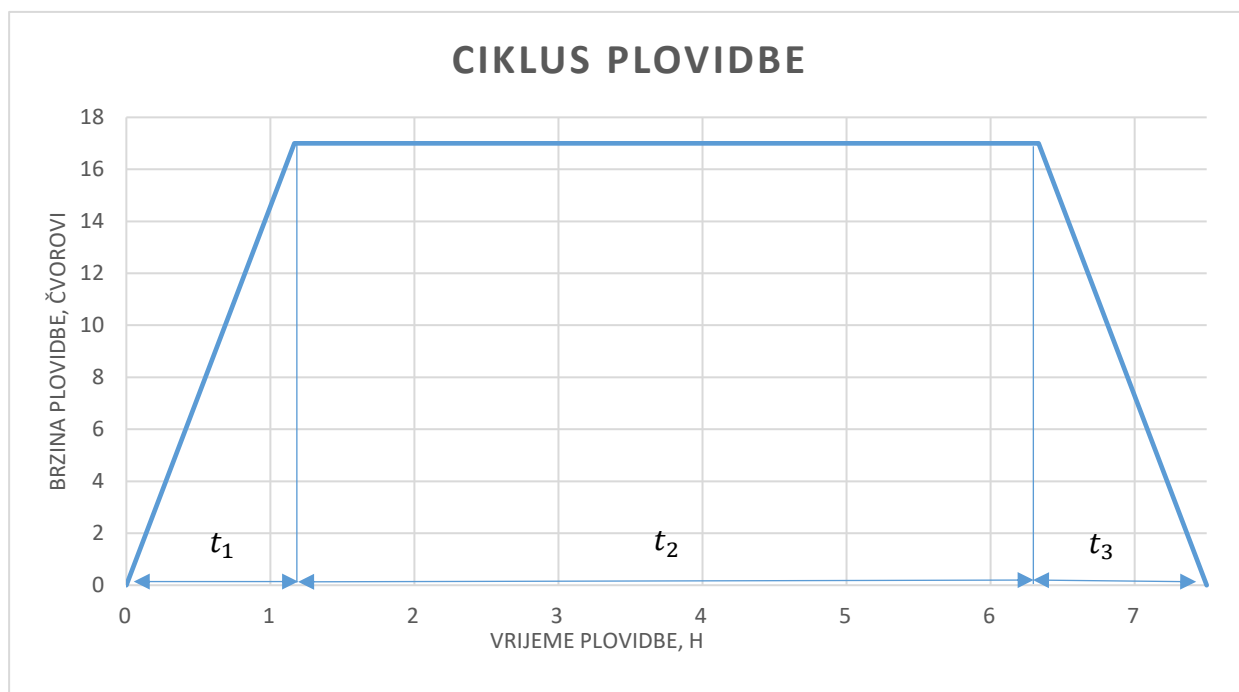


**Slika 14. Relacija Dubrovnik–Bari [11]**

Prema zadanim podacima izrađen je reprezentativni ciklus plovidbe koji se sastoji od tri dijela: isplovljavanje broda iz luke i ubrzavanje do maksimalne brzine, plovidba konstantnom brzinom, usporavanje broda i uplovljavanje u luku. Tokom isplovljavanja i uplovljavanja pretpostavljeno je konstantno ubrzanje broda, odnosno linearni porast brzine plovidbe do maksimalne brzine. Podaci o ciklusu plovidbe prikazani su u tablici 3. Ovisnost brzine plovidbe o vremenu prikazana je grafički na slici 15. Akumulirani put pojedinog perioda predstavljen je površinom ispod krivulje.

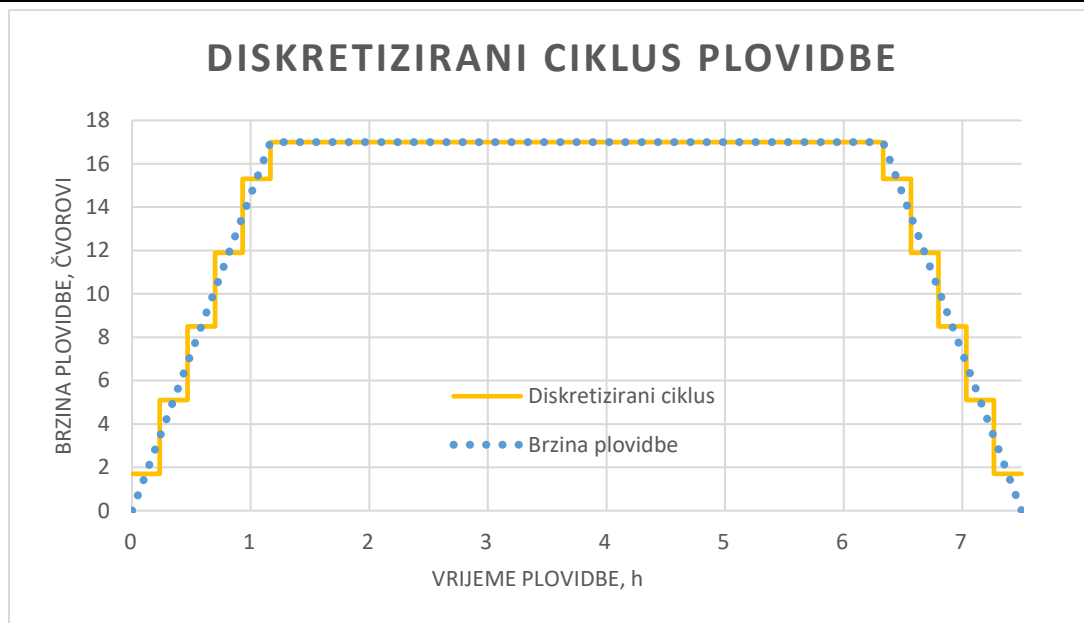
Tablica 3. Ciklus plovidbe

Period	Brzina plovidbe	Trajanje, h	Akumulirani put
Isplovljavanje, $t_1$	Linearno od 0 do 17 čvorova	1:10	18,375 km
Plovidba konstantnom brzinom, $t_2$	17 čvorova	5:10	162,75 km
Uplovljavanje, $t_3$	Linearno od 17 do 0 čvorova	1:10	18,375 km
Suma		7:30	199,5 km



Slika 15. Ciklus plovidbe



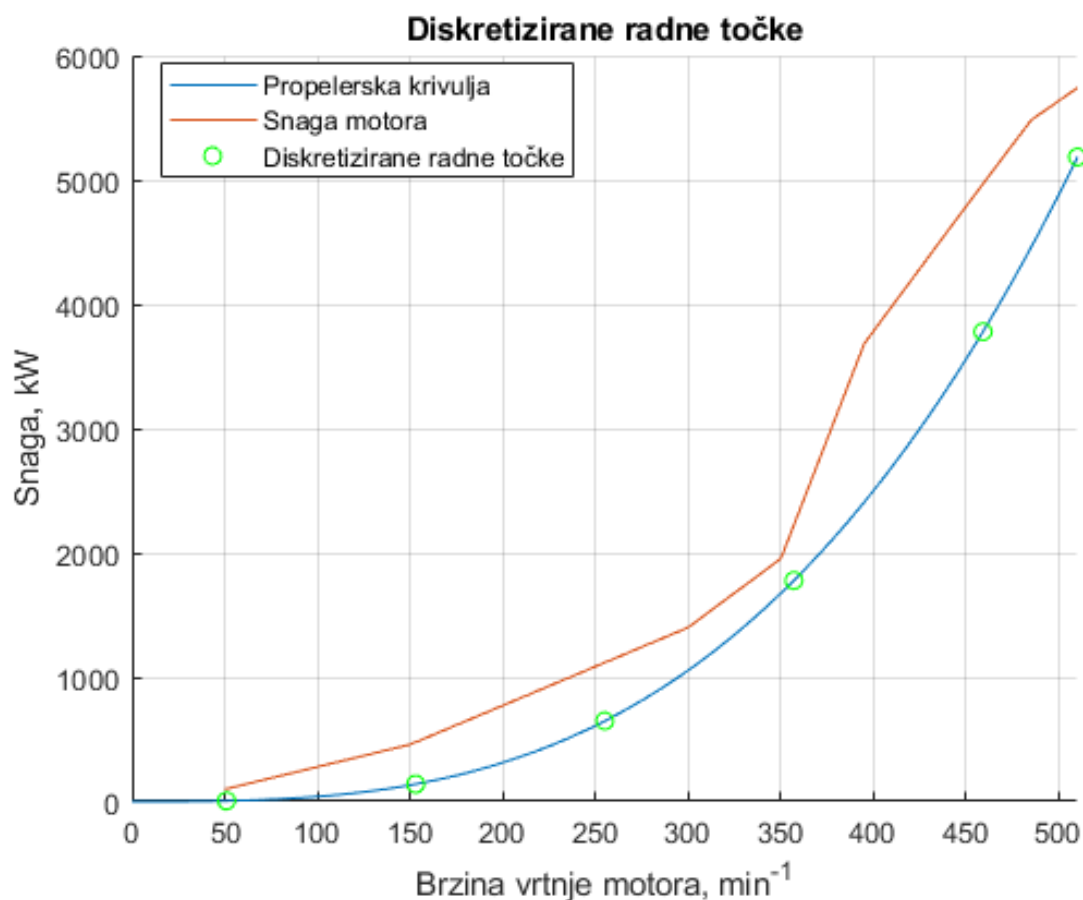


Slika 17. Diskretizirani ciklus plovidbe

Uplovljavanje i isplavlavanje podijeljeno je na pet segmenata u trajanju od 14 minuta s konstantnom brzinom koja odgovara prosječnoj brzini tog segmenta. Za dobivene brzine plovidbe na pojedinim segmentima izračunate su odgovarajuće brzine vrtnje motora prema slici 16. Ovih pet kombinacija brzine vrtnje motora i snage propelera zajedno s radnom točkom pri konstantnoj brzini plovidbe daje ukupno 6 radnih točaka čije će vrijednosti emisija utjecati na konačni izračun. Navedene radne točke pojedinih segmenata i njihovo trajanje prikazane su u tablici 4. te na slici 18. zajedno s maksimalnom snagom motora i propelerskom krivuljom.

Tablica 4. Diskretizacija ciklusa plovidbe

Period	Segment	Prosječna brzina, čvorovi	Trajanje, h	Pripadajuća brzina vrtnje motora, $\text{min}^{-1}$	Zahtijevana snaga motora, kW
Isplavlavanje	1	1.7	0:14	51	5,18
	2	5.1	0:14	153	139,97
	3	8.5	0:14	255	648,00
	4	11.9	0:14	357	1778,11
	5	15.3	0:14	459	3779,14
Konstantna brzina plovidbe	-	17	5:10	510	5184,00
Uplovljavanje	5	15.3	0:14	459	3779,14
	4	11.9	0:14	357	1778,11
	3	8.5	0:14	255	648,00
	2	5.1	0:14	153	139,97
	1	1.7	0:14	51	5,18

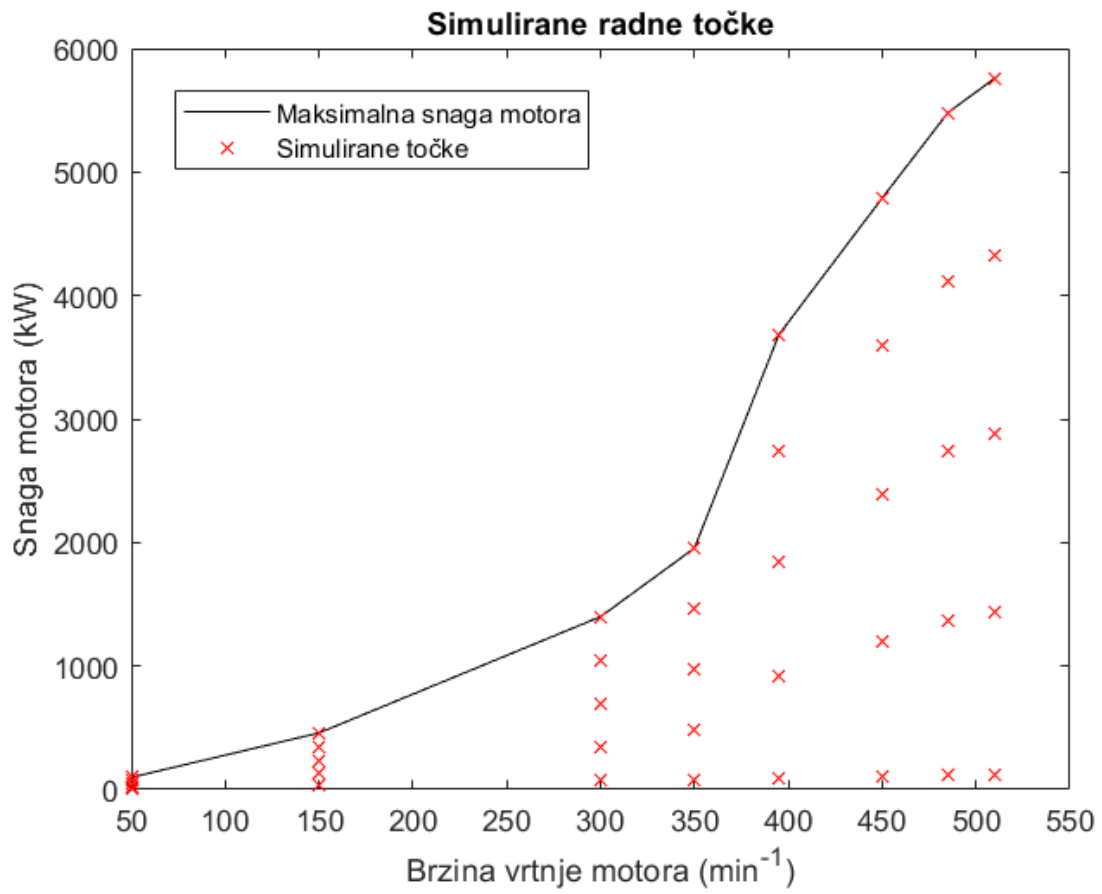


Slika 18. Diskretizirane radne točke

### 7.3. Izrada topografskih dijagrama i očitavanje podataka

Za potrebe prikazivanja i očitavanja podataka dobivenih simulacijom izrađeni su topografski dijagrami. Simulacijom rada motora na 8 različitih brzina vrtnje ( 50 min<sup>-1</sup>, 150 min<sup>-1</sup>, 300 min<sup>-1</sup>, 350 min<sup>-1</sup>, 395 min<sup>-1</sup>, 450 min<sup>-1</sup>, 485 min<sup>-1</sup> i 510 min<sup>-1</sup>) te za 5 različitih opterećenja motora na svakoj od navedenih brzina vrtnje, dobiven je skup podataka pomoću kojih su izrađeni topografski dijagrami u programskom paketu MATLAB.

Radne točke, čije vrijednosti je potrebno očitati, neće se nalaziti točno na simuliranim radnim točkama. U tu svrhu je kod očitavanja podataka korištena funkcija *griddata()* programskog paketa MATLAB koja vrši linearnu interpolaciju između vrijednosti u poznatim točkama. Na slici 19. prikazan je primjer radnih točaka čije su simulacijom dobivene vrijednosti korištene pri interpolaciji.



Slika 19. Simulirane radne točke



## 8. IZRAČUNAVANJE EMISIJA

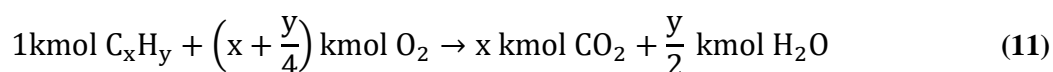
### 8.1. Originalni pogonski sustav broda – dizelsko gorivo

Dizelsko gorivo dobiva se rafinacijom sirove nafte. Smjesa je raznih ugljikovodika s 12 do 20 atoma ugljika u molekuli koje karakterizira veća gustoća i povišene temperature vrenja u odnosu na benzinsko gorivo. Gorivo za Diesel motor treba biti sklono samozapaljenju, a ta se sklonost izražava cetanskim brojem te je ključna za prevenciju udaranja u motoru što je izuzetno štetno.

#### 8.1.1. Emisija ugljikovog dioksida

Emisija ugljikovog dioksida proizlazi iz jednadžbe reakcije izgaranja samog goriva. Iz jednadžbe potpunog izgaranja ugljikovodika može se zaključiti kako sav ugljik iz goriva prelazi u ugljikov dioksid. Tokom proračuna uzima se da je prosječni maseni udio ugljika u dizelskom gorivu  $c_{dizel} = 0,87 \text{ kg/kg}$ . [9]

Reakcija potpunog izgaranja ugljikovodika:



Omjer nastalog CO<sub>2</sub> i potrošenog goriva:

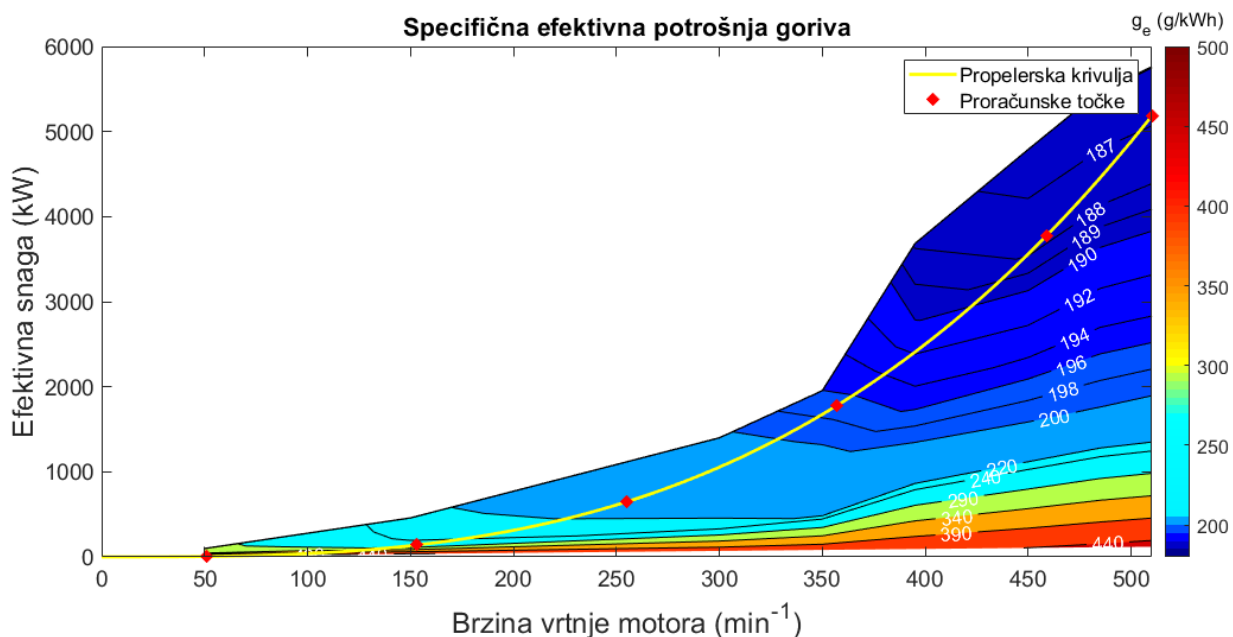
$$CO_2 = \frac{M(CO_2)}{M(C)} \cdot c = \frac{44}{12} \cdot 0,87 = 3,19 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg goriva}} \quad (12)$$

Gdje je:

$M(CO_2) = 44 \text{ kg/kmol}$  – molarna masa ugljikovog dioksida,

$M(C) = 12 \text{ kg/kmol}$  – molarna masa atoma ugljika.

Iz izraza (12) zaključujemo kako je za izračun emisija ugljikovog dioksida potrebno izračunati isključivo potrošnju goriva. Slika 20. prikazuje topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva za originalni pogonski sustav broda.



Slika 20. Specifična efektivna potrošnja goriva, dizelsko gorivo

Linearnim interpoliranjem dobivamo vrijednosti potrošnje u proračunskim točkama:

Tablica 5. Očitane vrijednosti potrošnje goriva

Segment	$g_e$ , g/kWh	Zahtijevana snaga motora, kW	Maseni protok goriva, g/h
1	629.8	5,18	3262,4
2	256.32	139,97	35877,1
3	211.34	648	136948,3
4	196.61	1778,11	349594,2
5	187.85	3779,14	709911,5
$v_{plovidbe} = v_{max} = konst.$	186.83	5184	968526,7

Maseni protok goriva u pojedinom segmentu izračunat je pomoću sljedećeg izraza:

$$\dot{m}_{G,h}^i = g_e^i \cdot P_p^i, \quad (13)$$

gdje je:

$\dot{m}_{G,h}^i$  – maseni protok goriva za  $i$ -ti segment [ $\frac{g}{h}$ ]

$g_e^i$  – specifična efektivna potrošnja goriva za  $i$ -ti segment [ $\frac{g}{kWh}$ ]

$P_p^i$  – potrebna snaga motora za pogon propelera za  $i$ -ti segment [kW]

Naposlijetku, potrebno je iz dobivenih podataka izračunati masu utrošenog goriva po motoru:

$$G^{motor} = 2 \sum_{i=1}^5 \dot{m}_{G,h}^i \cdot t_i + \dot{m}^{v=v_{max}}_{G,h} \cdot t_{v=v_{max}}, \quad (14)$$

gdje je:

$G^{motor}$  – masa utrošenog goriva po motoru za jedan ciklus plovidbe [g],

$t_i$  – trajanje segmenta plovidbe, [h].

Masa utrošenog goriva po motoru iznosi:

$$G^{motor} = 5580,65 \text{ kg} = 5,58 \text{ t}. \quad (15)$$

Kako je motor opremljen s dva pogonska agregata, ukupna masa utrošenog goriva jednaka je:

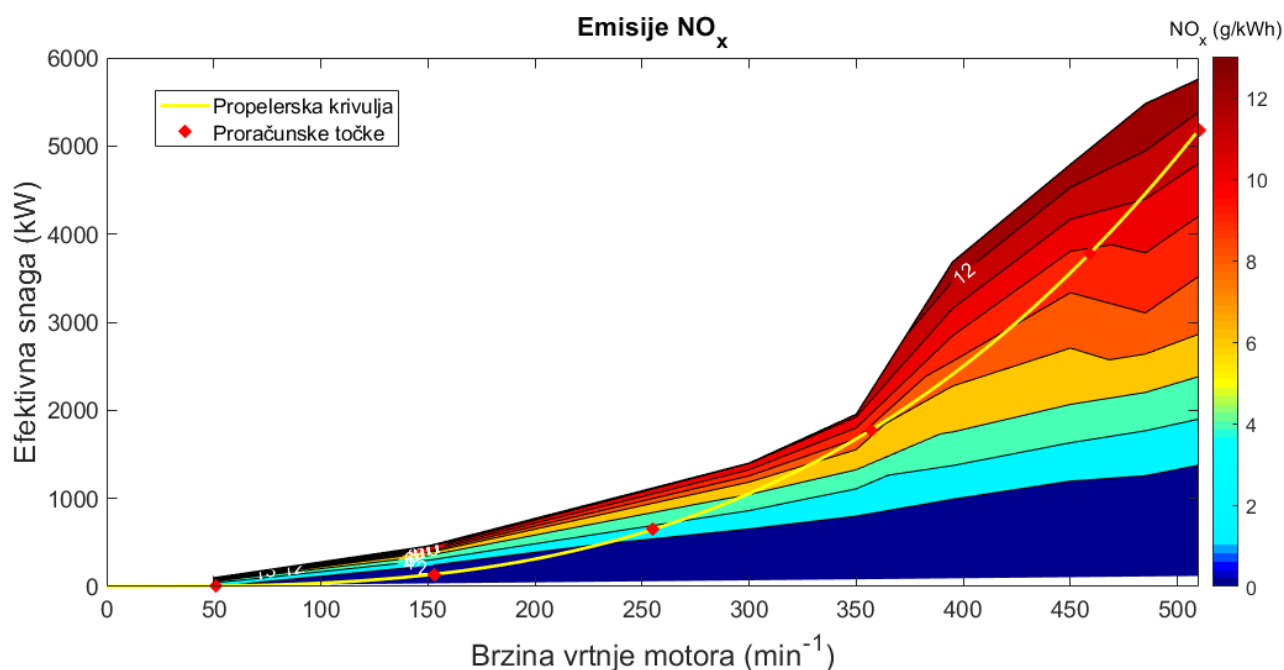
$$G^{uk} = 2 \cdot G^{motor} = 2 \cdot 5580,65 \text{ kg} = 11131,3 \text{ kg} = 11,13 \text{ t}. \quad (16)$$

Ukupno masa emitiranog CO<sub>2</sub> prema (12) iznosi:

$$m_{CO_2}^{uk} = 3,19 \cdot G^{uk} = 3,19 \cdot 11131,3 = 35508,85 \text{ kg} = 35,51 \text{ t}. \quad (17)$$

### 8.1.2. Emisija dušikovih oksida

Slika 21. prikazuje simulacijom dobiveni topografski dijagram emisije dušikovih oksida u odnosu na brzinu vrtnje motora i snagu motora.



Slika 21. Emisije NO<sub>x</sub>, dizelsko gorivo

Segment	$NO_x, \text{g/kWh}$	Zahtijevana snaga, motora, kW	Maseni protok $NO_x, \text{g/h}$
1	2,14	5,18	11,0852
2	0,77	139,97	107,7769
3	5,56	648	3602,88
4	9,21	1778,11	16376,3931
5	9,98	3779,14	37715,8172
$v_{plovidbe} = v_{max} = konst.$	11,65	5184	60393,6

Tablica 6. Emisije  $NO_x$ , dizelsko gorivo

Maseni protok dušikovih oksida u pojedinom segmentu izračunat je pomoću sljedećeg izraza:

$$\dot{m}_{NO_x, h}^i = NO_x^i \cdot P_p^i, \quad (18)$$

gdje je:

$\dot{m}_{NO_x, h}^i$  – maseni protok dušikovih oksida [ $\frac{\text{g}}{\text{h}}$ ] za  $i$ -ti segment,

$NO_x^i$  – emisija dušikovih oksida [ $\frac{\text{g}}{\text{kWh}}$ ] za  $i$ -ti segment,

$P_p^i$  – potrebna snaga motora za pogon propelera [kW] za  $i$ -ti segment.

Naposlijetku, potrebno je iz dobivenih podataka izračunati masu emitiranih dušikovih oksida po motoru:

$$m_{NO_x}^{motor} = 2 \sum_{i=1}^5 \dot{m}_{NO_x, h}^i \cdot t_i + \dot{m}^{v=v_{max}}_{NO_x, h} \cdot t_{v=v_{max}}, \quad (19)$$

gdje je:

$m_{NO_x}^{motor}$  – masa emitiranih dušikovih oksida po motoru za jedan ciklus plovidbe, [g],

$t_i$  – trajanje segmenta plovidbe, [h].

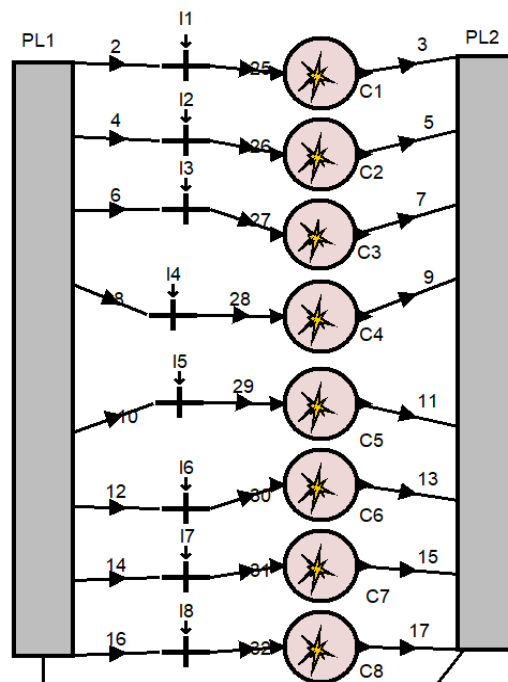
Kako je trajekt opremljen s dva pogonska agregata, ukupna masa emitiranih dušikovih oksida iznosi:

$$m_{NO_x}^{uk} = 2 \cdot m_{NO_x}^{motor} = 2 \cdot 339,01 \text{ kg} = 678,08 \text{ kg} = 0,678 \text{ t}. \quad (20)$$

## 8.2. Prenamjena motora i prilagodba simulacijskog modela na dvogorivni rad

Metanol i vodik kao zasebna goriva prikladnija su za Otto motore zbog svog visokog oktanskog broja te kao takva ne mogu se primjenjivati u motorima s kompresijskim paljenjem kao samostalna goriva. Korištenje navedenih alternativnih goriva moguće je uz paljenje homogene smjese alternativnog goriva i zraka pomoću pilot mlaza dizelskog goriva. Granica do koje je moguće supstituirati dizelsko gorivo određena je pojavama poput nepotpunog izgaranja i udaranja u motoru. Eksperimentalno za sličan motor utvrđena je granica od 80% energetske udjela metanola[12]. Shodno tome biti će provedene simulacije s energetske udjelom alternativnih goriva od 20%, 50% i 80%.

Supstitucija metanolom i vodikom može biti provedena na više načina: mogu biti ubrizgani pod visokim pritiskom direktno u cilindar ili se mogu ubrizgavati u usisnu cijev. S obzirom da ubrizgavanje direktno u cilindar pod visokim tlakom zahtjeva visokotlačnu pumpu i preinake na glavi motora nije pogodno ni s ekonomskog niti logističkog stajališta. Uzevši u obzir prethodno navedeno, ubrizgavanje u usisnu cijev je odabrano te je izvedeno pomoću zasebne brizgaljke ispred svakog cilindra. Slika 22. prikazuje preinaku modela za rad s pomoću brizgaljki.



Slika 22. Prenamjena motora na rad s brizgaljkama

Programski paket AVL BOOST ne posjeduje mogućnost simuliranja istovremenog ubrizgavanja jednog goriva u usisnu cijev, a drugog direktno u cilindar. Dvogorivno izgaranje je temeljem toga simulirano ubrizgavanjem smjese dizelskog goriva i alternativnog goriva isključivo kroz brizgaljke u usisnoj cijevi. Ovim postupkom uvodi se određena greška i prije pokretanja simulacije, no pri visokim udjelima supstitucije većina goriva se ubrizgava kroz brizgaljke u usisnoj cijevi što čini ovu aproksimaciju prihvatljivom.

U simulaciji rada motora s alternativnim gorivom uvedene su pretpostavke da turbopunjač stvara isti tlak nabijanja za pojedine radne točke kao i kod originalnog dizelskog goriva, također su početak izgaranja i trajanje izgaranja zadržani istima. Veličina koja je varirana je parametar oblika  $m$  u Vibe-ovoj funkciji izgaranja koji utječe na brzinu izgaranja goriva, a ovisi o laminarnoj brzini plamena.

Za potrebe danjeg proračuna potrebno je preračunati energetske udio alternativnog goriva u maseni. To je učinjeno pomoću sljedećeg izraza:

$$w_{alt} = \frac{\frac{x_{alt}}{H_{d,alt}}}{\frac{x_{alt}}{H_{d,alt}} + \frac{1-x_{alt}}{H_{d,dizel}}} \quad (21)$$

gdje je:

$w$  – maseni udio,  $[\frac{kg}{kg}]$ ,

$x$  – energetske udio,  $[\frac{kJ}{kJ}]$ ,

$H_{d,metanol} = 21118 \frac{kJ}{kg}$  – donja ogrjevna vrijednost metanola[5],

$H_{d,vodik} = 120000 \frac{kJ}{kg}$  – donja ogrjevna vrijednost vodika[5],

$H_{d,dizel} = 42700 \frac{kJ}{kg}$  – donja ogrjevna vrijednost dizelskog goriva. [7]

Maseni udio ugljika u ukupnoj masi smjese goriva važan je podatak u računanju ugljikovog dioksida nastalog izgaranjem goriva. Primjenom sljedećeg izraza izračunat je maseni udio ugljika za smjese s različitim udjelom supstituiranog dizelskog goriva:

$$c_{smjese} = w_{dizel} \cdot c_{dizel} + w_{alt} \cdot c_{alt}, \quad (22)$$

gdje je:

$c$  – maseni udio ugljika u gorivu,

$w$  – maseni udio goriva u smjesi.

Maseni udio ugljika za pojedina goriva iznosi:  $c_{dizel} = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ ,  $c_{metanol} = 0,375 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$  i  $c_{vodik} = 0 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ . [5]

Donja ogrjevna vrijednost smjese izračunata je sljedećom formulom:

$$H_{d_{smjese}} = w_{dizel} \cdot H_{d_{dizel}} + w_{alt} \cdot H_{d_{alt}}. \quad (23)$$

Stehiometrijski omjer zraka i smjese goriva glasi:

$$Z_{0_{smjese}} = w_{dizel} \cdot Z_{0_{dizel}} + w_{alt} \cdot Z_{0_{alt}}. \quad (24)$$

Stehiometrijska količina zraka za pojedina goriva iznosi:  $Z_{0,dizel} = 15,17$ ,  $Z_{0,metanol} = 6,47$  i  $Z_{0,vodik} = 34,27$ .

Pregled podataka o smjesama goriva s različitim udjelima supstitucije dan je u tablici 7.

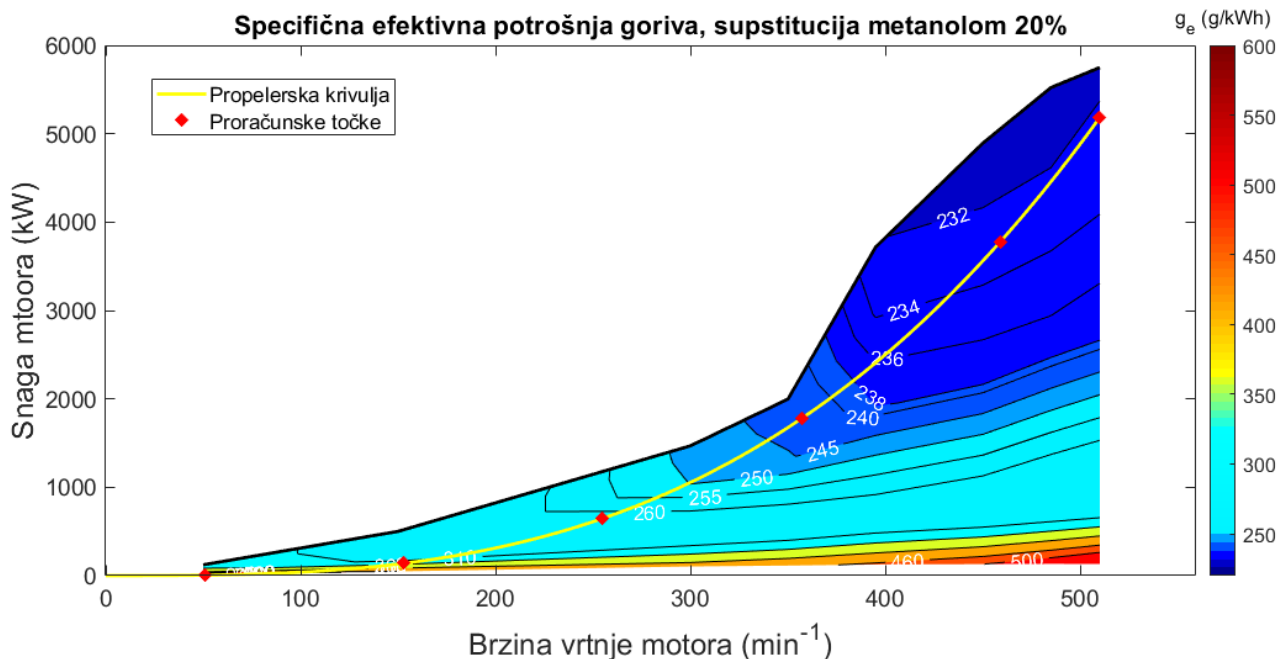
**Tablica 7. Pregled podataka o smjesama goriva**

Alternativno gorivo	Energetski udio alternativnog goriva	Maseni udio alternativnog goriva	Maseni udio ugljika u smjesi	Donja ogrjevna vrijednost smjese $H_d$ , kJ/kg	Stehiometrijska količina zraka, kgZ/kgG
Metanol	20%	33.50%	0.704175	35491	12.255165
	50%	66.20%	0.54231	28454	9.409938
	80%	88.80%	0.43044	23590	7.443512
Vodik	20%	8.17%	0.779	49015	16.7307968
	50%	26.24%	0.642	62984	20.1828896
	80%	58.73%	0.359	88098	26.3897792

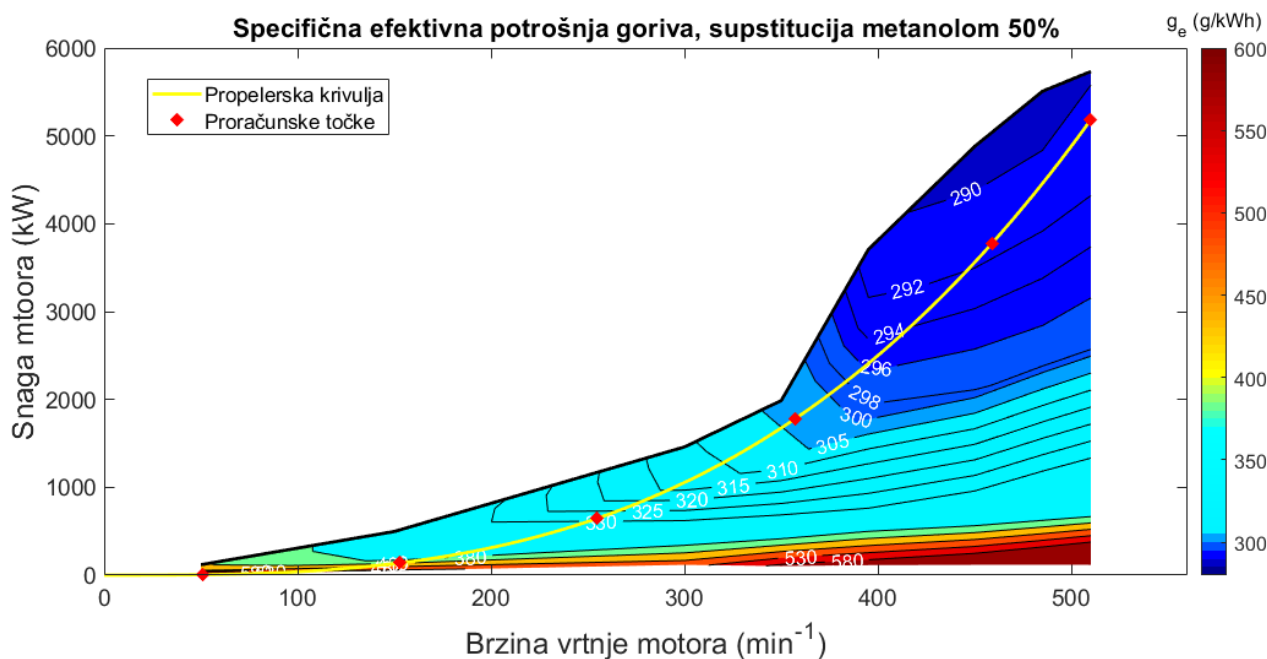
### 8.3. Supstitucija dizelskog goriva metanolom

#### 8.3.1. Emisija ugljikovog dioksida

Nakon provedene simulacije izrađeni su topografski dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva za svaki od navedenog udjela supstitucije. Rezultati su prikazani na slici 23., slici 24. i slici 25. Uočava se porast potrošnje goriva s porastom udjela metanola u ukupnom gorivu što je posljedica manje ogrjevne vrijednosti metanola u odnosu na dizelsko gorivo.

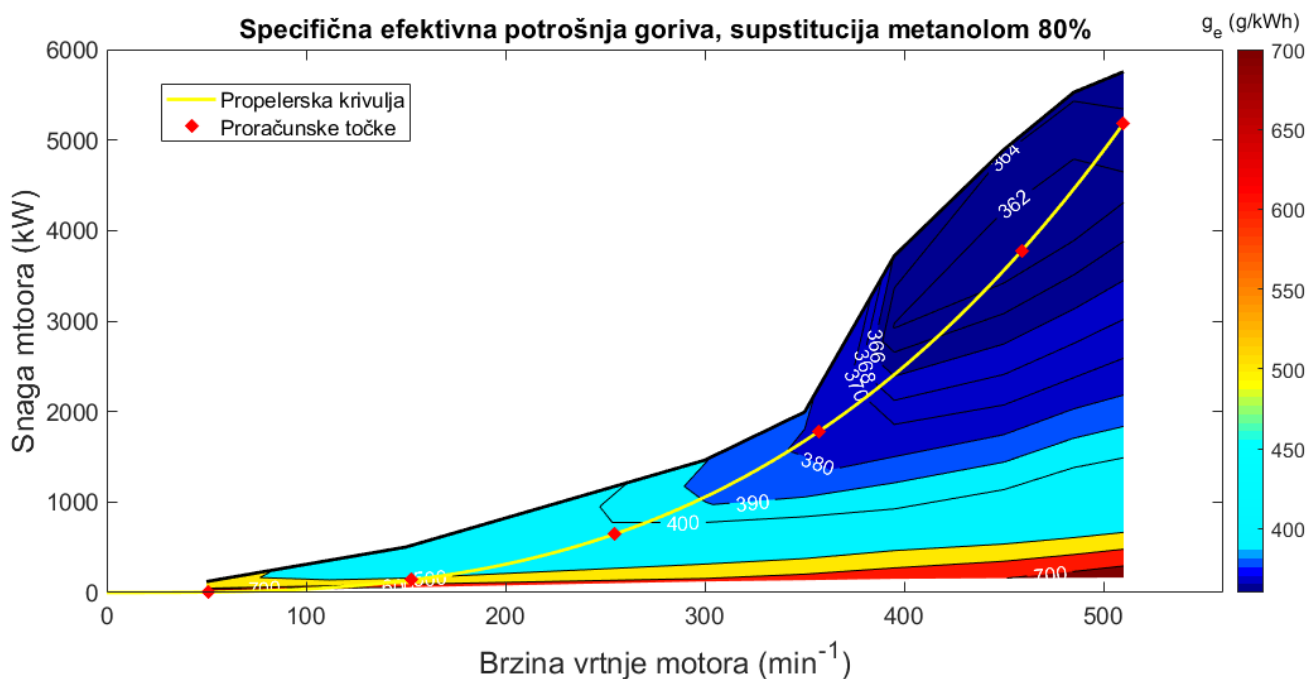


Slika 23. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 20%



Slika 24. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 50%





Slika 25. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija metanolom 80%

Interpolacijom izračunati podaci za pojedine segmente plovnog ciklusa prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Očitavanje potrošnje goriva, supstitucija metanolom

Segment	Zahtijevana snaga motora, kW	Specifična efektivna potrošnja goriva			
		Energetski udio metanola			
		0%	20%	50%	80%
1	5,18	629,8	1159,2	1429,9	1798,9
2	139,97	256,32	344,5	421,7	530
3	648	211,34	266,1	333	413,7
4	1778,11	196,61	242,4	303,6	378,3
5	3779,14	187,85	232,8	291,3	360,6
$v = v_{max} = konst.$	5184	186,83	232,2	290,6	363,5

Prema izrazima (14) i (16) izračunata je ukupna potrošnja goriva za jedan vozni ciklus za svaki od različitih energetske udjela metanola. Rezultati izračuna prikazani su u tablici 9.

**Tablica 9. Utrošak goriva, supstitucija metanolom**

Energetski udio metanola	Ukupno utrošeno goriva, kg
0%	11131,3
20%	13873,44
50%	17361,580
80%	21699,98

Kako je već prema izrazu (12) navedeno, uz pretpostavku potpunog izgaranja postoji direktna korelacije između utrošenog goriva i masenog udjela ugljika u gorivu te mase emitiranog ugljikovog dioksida. Uz izraz (12) iz navedenih podataka moguće je konačno izračunati emisiju ugljikovog dioksida na voznom ciklusu. Rezultati emisija na voznom ciklusu prikazani su u tablici 10.

**Tablica 10. Emisije ugljikovog dioksida, supstitucija metanolom**

Energetski udio metanola	Utrošeno goriva, kg	$c_{smjese}$	Emisija ugljikovog dioksida na ciklusu, kg	Razlika
0%	11131,3	0,87	35508,85	0%
20%	13873,44	0,704	35820,89433	0,88%
50%	17361,58	0,542	34522,98187	-2,78%
80%	21699,98	0,430	34248,65192	-3,55%

Dodavanjem metanola u smjesu goriva uočen je blagi porast emisija ugljikovog dioksida kod 20% energetskog udjela, dok je kod ostalih udjela zabilježen pad emisije ugljikovog dioksida. Detaljnijom analizom rezultata simulacije utvrđeno je blago smanjenje efektivnog stupanja djelovanja za sve udjele supstitucije metanolom. Ovo zapažanje dovodi do zaključka kako bi kod primjene različitih goriva bilo potrebno prilagoditi značajke rada motora npr. trenutak ubrizgavanja goriva za svako gorivo i svaki udio supstituiranog goriva zasebno, odnosno prilagoditi rad motora tako da se postiže najveća iskoristivost goriva.

Danjom analizom kemijskog sastava goriva zaključuje se kako u molekuli metanola ima razmjerno manje atoma ugljika naspram atoma vodika u usporedbi s prosječnim sastavom dizelskog goriva. Kako su ugljik i vodik gorive tvari u sastavu goriva (zanemarujući izgaranje neznatne količine gorivog sumpora), to dovodi do zaključka da izgaranjem metanola razmjerno veći udio energije nastaje zbog izgaranja vodika nego kod dizelskog goriva. Posljedično, uz isti

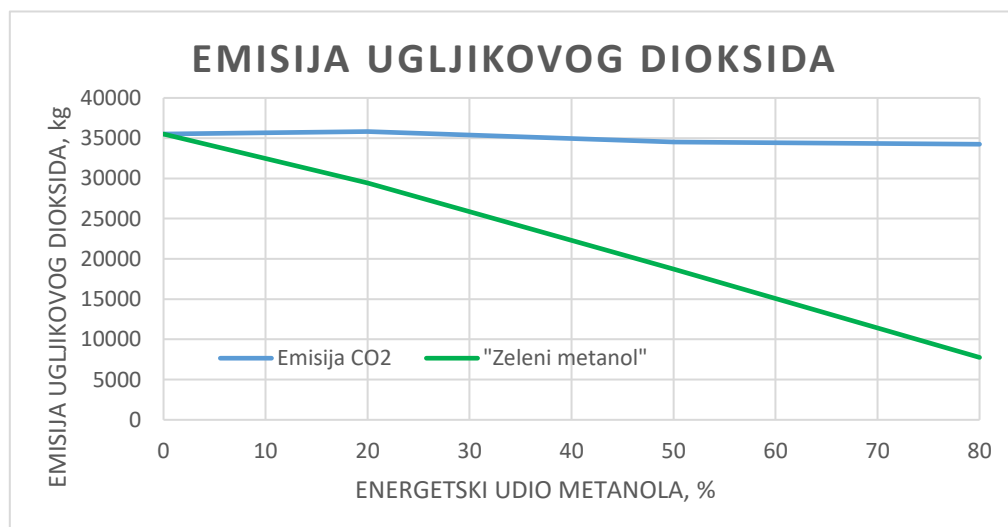
stupanj djelovanja, dodavanje metanola u sadržaj goriva vodi k smanjenju emisije ugljikovog dioksida.

**Tablica 11. Analiza kemijskog sastava metanola i dizelskog goriva [5]**

Gorivo	Maseni udio ugljika, kg/kg	Maseni udio vodika, kg/kg	Omjer, kg ugljika/kg vodika
Metanol	0,375	0,125	3
Dizelsko gorivo	0,87	0,13	6,69

Na slici 26. uz ukupne emisije, prikazana je i krivulja emisija korištenjem tzv. zelenog metanola. Ukoliko metanol nastaje sintetskim putem primjenom energije iz obnovljivih izvora, izgaranje takvog metanola za posljedicu ima nulti otisak ugljikovog dioksida. Na taj način jedino izgaranje dizelskog goriva ulazi u bilancu ugljičnog otiska. Izraz za računanje ugljičnog otiska korištenjem zelenog metanola glasi:

$$m_{\text{CO}_2}^{\text{zeleni metanol}} = m_{\text{dizel}} \cdot \frac{44}{12} \cdot c_{\text{dizel}} = G^{\text{uk}} \cdot w_{\text{dizel}} \cdot \frac{44}{12} \cdot c_{\text{dizel}} \quad (25)$$



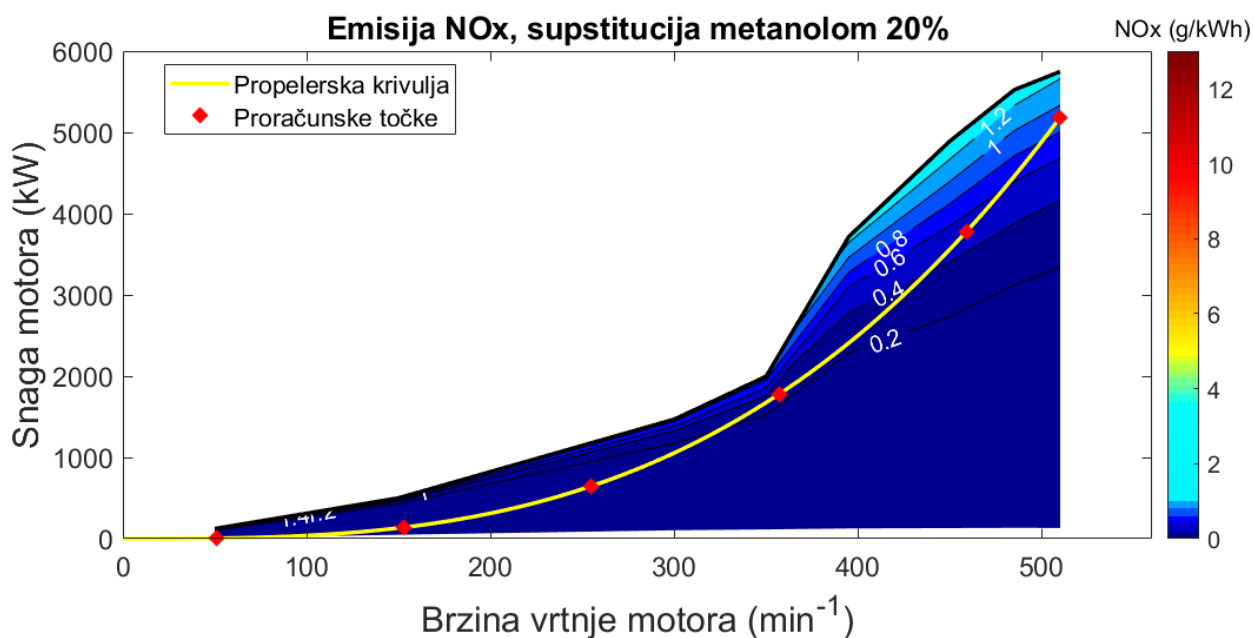
**Slika 26. Utjecaj udjela metanola na emisije ugljikovog dioksida**

**Tablica 12. Emisije ugljikovog dioksida primjenom „zelenog“ metanola**

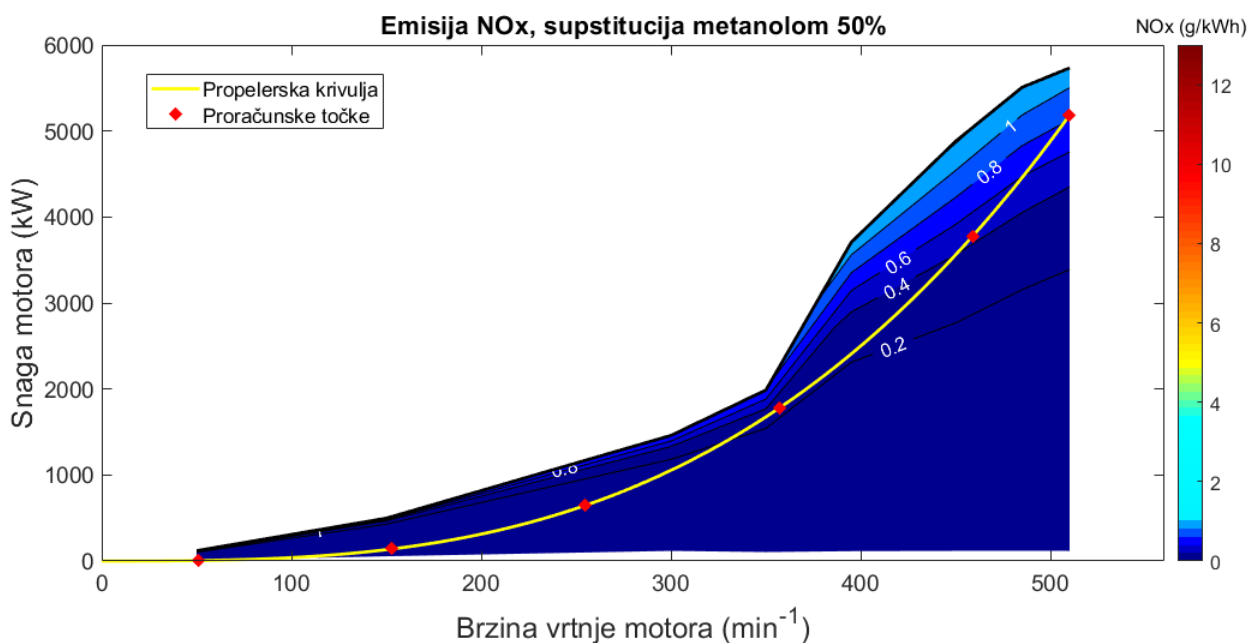
Energetski udio metanola	Emisija ugljikovog dioksida, kg	Emisija CO2 primjenom „zelenog“ metanola, kg	Razlika
0%	35508,85	35508,85	0,00%
20%	35820,89	29430,43	-17,12%
50%	34522,98	18719,60	-47,28%
80%	34248,65	7752,97	-78,17%

### 8.3.2. Emisije dušikovih oksida

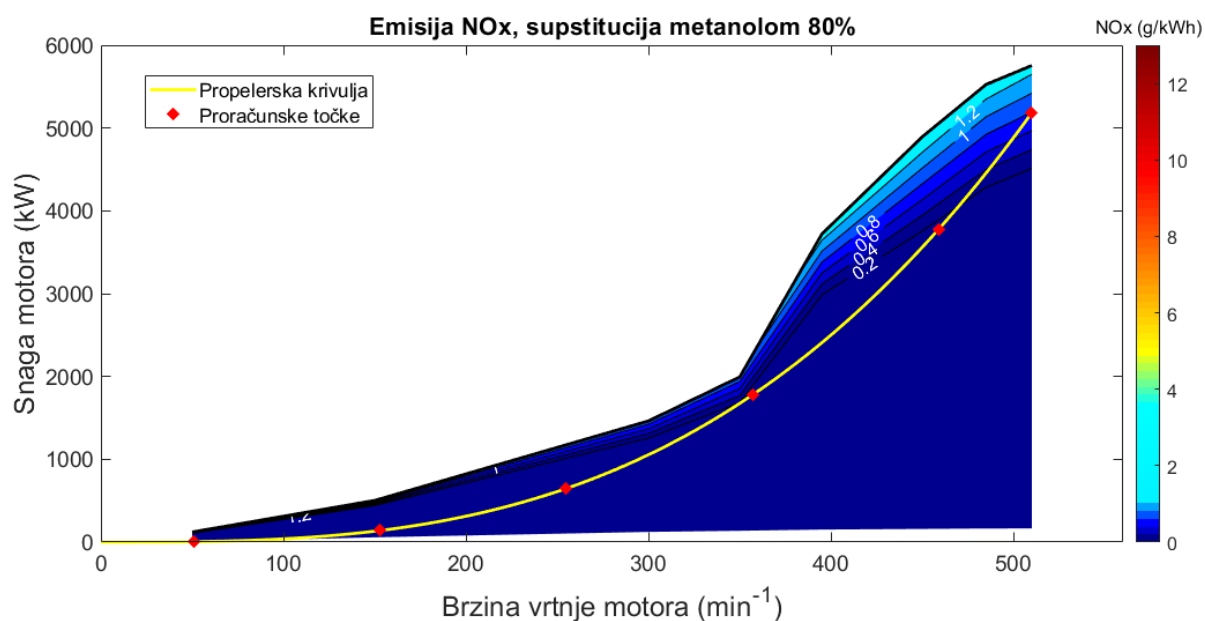
Podaci o emisijama dušikovih oksida koji su dobiveni simulacijama prikazani su u topografskim dijagramima na slici 27., slici 28. i slici 29.



Slika 27. Emisija NO<sub>x</sub>, supstitucija metanolom 20%



Slika 28. Emisija NO<sub>x</sub>, supstitucija metanolom 50%

Slika 29. Emisija NO<sub>x</sub>, supstitucija metanolom 80%

Podaci dobiveni interpolacijom za svaki segment prikazani su u tablici 13.

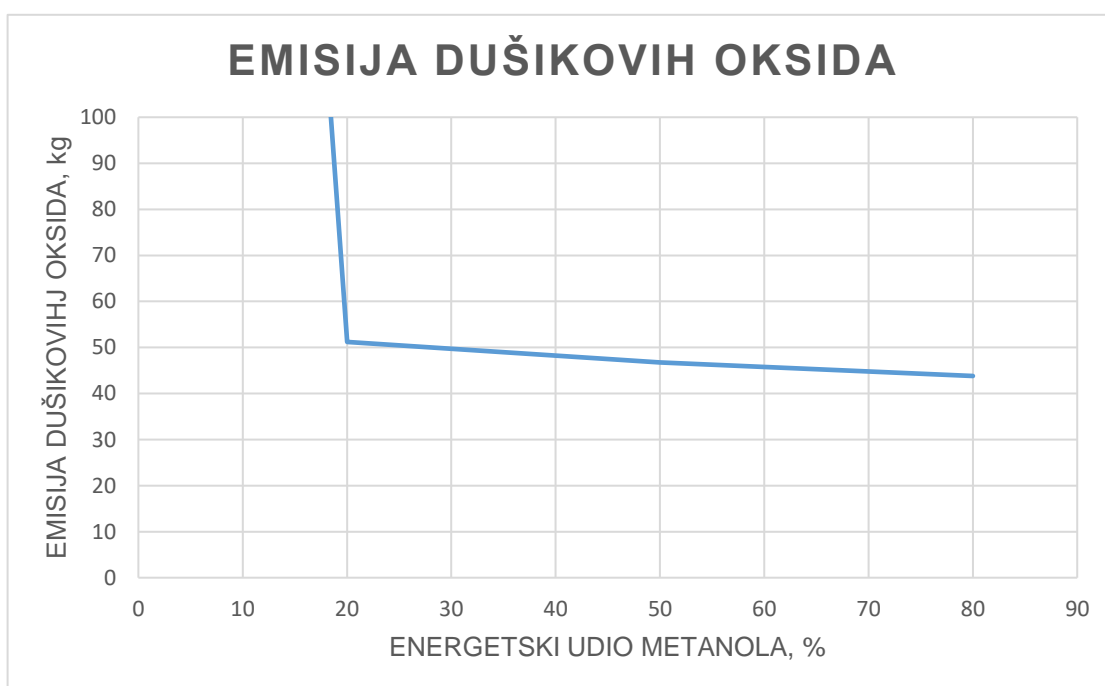
Tablica 13. Očitavanje emisije NO<sub>x</sub>, supstitucija metanolom

Segment	Zahtijevana snaga motora, kW	Emisija NO <sub>x</sub>			
		Energetski udio metanola			
		0%	20%	50%	80%
1	5,18	2,14	0	0	0
2	139,97	0,77	0	0	0
3	648	5,56	0,5141	0,4484	0,5503
4	1778,11	9,21	0,3398	0,3433	0,3583
5	3779,14	9,98	0,4748	0,4306	0,1371
$v = v_{max} = konst.$	5184	11,65	0,9078	0,8285	0,7914

Iz dobivenih podataka pomoću izraza (18), (19) i (20) izračunate su vrijednosti emisija NO<sub>x</sub> na voznom ciklusu. Rezultati su prikazani u tablici 14. i dijagramski na slici 30.

**Tablica 14. Ukupne emisije dušikovih oksida, supstitucija metanolom**

Energetski udio metanola	Emisija NO <sub>x</sub> , kg	Razlika
0%	678,08	0
20%	51,178	-92,45%
50%	46,740	-93,11%
80%	43,804	-93,53%

**Slika 30. Utjecaj udjela metanola na emisije dušikovih oksida**

## 8.4. Supstitucija dizelskog goriva vodikom

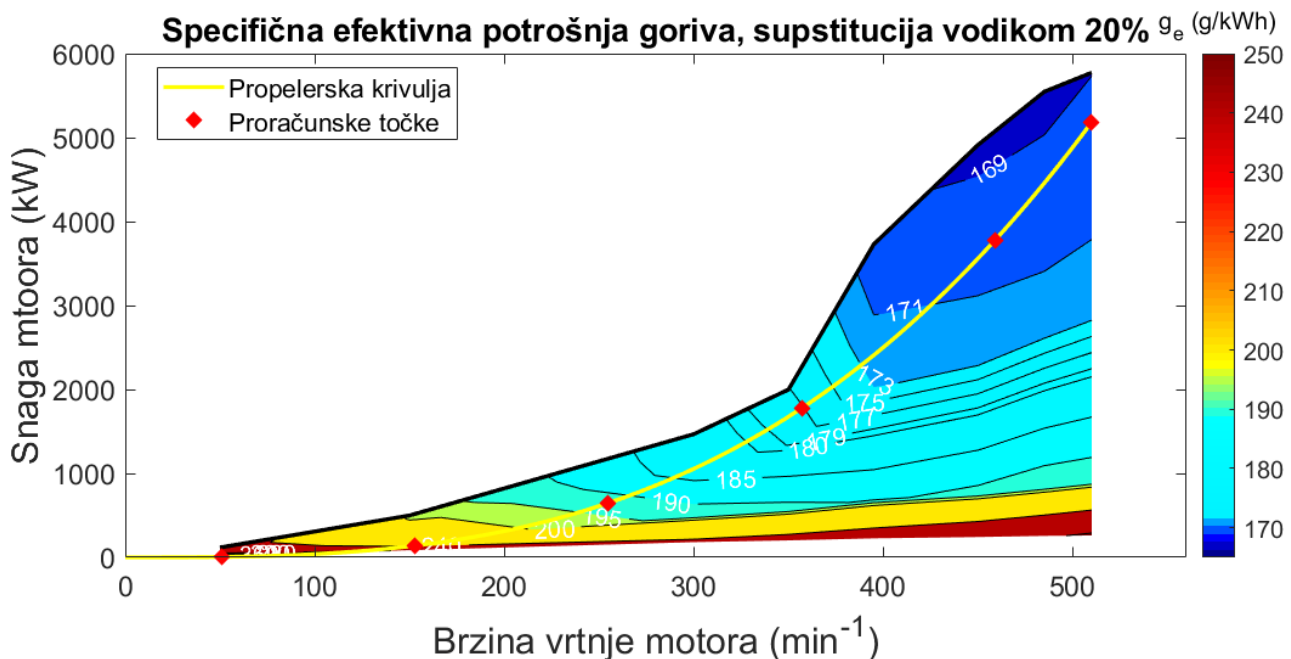
Vodik je gorivo s nultim udjelom ugljika u svome sastavu, a kako je izgaranje ugljika odgovorno za stvaranje ugljikovih oksida, lako se zaključuje da je jedna od glavnih prednosti vodika njegovo „čisto izgaranje“, odnosno izgaranjem vodika nastaje isključivo voda (vodena para). Reakcija izgaranja vodika:



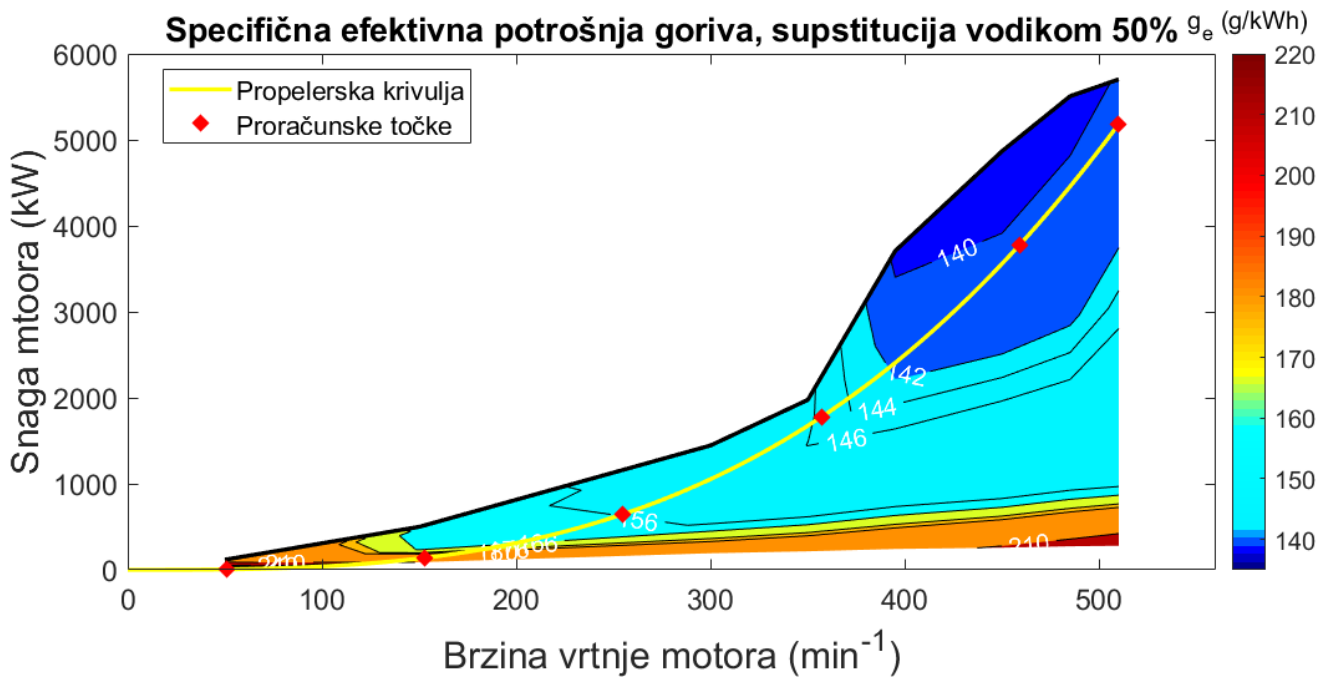
Važno je napomenuti da iako vodik u svome sastavu ne sadrži ugljik, njegov ugljični otisak nije nužno jednak nuli. Za dobivanje vodika kao goriva potrebna je energija. Ukoliko je ta energije dobivena iz obnovljivih izvora, vrijedi pretpostavka o nultom otisku CO<sub>2</sub>.

### 8.4.1. Emisija ugljikovog dioksida

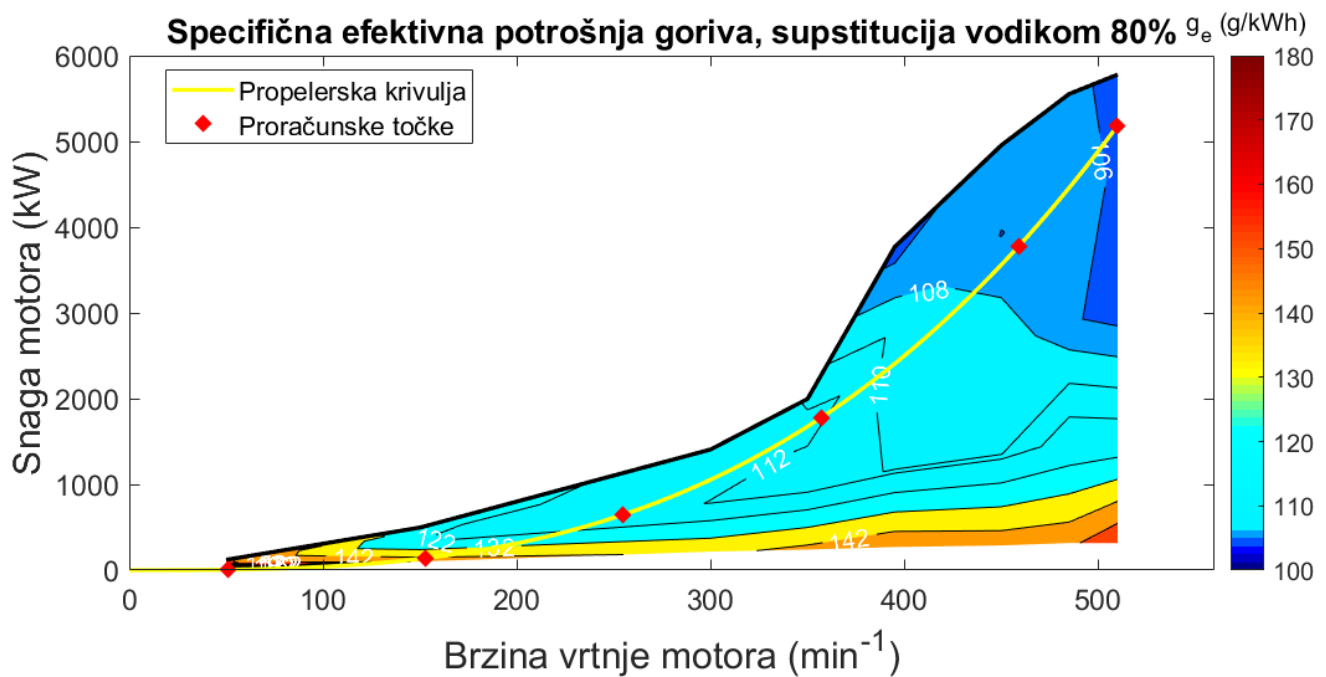
Topografski dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva za različite energetske udjele vodika prikazani su na slici 31., slici 32. i slici 33. Uočava se smanjenje potrošnje goriva povećanjem udjela vodika u smjesi što je posljedica otprilike tri puta veće ogrjevne vrijednosti vodika naspram dizelskom gorivu.



Slika 31. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 20%



Slika 32. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 50%



Slika 33. Specifična efektivna potrošnja goriva, supstitucija vodikom 80%



Vrijednosti potrošnje za pojedine segmente plovnog ciklusa, koje su dobivene interpolacijom, prikazane su u tablici 15.

**Tablica 15. Očitavanje potrošnje goriva, supstitucija vodikom**

Segment	Zahtijevana snaga motora, kW	Specifična efektivna potrošnja goriva, g/kWh			
		Energetski udio vodika			
		0%	20%	50%	80%
1	5,18	629,8	753,12	603,12	463,12
2	139,97	256,32	236,66	192,75	143,16
3	648	211,34	192,73	157,29	119,24
4	1778,11	196,61	177,06	24,5,19	112,39
5	3779,14	187,85	169,99	140,87	105,82
$v = v_{max} = konst.$	5184	186,83	169,47	140,18	105,73

Prema izrazima (13), (14) i (16) ukupna količina utrošenog goriva tokom plovnog ciklusa glasi:

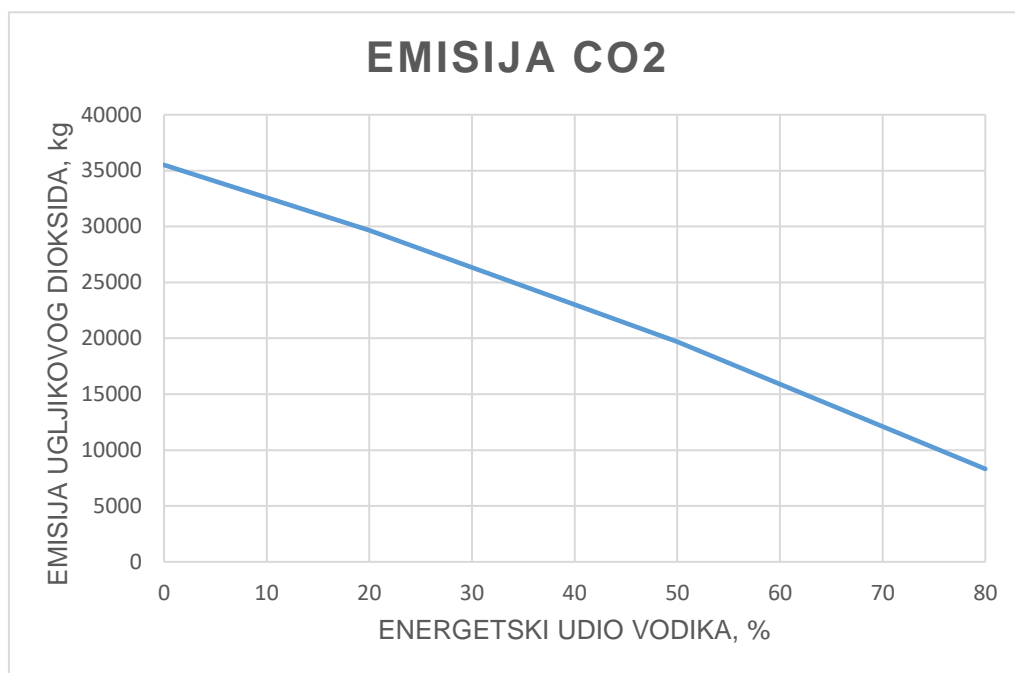
**Tablica 16. Utrošak goriva, supstitucija vodikom**

Energetski udio vodika	Utrošeno goriva, kg
0%	11131,3
20%	10122,79
50%	8371,32
80%	6316,83

Uz navedene podatke pomoću izraza (12) moguće je izračunati emisiju ugljikovog dioksida za jedan plovidni ciklus. Rezultati su prikazani u tablici 17. i na slici 34.

**Tablica 17. Emisije ugljikovog dioksida, supstitucija vodikom**

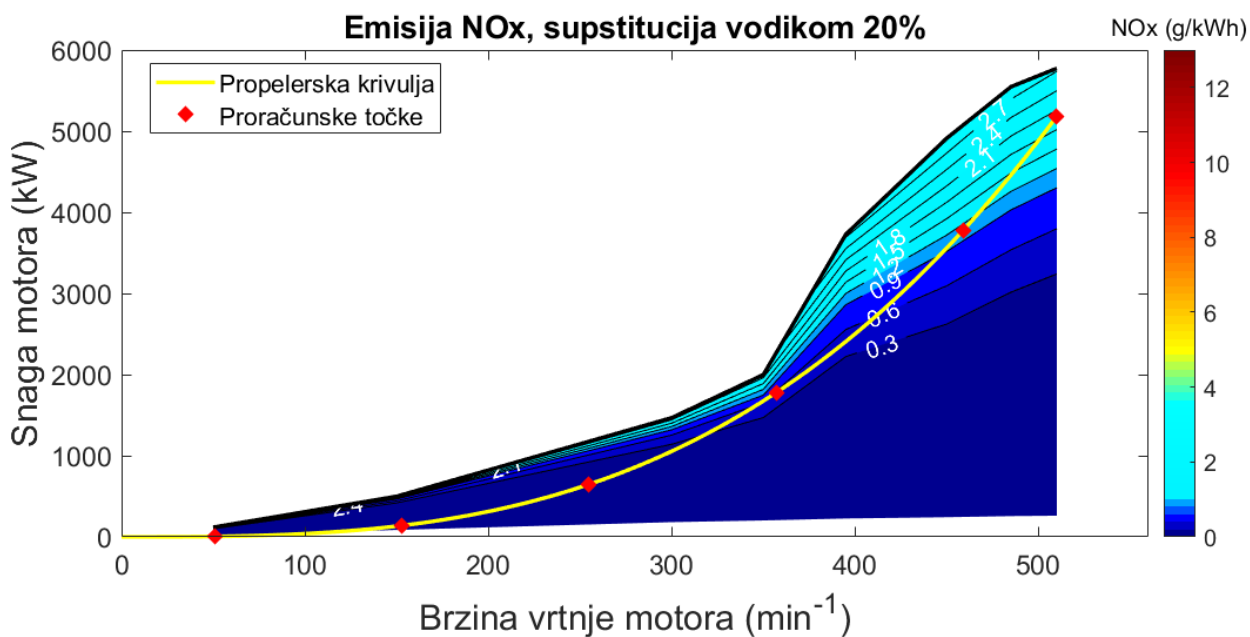
Energetski udio vodika	Utrošeno goriva, kg	$c_{smjese}$	Emisija ugljikovog dioksida na ciklusu, kg	Razlika
0%	11131,3	0,87	35508,85	0%
20%	10122,79	0,799	29653,48	-16,49%
50%	8371,32	0,642	19697,27	-44,53%
80%	6316,83	0,359	8316,19	-76,58%



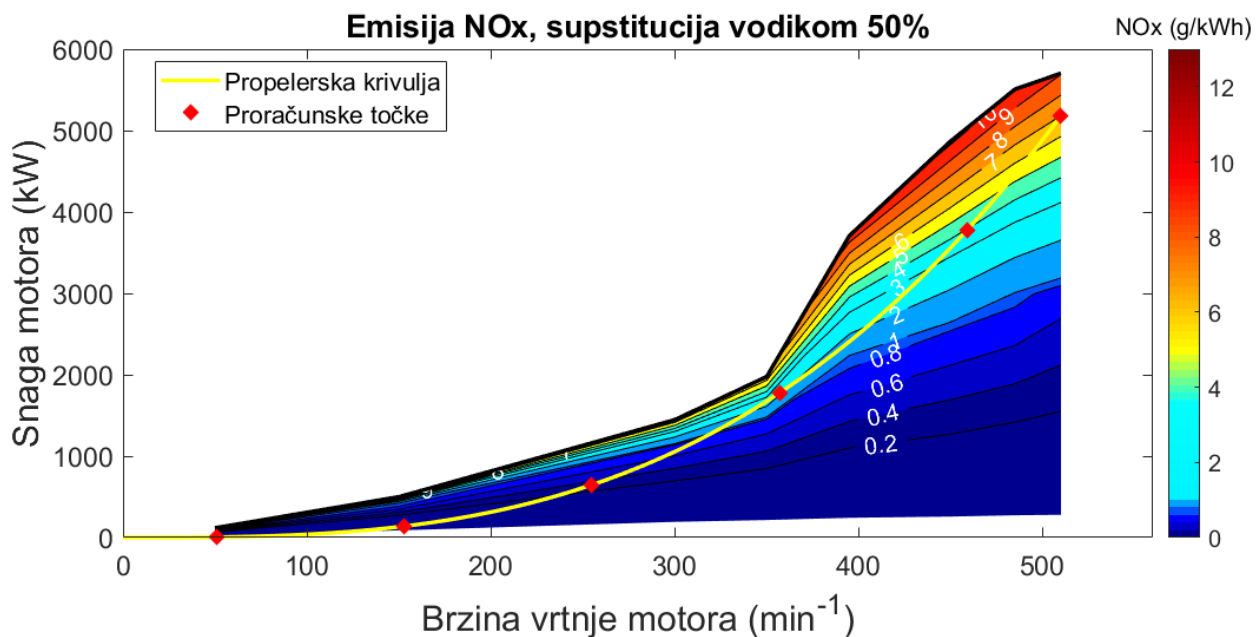
Slika 34. Utjecaj udjela vodika na emisije ugljikovog dioksida

#### 8.4.2. Emisija dušikovih oksida

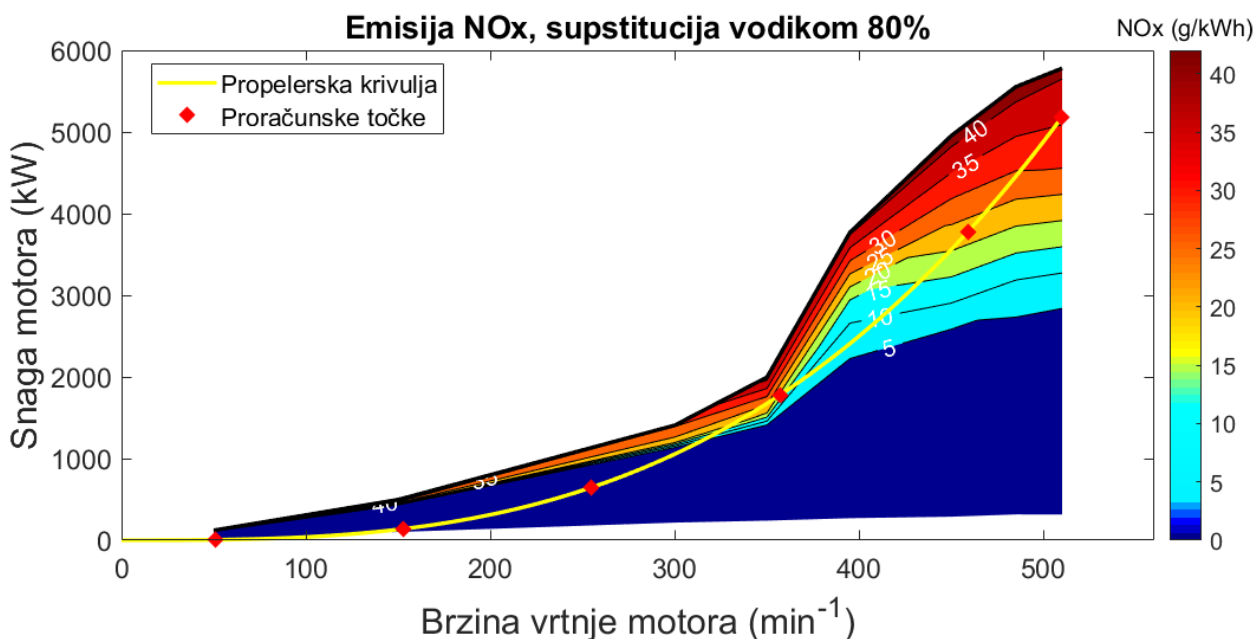
Topografski dijagrami emisije dušikovih oksida za različite energetske udjele vodika prikazani su na slici 35., slici 36. i slici 37.



Slika 35. Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 20%



Slika 36. Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 50%



Slika 37. Emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom 80%

Očitane emisije dušikovih oksida za svaki segment plovnog ciklusa prikazane su u tablici 18.

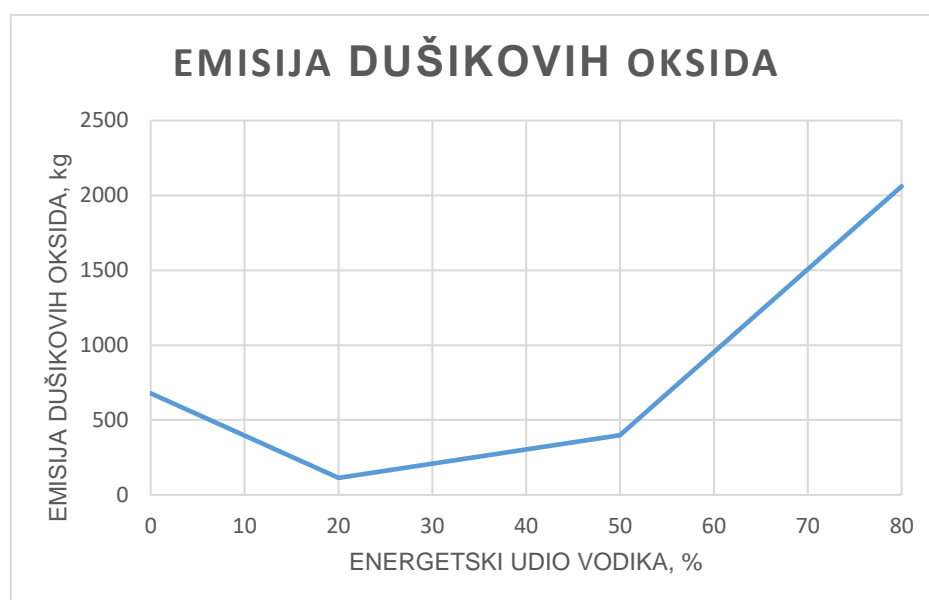
**Tablica 18. Očitanje emisije dušikovih oksida, supstitucija vodikom**

Segment	Zahtijevana snaga motora, kW	Emisija NO <sub>x</sub> , g/kWh			
		Energetski udio vodika			
		0%	20%	50%	80%
1	5,18	2,14	0	0	0
2	139,97	0,77	0	0	0,0045
3	648	5,56	1,256	5,5395	15,77
4	1778,11	9,21	0,732	2,40	30,10
5	3779,14	9,98	1,151	4,23	22,80
$v = v_{max} = konst.$	5184	11,65	2,005	7,01	35,85

Iz dobivenih podataka pomoću izraza (18), (19) i (20) izračunate su vrijednosti emisija NO<sub>x</sub> na voznom ciklusu. Rezultati su prikazani tablično u tablici 19. i dijagramski na slici 38.

**Tablica 19. Ukupna emisija dušikovih oksida, supstitucija vodikom**

Energetski udio vodika	Emisija NO <sub>x</sub> , kg	Razlika
0%	678,08	0%
20%	113,45	-83,27%
50%	397,84	-41,33%
80%	2060,70	303,9%

**Slika 38. Utjecaj udjela vodika na emisije dušikovih oksida**

## 9. ZAKLJUČAK

Provedenom analizom i kalibriranjem modela motora prema podacima od proizvođača određene su značajke emisija na reprezentativnom voznom ciklusu. S ciljem smanjenja emisija štetnih tvari simuliran je rad motora s dvogorivnim izgaranjem u kojem se promjenjivi udio dizelskog goriva supstituirao metanolom i vodikom. Prvi problemi javljaju se kod ubrizgavanja alternativnog goriva u motor, poželjno je da preinake na motoru budu što manje i ekonomski povoljnije. Kao najprihvatljivija metoda odabrana je preinaka motora dodavanjem brizgaljki za alternativno gorivo u usisnu granu prije svakog cilindra.

Primjenom metanola u relativno niskim udjelima ostvarena je značajna redukcija u emisijama dušikovih oksida. Energetskim udjelom metanola u gorivu od samo 20% smanjena je emisija  $\text{NO}_x$  za čak 92%. Danjim povećanjem energetskog udjela metanola do 80% emisije se dodatno smanjuju na 6,47% emisija originalnog pogonskog sustava. Zabilježen je blagi porast emisija ugljikovog dioksida kod energetskog udjela metanola od 20%, dok je za ostale udjele očitani polagani pad emisija  $\text{CO}_2$  ispod razina prisutnih kod originalnog pogona. Kod 80% energetskog udjela smanjenje ukupnih emisija ugljikovog dioksida iznosi 3,55%. Ukoliko je metanol sintetiziran primjenom obnovljivih izvora energije („zeleni metanol“), njegov ugljični otisak postaje nula. Primjenom takvog metanola jedino izgaranje dizelskog goriva utječe na nastajanje  $\text{CO}_2$  te je kod energetskog udjela metanola od 80% izračunato smanjenje emisija ugljikovog dioksida za 78,17%.

Vodik kao gorivo nije dostupno u prirodi nego se proizvodi sintetskim putem. Iako u svome sastavu ne sadrži ugljik, njegov nulti ugljični otisak je opravdano uvažiti ako se prilikom sinteze koristila energija iz obnovljivih izvora. Primjenom vodika smanjene su emisije  $\text{CO}_2$  za sve energetske udjele s maksimumom za 80% energetskog udjela kod kojeg je zabilježeno smanjenje za 76,58%. Emisije dušikovih oksida pokazuju značajnu ovisnost o supstituiranom udjelu dizelskog goriva. Primjenom vodika u 20%-om energetskom udjelu smanjene su emisije  $\text{NO}_x$  za 83%, dok danjim povećanjem udjela vodika dolazi do povećanja emisija koje dosežu 304% vrijednosti originalnog pogona.

Prilikom izrade modela i simuliranjem rada motora s alternativnim gorivima određene karakteristike izgaranja i parametri bili su prilagođeni vrsti goriva, dok su određeni zadržani istima što uvodi određenu grešku u startu. U daljnjoj analizi potrebno bi bilo detaljnije poznavati karakteristike izgaranja određenog goriva i model sukladno kalibrirati. Pokazana je važnost pravilnog odabira udjela supstituiranog goriva kako motor ne bi emitirao više štetnih tvari nego primjenom isključivo dizelskog goriva.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.jadrolinija.hr/hr/novost/najveci-brod-u-povijesti-jadrolinije-stigao-u-hrvatsku> (datum pristupa: 8.2.2025.)
- [2] <https://www.jadrolinija.hr/hr/flota-brod/dalmacija> (datum pristupa: 8.2.2025)
- [3] <https://www.shipsnostalgia.com/media/wartsila-sulzer-8za40s.425274/> (datum pristupa: 8.2.2025.)
- [4] <https://www.avl.com/en/about-avl> (datum pristupa: 10.2.2025.)
- [5] AVL BOOST<sup>TM</sup> – version 2013.2., Users Guide and Theory
- [6] Weisser, G.: Modelling of Combustion and Nitric Oxide Formation for Medium-Speed DI Diesel Engines: A Comparative Evaluation of Zero– and Three–Dimensional Approaches, 2001
- [7] Sulzer ZA40S, Engine Selection and Project Manual, Wärtsilä NSD, 1999.
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL\\_73/78](https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL_73/78) (datum pristupa: 10.2.2025.)
- [9] Mahalec, I., Lulić, Z., Kozarac, D.: Motori s unutarnjim izgaranjem, FSB, Zagreb, 2016.
- [10] <https://www.ferrycroatia.com/hr/dubrovnik-bari/> (datum pristupa: 9.2.2025.)
- [11] <https://www.dubrovnik-online.net/english/dubrovnik-bari-italy-ferry.php> (datum pristupa: 19.2.2024.)
- [12] Dierickx, J., Verbiest, J., Janvier, T., Peeters, J., Sileghem L., Verhelst S.: Retrofitting a high-speed marine engine to dual-fuel methanol-diesel operation: A comparison of multiple and single point methanol port injection, Ghent University, Belgium, Lund University, Sweden, 2021.