

# Analiza radnih karakteristika brodskog motora na dvojno gorivo

---

**Bulat, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:084445>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)




**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**DOMAGOJ BULAT**

**ANALIZA RADNIH KARAKTERISTIKA  
BRODSKOG MOTORA NA DVOJNO  
GORIVO**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2021.**

	<b>POMORSKI FAKULTET U SPLITU</b>	STRANICA: ŠIFRA:	1/1 F05.1.-DZ
	<b>DIPLOMSKI ZADATAK</b>	DATUM:	21.09.2021.

SPLIT, 21.09.2021

ZAVOD/STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

PREDMET: UPRAVLJANJE BRODSKIM MOTORIMA

### *DIPLOMSKI ZADATAK*

STUDENT/CA: DOMAGOJ BULAT

MATIČNI BROJ: 0023110124

ZAVOD/STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

#### **ZADATAK:**

**ANALIZA RADNIH KARAKTERISTIKA BRODSKOG MOTORA NA DVOJNO GORIVO**

#### **OPIS ZADATKA:**

**OBRADITI BRODSKE MOTORE NA DVOJNO GORIVO. PROUČITI ALTERNATIVNA GORIVA. IZVRŠITI ANALIZU RADA SPOKRETNOG DVOTAKTNOG BRODSKOG MOTORA S ALTERNATIVNIM GORIVIMA I DOBIVENE REZULTATE SIMULACIJE USPOREDITI SA RADNIM KARAKTERISTIKAMA DIZELSKOG MOTORA. KOMENTIRATI REZULTATE I IZVESTI ZAKLJUČKE OBZIROM NA EFIKASNOST I EMISIJE.**

#### **CILJ:**

**ANALIZA KARAKTERISTIKA BRODSKOG SPOKRETNOG DVOTAKTNOG DIZELSKOG MOTORA NA RAZLIČITA ALTERNATIVNA GORIVA I USPOREDBA SA MOTOROM NA DIZELSKO GORIVO.**

ZADATAK URUČEN STUDENTU/CI: 28.01.2021.

POTPIS STUDENTA/CE: \_\_\_\_\_

MENTOR: \_\_\_\_\_

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**ANALIZA RADNIH KARAKTERISTIKA  
BRODSKOG MOTORA NA DVOJNO  
GORIVO**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**Prof. dr. sc. Gojmir Radica**

**STUDENT:**

**Domagoj Bulat  
(MB:0023110124)**

**SPLIT, 2021.**

## SAŽETAK

Ovaj rad analizira različita alternativna goriva u procesu rada dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora. Alternativna goriva koja su korištena u radu su redom: LNG (metan), vodik i smjese vodika i dizela, smjesa dizela i metanola te smjesa amonijaka i vodika. Numeričke simulacije performansi dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora odrađene su unutar programa AVL Boost. Korišten je više-zonski model izgaranja jer on jedini daje rezultate emisija štetnih plinova. Cilj rada bio je postići rezultate koji zadovoljavaju IMO *Tier III* regulaciju. Postignuti su zadovoljavajući rezultati korištenjem svih alternativnih goriva, smanjena je koncentracija NO<sub>x</sub>-a u ispušnim plinovima ispod 3,4 g/kWh. Model je validiran s mjerenjima dobivenim ispitivanjem motora na dizelsko gorivo (MDO).

**Ključne riječi:** *dvotaktni sporokretni dizelski motor, alternativna goriva, simulacije, IMO Tier III.*

## ABSTRACT

This paper analyses different alternative fuels in the working process of two-stroke low speed diesel engine. Alternative fuels that were used in the paper are: LNG i.e., methane, hydrogen and hydrogen diesel blends, methanol diesel blend and ammonia hydrogen blend. Numerical simulations of two-stroke low speed diesel engine performance were done using AVL Boost. Multi zone combustion model was used because it is the only one that gives the results of exhaust emissions. The goal of this paper was to achieve results that satisfy IMO *Tier III* regulations. All alternative fuels achieve satisfying results, the concentration of NO<sub>x</sub> in exhaust gasses is decreased under 3,4 g/kWh. The model is validated with the measurements taken from engine testing that ran on marine diesel oil (MDO).

**Keywords:** *two-stroke low speed diesel engine, alternative fuels, simulations, IMO Tier III.*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MARPOL</b> .....	<b>5</b>
2.1.1. Prilog I .....	5
2.1.2. Prilog II.....	5
2.1.3. Prilog III .....	6
2.1.4. Prilog IV.....	6
2.1.5. Prilog V .....	7
2.1.6. Prilog VI.....	7
<b>3. MARPOL PRILOG VI</b> .....	<b>8</b>
3.1. REGULATIVA 13 .....	8
3.1.1. <i>NOx Technical Code (2008)</i> .....	9
3.2. REGULATIVA 14 .....	9
<b>4. IZGARANJE U DVOTAKTNIM DIZELSKIM MOTORIMA</b> .....	<b>12</b>
<b>5. DVOTAKTNI MOTORI NA DVOJNO GORIVO</b> .....	<b>14</b>
<b>6. ALTERNATIVNA GORIVA</b> .....	<b>18</b>
6.1. METAN.....	18
6.2. VODIK.....	18
6.3. METANOL.....	18
6.4. AMONIJAK .....	19
<b>7. SIMULACIJSKI MODEL</b> .....	<b>20</b>
7.1. AVL VIŠE-ZONSKI MODEL IZGARANJA (AVLMZCM).....	21
7.2. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA.....	21
7.3. VALIDACIJA MODELA .....	46
7.4. MIJENJANJE VRSTE GORIVA .....	48
<b>8. OPTIMIZACIJA I KOMENTAR DOBIVENIH REZULTATA SIMULACIJA</b> .....	<b>50</b>
8.1. REZULTATI ALTERNATIVNIH GORIVA .....	51
8.2. REZULTATI SMJESA VODIKA I DIZELA.....	54
8.3. USPOREDBA SMJESE DIZELA I METANOLA S DIZELOM I VODIKOM.....	56

<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>59</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>60</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>62</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>65</b>

# 1. UVOD

Oko 80% svjetskog transporta sirovinama obavlja se brodovima.[1] Velika većina tih brodova još uvijek je pokretana dizelskom propulzijom. Razlog tome je što su sporokretni dvotaktni dizelski motori najučinkovitiji motori koji se mogu ugraditi na brodove. Oni postižu vrijednosti do 50 %.[2] U novije vrijeme sve se više ugrađuju motori na dvojno gorivo, što znači da se osim dizela u cilindar mogu ubacivati i druge vrste goriva, kao što je ukapljeni prirodni plin LNG, vodik, metanol, itd. Ta druga goriva još se nazivaju i alternativna goriva.[4] Razlog razvijanja tehnologije korištenja alternativnih goriva osim dizela je u tome što Međunarodna Pomorska Organizacija IMO želi smanjiti ispuštanje stakleničkih plinova s brodova za 50% do 2050. godine i smanjenje ispuštanja CO<sub>2</sub> za 40% do 2030., pa sve do 70% do 2050. godine.[3] Jedan od značajnijih uzročnika stakleničkih plinova su dušikovi oksidi NO<sub>x</sub>. U cilju smanjenja koncentracije NO<sub>x</sub>-a u ispušnim plinovima dizelski pogonjenih motora, IMO je još 1997. godine napravio *NO<sub>x</sub> Technical Code* koji je u sklopu MARPOL 73/78 pod aneksom VI. U srpnju 2005. godine je odlučeno revidirati *NO<sub>x</sub> Technical Code*, što je završeno u listopadu 2008. godine.[5] Trenutno se kontrola NO<sub>x</sub>-a na svjetskoj razini provodi korištenjem IMO *Tier II* za otvoreno more i IMO *Tier III* za *Emission Control Area* ECA zone.[25] O tome ćemo detaljnije reći u sljedećem poglavlju.

Alternativna goriva izuzetno su važna za daljnji razvoj motora, jer bez njih teško će se postići željeni učinci za smanjenjem stakleničkih plinova.

Md Arman Arefin, Md Nurun Nabi, Md Washim Akram, Mohammad Towhidul Islam i Md Wahid Chowdhury [7] ušli su u detalje za korištenje LNG-a kao goriva u različitim motorima. Također su se uhvatili problema skladištenja LNG-a jer se ono mora skladištiti pri jako niskim temperaturama. Ali su došli do zaključka da je LNG trenutno najbolje gorivo i da će se početi sve više i više koristiti u svijetu. Congbiao Sui, Peter de Vos, Douwe Stapersma, Klaas Visser i Yu Ding [8] u članku objavljenom u *Journal of Marine Science and Engineering* govore o korištenju hibridne propulzije i LNG-a kao alternativnog goriva u cilju smanjenja emisija s brodova. Koristeći tanker za prijevoz kemikalija ispitali su korištenje teškog dizelskog goriva (HFO) naspram lakog dizelskog goriva (MDF) i LNG-a. Ustanovili su da se korištenjem LNG-a smanjuje ispuštanje CO<sub>2</sub> za 25,8% naspram HFO i 25% naspram MDF, te se smanjuju ispuštanja NO<sub>x</sub>-a do 80% naspram MDF, a sam MDF ima manja ispuštanja za 17% naspram HFO. Dimitiou P. i



Tsujimura T. [9] napisali su rad u kojem je opisan vodik kao alternativno gorivo u dizelskom ciklusu, točnije korištenje vodika u motorima sa kompresijskim izgaranjem. Došli su do zaključka da je vodik gorivo koje je moguće koristiti u motorima sa kompresijskim izgaranjem ali je jako teško postići dovoljnu kompresiju za samozapaljenje vodika. Ali to se može riješiti korištenjem žarnice (*glow plug*) ili korištenjem male količine dizela kako bi se postiglo samozapaljenje. Još jedan problem vodika je što daje velike količine NO<sub>x</sub>-a u ispuhu pri određenim temperaturama, pa se treba posebno paziti pri kojem opterećenju radi motor. Hardikk Valera i Avinash Kumar Agarwal [11] istraživali su korištenje metanola kao alternativnog goriva, ali ne samo metanola već i kombinacije metanola s drugim gorivima. Došli su do zaključka kako je najbolje koristiti smjesu metanola i dizela, ali se treba paziti na omjer jer ako se prijeđe omjer od 10% metanola u gorivu, tada treba nadodati opasne aditive. Također su došli do zaključka da se s takvom smjesom mogu smanjiti emisije NO<sub>x</sub>-a ali se povećavaju emisije ugljikova monoksida (CO) i ugljikovodika. Dogan Erdemir i Ibrahim Dincer [12] došli su do saznanja kako je amonijak zapravo jedna vrsta vodika i na taj način se dolazi do nultih emisija ugljika, te da korištenje amonijaka može biti jako isplativo. Ali uz te dobre stvari ima i loših kao što su teško zapaljenje, spora brzina plamena, zahtijevana veća kompresija. Aaron J. Reiter i Song-Chang Kong [13] utvrdili su da je amonijak moguće koristiti u suvremenim dizelskim motorima pri različitim brzinama i opterećenjima i to koristeći smjesu amonijaka i dizela. Postotak od 95% amonijaka u smjesi amonijaka i dizela daje povoljne rezultate, a postotak od 40 do 80% daje dobru potrošnju goriva. NO<sub>x</sub> nije problem, a emisije NO<sub>x</sub>-a se mogu smanjiti ako se ne koristi više od 60% amonijaka u smjesi. Kyunghwa Kim, Gillaeta Roh i Kangwoo Chun [14] ustanovili su da korištenje amonijaka daje nulte emisije CO<sub>2</sub>, ako se proizvodi na obnovljivi način. Također su došli do saznanja: za napraviti brod koji će ploviti na amonijak zahtijevat će se 1,6-2,3 puta veći volumen, 1,4-1,6 puta veća težina od trenutnog broda pogonjenog s teškim gorivom. Te će cijena biti veća za 3,5-5,2 puta. Ali bi se staklenički plinovi smanjili za 83,7 do 92,1%.

Osim istraživača, čak se i kompanija MAN sve više okreće istraživanju i produkciji motora na alternativna goriva. To potvrđuju njihovi motori na LNG[15], metanol[16] i amonijak[17]. Već sada imaju više iteracija motora na pogon LNG-a, i nastavljaju ga poboljšavati jer znaju da je to sadašnja budućnost.[15] Motor pogonjen metanolom je dobra opcija za područja s kontrolom emisija koja zahtijevaju male ili nikakve postotke sumpora u ispuhu, te postižu niske emisije NO<sub>x</sub>-a ako koriste i ubacivanje vode s metanolom.[16] Motor na amonijak je još u fazi izrade, nadaju se da će ga izbaciti 2024.

godine. Amonijak je dobar jer je to praktički vodik  $\text{NH}_3$  i na taj način ima niske emisije  $\text{SO}_x$ -a i  $\text{CO}_2$ , a amonijak postaje ugljično neutralno gorivo kada se proizvede iz obnovljivih izvora energije kao što su hidroelektrane, solarne elektrane ili vjetroelektrane.[17]

Cilj ovog rada je analiza karakteristika broskog sporokretnog dvotaktnog dizelskog motora na različita alternativna goriva i usporedba sa motorom na dizelsko gorivo. Usporedba rezultata radi se preko simulacija unutar AVL Boost-a nakon optimiranja parametara u cilju postizanja normi za emisije IMO *Tier III*  $\text{NO}_x$  koristeći validirani model 75% opterećenog MAN sporokretnog dvotaktnog dizelskog motora. Radi se usporedba između validiranog modela koji koristi dizel kao gorivo i istog modela koristeći alternativna goriva: LNG (metan), vodik, metanol (mješavinu metanola i dizela) i amonijak (mješavinu amonijaka i vodika). Simulacijama je uspješno postignuto smanjenje  $\text{NO}_x$ -a u ispušnim plinovima koristeći već nabrojena alternativna goriva. Umjesto korištenja LNG-a u simulacijama je korišten metan jer se LNG najviše sastoji od metana 87-99% i ostatak su razni plinovi. Kod simuliranja metanola uzet je postotak od 91% dizela i 9% metanola, jer se za veće postotke metanola u dizelu trebaju koristiti aditivi, pa se zbog točnije simulacije koristio niži postotak metanola. Ali se i sa tako malim postotkom dobivaju odlični rezultati koji će biti detaljnije opisani u kasnijim poglavljima. A mješavina amonijaka i vodika korištena u simulacijama je 90% amonijaka i 10% vodika. Taj postotak je uzet proizvoljno, ali s ciljem da gorivo ima jako veliki postotak amonijaka, a vodik služi kako bi potaknuo izgaranje u cilindru. Za svako gorivo trebalo je promijeniti krivulju ubrizgavanja i količinu ubrizganog goriva kako bi se postigli povoljni rezultati. Krivulja goriva mijenjana je na način da postoji početna manja količina ubrizganog goriva, a zatim slijedi ostatak. To je učinjeno jer se s prvotnom krivuljom (iz validiranog modela) nisu mogli postići zadovoljavajući rezultati. A količina goriva se mijenjala jer različita goriva imaju različitu donju ogrjevnu moć, tako da ako je određeno gorivo imalo manju donju ogrjevnu moć od standardnog dizela, količina ubrizganog goriva bi se povećavala, i obrnuto. Simulacijama se pokušalo približiti što bliže snazi motora dobivenoj koristeći dizelsko gorivo, ali zadovoljavajući granicu od 3.4 g/kWh  $\text{NO}_x$ -a u ispušnim plinovima.

Značaj postignutih rezultata je u tome što se radi o dvotaktnim sporokretnim motorima, kojima svijet polako okreće leđa. Većina istraživača u svijetu okreće se korištenju električnih i hibridnih postrojenja. S ovim radom dokazano je kako se dvotaktni sporokretni motori i dalje mogu koristiti kao glavni pogonski motori koji zadovoljavaju i najstrože ekološke zahtjeve. Naravno morati će se napraviti neke preinake u smislu

skladištenja alternativnih goriva, ali već postoje razna istraživanja koja govore o materijalima za skladištenje raznih goriva. J.O. Abe, A.P.I. Popoola, E. Ajenifuja i O.M. Popoola [10] bavili su se načinom skladištenja vodika. Postoje tri različita načina skladištenja: plinovito, tekuće i kruto stanje. Kod plinovitog koji je i najčešći način, koristi se aluminij i čelik. Kod tekućeg načina mora se paziti što je vodik u tekućem stanju pod kriogenim uvjetima pa skladišta moraju biti posebno izolirana. Dok kod krutog načina vodik je skladišten u metalnim hidridnim tankovima. Ali svi ti načini su još jako loši jer ili zauzimaju dosta prostora ili su preteški pa nemaju smisla na brodovima.

Rad se sastoji od 8 poglavlja i zaključkom na kraju. U prvom poglavlju općenito je rečeno o trenutnom stanju u pomorstvu, kakvi brodovi voze, kakvi se motori ugrađuju. Dalje je rečeno o budućim alternativnim gorivima, što su razni drugi istraživači uspjeli otkriti o njima i kako bi se oni implementirali u daljnji razvoj pomorstva. Rečeno je i da se intenzivno radi na izradi različitih vrsta motora koji mogu iskoristiti sva te alternativna goriva. Te je rečeno kakve probleme još nalaze s skladištenjem raznih goriva. Cilj rada je izrečen i kako je on postignut.

U drugom poglavlju objašnjen je MARPOL. Od čega se on sastoji i zašto su te stvari uopće napravljene kako bi spasili zemlju od različitih onečišćenja.

Treće poglavlje je nastavak drugog poglavlja gdje je detaljnije opisan šesti prilog MARPOL-a, objašnjene su regulative 13 i 14 te što je to NO<sub>x</sub> tehnički kodeks, te na koje načine se mogu smanjiti emisije štetnih tvari s brodova.

U četvrtom poglavlju objašnjeno je izgaranje u dvotaktnom dizelskih motoru.

Peto poglavlje govori o proizvođačima dvotaktnih dizelskih motora na dvojno gorivo i rečeno je koje kompanije koriste koju vrstu motora, te kako ti motori dobivaju niske emisije.

U šestom poglavlju nabrojana su alternativna goriva koja su se koristila u simulacijama.

Sedmo poglavlje služi za prikaz kako je napravljen simulacijski model unutar programa AVL Boost.

Osmo poglavlje govori kako je simulacijski model optimiziran u svrhu dobivanja zadovoljavajućih rezultata i koji su rezultati dobiveni, s komentarima na rezultate.

I na kraju je zaključak gdje je sve ukratko objašnjeno i rečeno koje je najbolje buduće gorivo te kako se može nastaviti ovaj rad.

## 2. MARPOL

Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova, MARPOL, glavna je međunarodna konvencija koja obuhvaća sprječavanje onečišćenja morskog okoliša brodovima iz operativnih ili slučajnih uzroka. Pitanje onečišćenja mora postavljeno je na Konferenciji Ujedinjenih naroda o Ljudskom okolišu 1972. godine u Stockholmu. MARPOL konvencija usvojena je 2. studenog 1973., a promijenjena protokolom iz 1978. zbog tankerskih nesreća iz 1976-1977. Zato se još u dokumentima naziva MARPOL 73/78.[20] MARPOL konvencijom nastali su Prilozi za sprječavanje onečišćenja, imamo ih 6, a to su:

### 2.1.1. Prilog I

Sprječavanje onečišćenja uljima. Kada se govori u uljima najčešće se misli na sirovu naftu i naftne derivate, ali tu spadaju i životinjske masnoće, biljna ulja i ostala ne-naftna ulja kao i kaljužne vode. Ulja su lakša od vode i ne otapaju se u vodi, nego plutaju na površini, zapaljiva su i toksična. Nakon izljeva najčešće ostane uljna mrlja.

Prilogom I MARPOL zahtjeva Međunarodnu svjedodžbu o sprječavanju onečišćenja mora uljima, IOPP certifikat, za svaki tanker koji prevozi ulje od 150 bruto tona naviše, te svaki drugi brod od 400 bruto tona naviše. Također tu su još zahtjevi za tankovima odgovarajućih zapremnina za ostatke (talog), oprema za filtriranje ulja s posebnom pažnjom da sva uljna voda koja izlazi s broda ne smije prelaziti 15 dijelova na milijun (ppm), te taložni tank. Ispuštanje u more mora se paziti za posebna područja, a to su Sredozemno more, Baltičko more, Crno more, Crveno more, područje Zaljeva, Adenski zaljev, Antarktika, Sjeverno more. SOPEP ili Brodski plan u nuždi za slučaj onečišćenja uljem i SMPEP ili Plan u nuždi kod onečišćenja mora štetnim tekućim tvarima, Knjiga ulja-Dio I, Knjiga ulja-Dio II.[21]

### 2.1.2. Prilog II

Sprječavanje zagađenja štetnim tekućim tvarima. Kemikalije i ukapljeni plinovi, NLS (*Noxious Liquid Substances*) spadaju u propise IBC kodeksa (Međunarodni kodeks za gradnju i opremanje brodova za prijevoz opasnih kemikalija u razlivenom stanju) i njegovog prethodnika BCH kodeksa (Kodeks za gradnju i opremanje brodova za prijevoz opasnih kemikalija u razlivenom stanju). IBC kodeks usvaja Odbor za zaštitu morskog okoliša (MEPC). Brodovi moraju imati SMPEP ili SOPEP+SMPEP. Štetne tekuće tvari

dijele se na razrede: X, Y, Z i O (OS). Najštetnije su X, a najmanje štetne su OS. Brodovi moraju imati Međunarodnu svjedodžbu o sprječavanju onečišćenja u prijevozu štetnih tekućih tvari u trupu. Svaki brod koji je ovlašten prevoziti tvari razreda X, Y, ili Z mora imati na brodu Priručnik. Priručnik je tu da ukaže časnicima broda fizikalne mjere i sve radne postupke rukovanja teretom, čišćenje tanka, rukovanje talogom, balastiranje i debalastiranje tankova tereta. Svaki brod mora imati Knjigu tereta.[21]

### **2.1.3. Prilog III**

Sprječavanje zagađenja štetnim tvarima koje se prevoze morem u pakiranom obliku. Europska standardna klasifikacija ponašanja teoretski određuje ponašanja tvari ovisno o njihovim fizičkim i kemijskim karakteristikama. Prema toj klasifikaciji tvari su podijeljene na [21]:

- Plinovi (G),
- Isparivači (E),
- Plutajuće tvari (F),
- Tvari koje će se otopiti (D) i
- Tvari koje tonu (S).

Međunarodni kodeks opasnih tvari, IMDG, dijeli štetne tvari na 9 dijelova:

- Eksplozive,
- Plinove,
- Zapaljive tekućine,
- Zapaljive krutine, koje se mogu samozapaliti, i koje u dodiru s vodom ispuštaju zapaljive plinove,
- Oksidirajuće tvari i organske perokside,
- Otrovnost i zarazne tvari,
- Radioaktivni materijal,
- Korozivne tvari i
- Razne opasne tvari i predmete.

### **2.1.4. Prilog IV**

Sprječavanje zagađenja sanitarnim otpadnim vodama. Izdaje se Međunarodna svjedodžba o sprječavanju onečišćenja fekalijama. A fekalije su [21]:

- Istjecanja i drugi otpaci iz bilo kojeg oblika zahoda i pisoara,

- Istjecanja iz medicinskih prostorija preko umivaonika, kada i odljevnih otvora iz tih prostorija,
- Istjecanja iz prostora s živim životinjama i
- Druge otpadne vode ako su izmiješane s navedenim istjecanjima.

Svaki brod mora biti opremljen jednim od sljedećih sustava:

- Oprema za obradu fekalija,
- Sustav za usitnjavanje i dezinficiranje ili
- Tank za pohranu.

### **2.1.5. Prilog V**

Sprječavanje zagađenja mora smećem s brodova. Pod smeće smatramo:

- Sve vrste životinjskih otpadaka,
- Otpatke iz domaćinstva i
- Otpatke od radova na brodu.

Prema Prilogu V imamo posebna područja u koja je zabranjeno izbacivati u more sve plastične tvari i druge otpatke, a u ta područja spadaju [21]:

- Sredozemno more,
- Baltičko more,
- Crno more,
- Crveno more,
- Područje Zaljeva,
- Sjeverno more,
- Antarktika i
- Šire područje Kariba, uključujući Meksički zaljev i Karipsko more.

Treba postojati plan postupanja sa smećem te brodovi moraju imati Knjigu o smeću.[21]

### **2.1.6. Prilog VI**

Sprječavanje zagađenja emisijom štetnih plinova. Posljedice ispuštanja mogu biti izravne (neposredno onečišćenje) i neizravne (zapaljenje plinova i onečišćenje produktima izgaranja). Onečišćenja [21]:

- Tvari koje uništavaju ozon (ODS),
- Dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>),
- Sumporni oksidi (SO<sub>x</sub>) i male čestice (PM),

- Lako hlapljive organske komponente (VOC),
- Plinovi nastali izgaranjem u spaljivaču i
- Ugljikov dioksid CO<sub>2</sub>.

Brodovima se izdaje Međunarodna svjedodžba o sprječavanju onečišćenja zraka.

Razlikujemo ECA i SECA zone koje se odnose na ispuštanje emisija. ECA je *Emission Control Area*, a SECA je *SOx Emission Control Area*.

### 3. MARPOL PRILOG VI

Prilog VI dodan je 1997. ali je nastupio na snagu 2005. godine. I kao što je već rečeno u prethodnom poglavlju odnosi se na ispuštanje štetnih plinova s brodova. Od štetnih plinova najviše se pazi na ispuštanje dušikovih oksida, sumpornih oksida i halogenih plinova. Prilogom VI usvojene su regulative 13 i 14.[23]

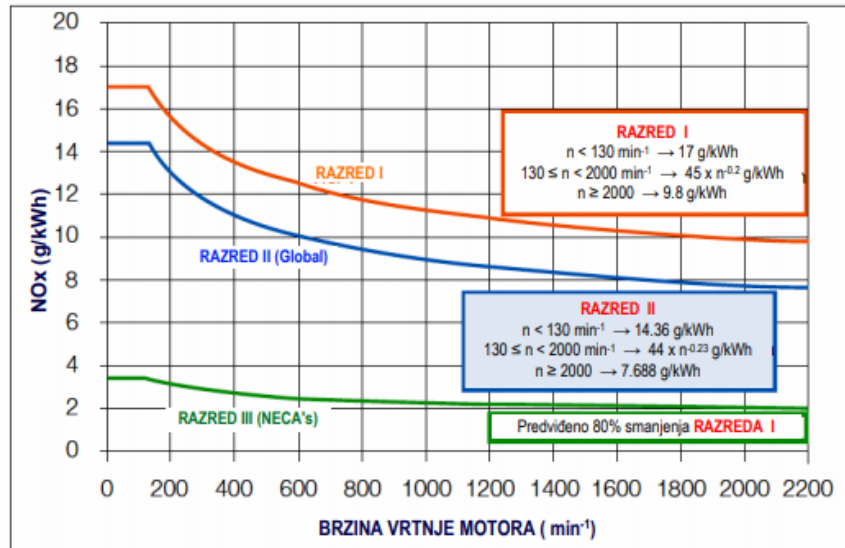
#### 3.1. Regulatoriva 13

Kontrola emisija NO<sub>x</sub>-a dizelskog motora postiže se pregledom i certifikacijskim zahtjevima koji vode do izdavanja certifikata o međunarodnom sprječavanju onečišćenja zraka (EIAPP) i naknadnog demonstriranja usklađenosti u radu u skladu sa zahtjevima obveznih propisa 13.8 i 5.3.2 odnosno NO<sub>x</sub> Technical Code (NO<sub>x</sub> Tehnički kodeks), dobivenim rezolucijom MEPC.177 (58) te izmijenjenim i dopunjenim rezolucijom MEPC.251. (66). Primjenjuju se različite razine (*Tier*) temeljene na datumima izgradnje brodova, a granična razina određuje se prema brzini okretaja motora za svaki *Tier*.

**Tablica 1. Granične vrijednosti NO<sub>x</sub> [25]**

Razina	Datum izgradnje broda	Ukupna granica emisija po ciklusu (g/kWh)		
		Nazivna brzina motora (n)		
		n < 130	n = 130-1999	n ≥ 2000
I	1.1.2000.	17,0	45 n <sup>^</sup> (-0.2)	9,8
II	1.1.2011.	14,4	44 n <sup>^</sup> (-0.23)	7,7
III	1.1.2016.	3,4	9 n <sup>^</sup> (-0.2)	2,0

Razina III odnosi se samo na brodove koji prolaze kroz ECA zone, a za ostatak svijeta koristi se razina II, prikazano na slici 1.[25]



Slika 1. Graf graničnih vrijednosti NO<sub>x</sub>[23]

### 3.1.1. NO<sub>x</sub> Technical Code (2008)

Svrha Kodeksa je uspostaviti obvezne postupke za ispitivanje, nadgledanje i certificiranje brodskih dizelskih motora što će omogućiti proizvođačima motora, brodovlasnicima i administraciji da osiguraju da su njihovi dizelski motori u skladu sa svim odgovarajućim graničnim vrijednostima emisija NO<sub>x</sub>-a kako je navedeno u regulativi 13 Priloga VI. Ovaj Kodeks se odnosi na sve dizelske motore snage veće od 130 kW. Motor će se smatrati zadovoljavajućim ako demonstrira da su emisije NO<sub>x</sub>-a unutar dozvoljenih granica, na svakom pregledu.[5]

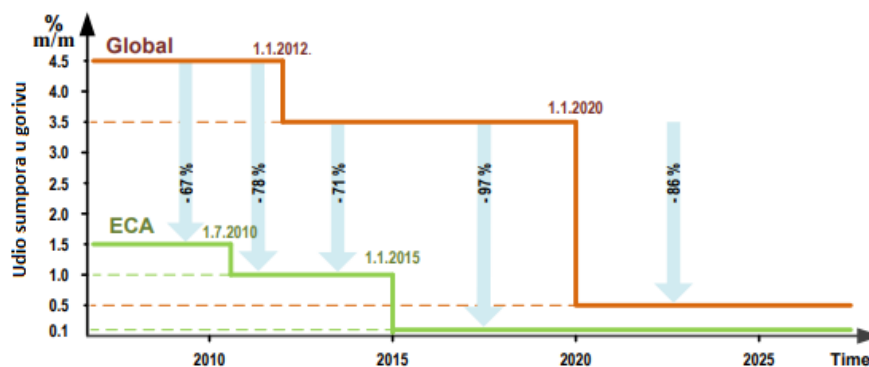
### 3.2. Regulativa 14

Kontrola emisije NO<sub>x</sub> i malih čestica (PM) primjenjuje se na sva goriva, strojeve i uređaje koji izgaraju na brodu, što znači da uključuje i glavne i pomoćne motore, kotlove i generatore inertnog plina. Kontrola se dijeli između onih koje se primjenjuju na ECA zone, koje su uspostavljene za ograničenje emisija SO<sub>x</sub> i malih čestica i onih koji se odnose van tih područja. To se postiže ograničavanjem maksimalnog sadržaja sumpora u gorivima. Ta ograničenja iskazana su s „% m/m“ što znači da je po masi i mijenjala su se kroz godine.[26]



**Tablica 2. Ograničenja za SOx i PM [26]**

Izvan ECA zona	Unutar ECA zona
4,50% m/m (prije 1.1.2012.)	1,50% m/m (prije 1.7.2010.)
3,50% m/m (poslije 1.1.2012.)	1,00% m/m (poslije 1.7.2010.)
0,50% m/m (poslije 1.1.2020.)	0,10% m/m (poslije 1.1.2015.)



**Slika 2. Udio sumpora u gorivu[22]**

ECA zone na koje se odnose ova ograničenja su:

- Baltičko more,
- Sjeverno more,
- Područje Sjeverne Amerike (obala Sjedinjenih Američkih Država i Kanade),
- Područje Karipskog mora Sjedinjenih Američkih Država,
- Područje Kalifornije i Srednje Amerike,
- Područje Sredozemnog mora,
- Područje Australije i
- Područje Japana.



**Slika 3. ECA zone [24]**

Metode smanjivanja emisija štetnih tvari s brodova dijele se na primarne i sekundarne metode.

Primarne metode [21]:

Unutarnje ili primarne metode mijenjaju konfiguraciju motora i djeluju izravno na proces izgaranja, a stupanj smanjenja emisija ovisi o tipu motora i metodi koja se koristila, te rezultati variraju od 10 do 50%. U primarne metode spada:

- Preinaka sustava izgaranja,
- Preinaka sustava dovoda zraka,
- Izravno ubrizgavanje vode,
- Recirkuliranje ispušnih plinova,
- Emulzija vode i goriva i
- Sustav zajedničkog cjevovoda.

Sekundarne metode [21]:

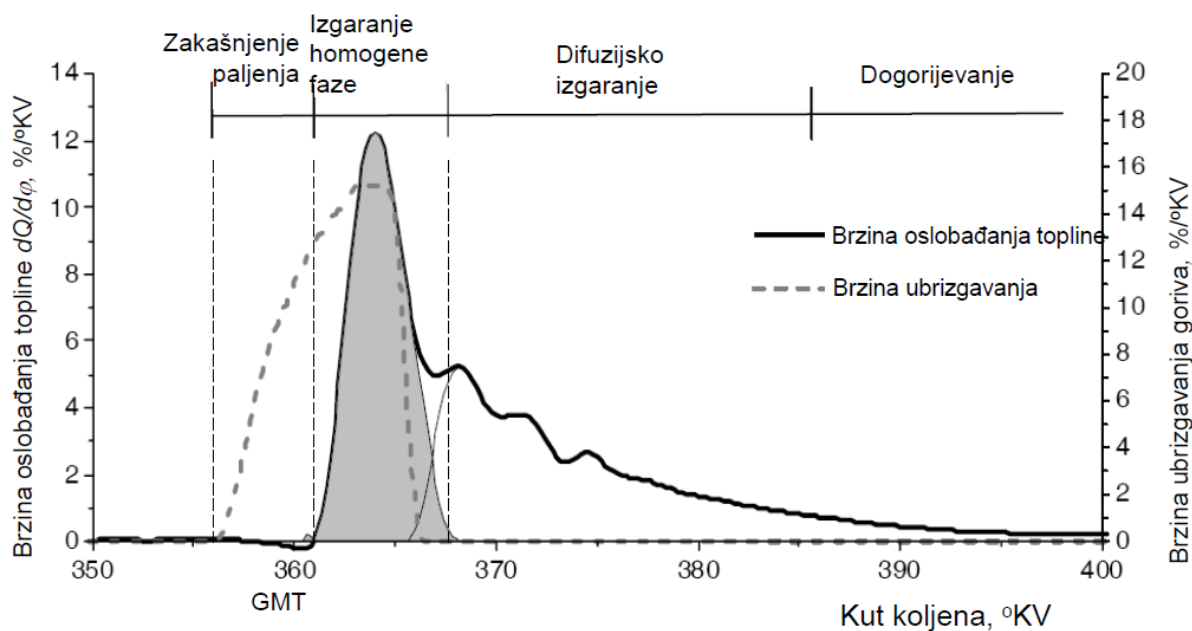
Sekundarne metode odnose se na smanjenje razine emisija bez promjene konstrukcije motora s čime je moguće smanjiti emisije NO<sub>x</sub>-a do 95%. U sekundarne metode spada:

- Selektivna katalitička redukcija
- Upotreba goriva sa malim postotkom sumpora i
- Sustav smanjenja emisije pomoću plazme.

## 4. IZGARANJE U DVOTAKTNIM DIZELSKIM MOTORIMA

Izgaranje u dvotaktnim dizelskim motorima dijeli se u četiri faze:

- Zakašnjenje paljenja,
- Izgaranje homogene faze,
- Difuzijsko izgaranje i
- Dogorijevanje.



Slika 4. Faze izgaranja u dvotaktnim dizelskim motorima [2]

Nakon što je tlak stlačen unutar cilindra, ubacuje se gorivo pri tlaku većem od 800 bar-a i brzini od 150-400 m/s. Na taj način dolazi do samozapaljenja goriva. To gorivo ubacuje se kroz više ubrizgača (najčešće 3) ravnomjerno raspoređenih na poklopcu cilindra. Zbog velikog tlaka pri kojem se ubacuje gorivo i zbog relativno malih rupica u ubrizgaču, dolazi do finog raspršivanja goriva na jako male kapljice.

Prva faza izgaranja zvana zakašnjenje paljenja je vrijeme od početka ubrizgavanja goriva do početka termičkog paljenja. Dijeli se na fizičko i kemijsko zakašnjenje. Fizičko zakašnjenje paljenja uzrokovano je samim gorivom, raspršivanjem, isparavanjem i miješanjem sa zrakom, a kemijsko zakašnjenje ovisi o tlaku i temperaturi unutar cilindra i o vrsti goriva koje izgara.

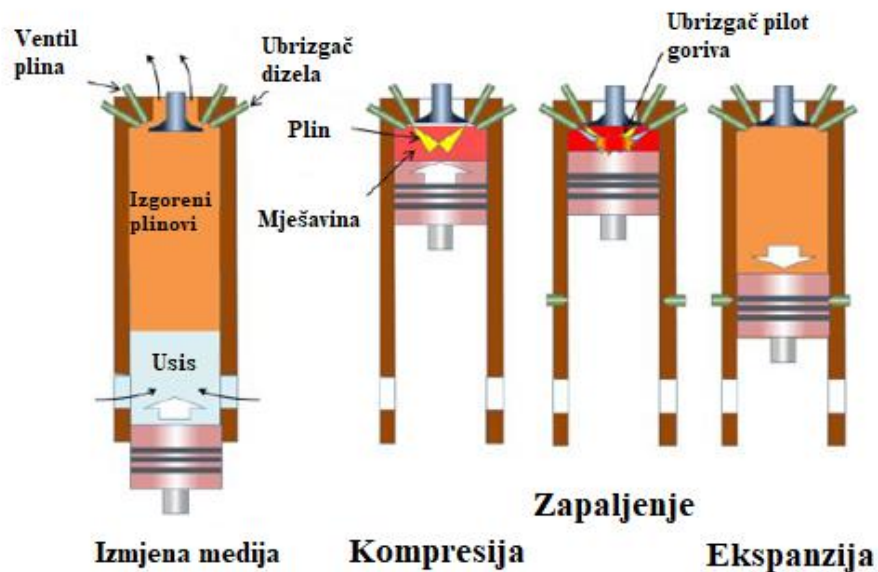
Druga faza ili izgaranje homogene faze je kada se naglo zapali homogena smjesa već ranije isparene smjese goriva i zraka. Izgaranje se događa na više mjesta u isto vrijeme i zbog takvog izgaranja dolazi do porasta tlaka i temperature.

Treća faza ili difuzijsko izgaranje je toplinska energija koja se koristi za isparavanje preostalog goriva. Nakon isparavanja, te pare se miješaju sa zrakom i dolazi do reakcije plamena. Tlak u cilindru se smanjuje, a temperatura je u tom trenutku maksimalna.

Četvrta faza još zvana dogorijevanje je završna faza gdje pada temperatura i sve se reakcije usporavaju. Ova faza traje otprilike pola vremena cijelog izgaranja.[19]

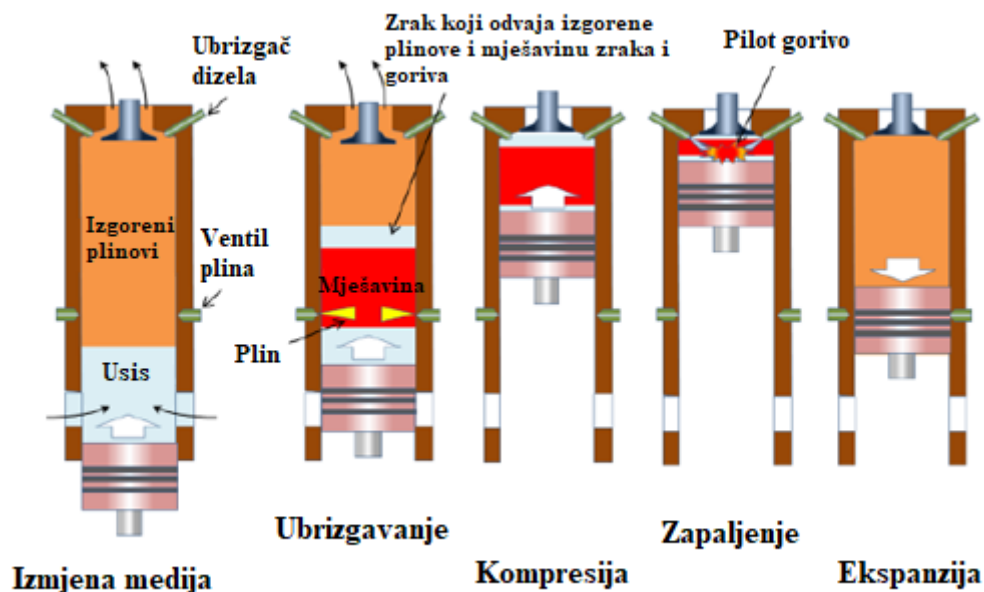
## 5. DVOTAKTNI MOTORI NA DVOJNO GORIVO

Kod dvotaktnih motora na dvojno gorivo plin se ubrizgava direktno u komprimirani zrak kao i dizel kod dizelskog motora. A samozapaljenje se postiže pilot ubrizgavanjem goriva (dizela) preko zasebnog ubrizgača. Na taj način postiže se smanjenje emisija ugljikova dioksida CO<sub>2</sub> za 20% i više, smanjuje se količina neizgorenog goriva i emisije CO, te nema kucanja, ali ostaju visoke količine NO<sub>x</sub>-a.



Slika 5. Ciklus izgaranja kod dvotaktnog motora na dvojno gorivo [27]

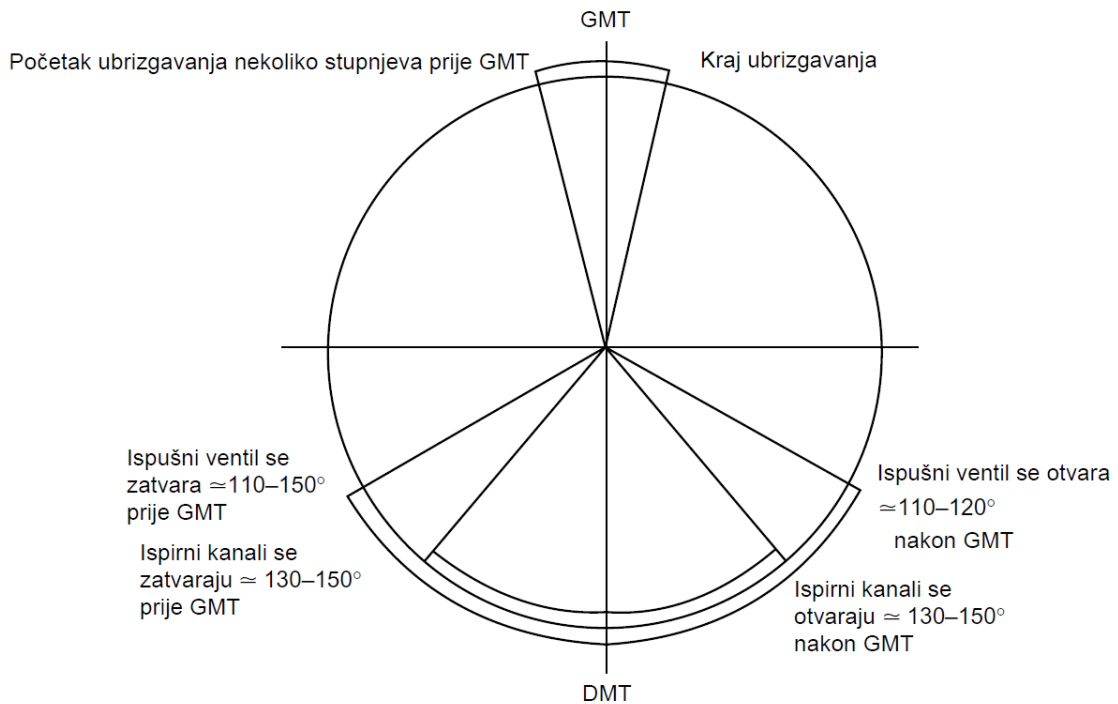
Plin koji se ubrizgava kao gorivo, spremljeno je kao tekućina pa prvo mora proći proces isparavanja pa tek onda tlačenja kako bi se ubrizgao u cilindar pod tlakom od 30 MPa i više. Promjena između korištenja dizela i plina lako se obavlja jer nema rizika od kucanja unutar cilindra. Jedan od načina smanjenja emisija NO<sub>x</sub>-a je korištenje niskotlačnog ubrizgavanja plina u motoru koje može raditi sa siromašnom smjesom već pomješanog goriva. To se postiže tako da se prilikom usisa prvo ubaci mala količina zraka koja će razdvojiti već izgoreni plin i pomješano gorivo. S tim se dobivaju rezultati slični rezultatima četverotaktnih goriva s niskom emisijom NO<sub>x</sub>-a.



**Slika 6. Ciklus izgaranja kod dvotaktnog motora na dvojno gorivo s niskotlačnim ubrizgavanjem plina [27]**

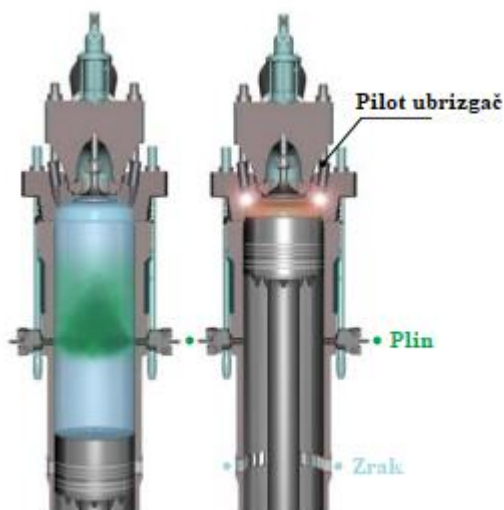
Svi motori na dvojno gorivo imaju elektronski upravljano ubrizgavanje goriva kako bi omogućili lakši prijelaz s dizela na plin. Kod korištenja dizela, postoji aktuator koji mehanički djeluje na pumpu goriva i tako mijenja protok, dok kod plinskog načina to se obavlja solenoidom. Prelazak s režima rada s plinom na rad s dizelom moguće je odmah postići ubrizgavanjem dizela u cilindar, dok kod prelaska s dizela na plin to nije moguće. Treba se obaviti tranzicijsko razdoblje gdje se polagano otvara ventil plina. Razlog tome je omjer zraka i goriva potreban za rad motora bez postizanja kucanja ili ne paljenja jednog od cilindara. [27]

Drugi način je korištenje dizelskog ciklusa gdje se kompresijom opet postiže samozapaljenje goriva koji se direktno ubrizgava u cilindar.[28]



**Slika 7. Ciklus dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora [19]**

Wartsila koristi način s niskotlačnim ubrizgavanjem goriva. I na taj način postižu rezultate emisija u skladu s IMO *Tier III* regulacijom bez sekundarnih metoda. Nema emisija SO<sub>x</sub>, skoro pa nema neizgorenih čestica, a pilot gorivo zauzima otprilike 1% potrošenog goriva. LNG se kod njih može koristiti pri svim opterećenjima motora. Ti Wartsilini motori zovu se RT-Flex motori.[29]



**Slika 8. Wartsila ubrizgavanje plina (desno) i zapaljenje (lijevo) [30]**

S druge strane MAN B&W koriste dizelski ciklus u svojim motorima na dvojno gorivo. Jedan od razloga zašto su MAN motori jako dobri je što mogu raditi sa skoro bilo kojom vrstom goriva i bilo kojom kvalitetom goriva s malom ili nikakvom promjenom učinkovitosti. To postižu time što su njihovi motori jako veliki, a okretaji u minuti su mali pa se cijeli proces izgaranja može odviti.[17] Ali sami motori ne mogu postići potrebnu razinu emisija IMO *Tier III*, već se mora koristiti i sekundarna metoda selektivne katalitičke reakcije.[28]



**Slika 9. MAN portfolio dvotaktnih motora na dvojno gorivo [17]**

MAN dvotaktni motori na dvojno gorivo s lijeva na desno:

- ME-GI (LNG)
- ME-GA (LNG)
- ME-GIE (Etan)
- ME-LGIM (Metanol)
- ME-LGIP (LPG)
- Amonijak 2024.



## 6. ALTERNATIVNA GORIVA

Kao što je već rečeno, promjenom goriva mogu se postići željeni rezultati i to spada u sekundarne metode za smanjenje emisija ispušnih plinova. Korištenjem alternativnih goriva koja ne ovise o fosilnim gorivima također se smanjuje i ugljični otisak. Alternativna goriva koja se razmatraju za budućnost su:

- LNG,
- Metanol,
- Vodik i
- Amonijak ( $\text{NH}_3$  tehnički se može svrstati s vodikom).

### 6.1. Metan

Korištenje LNG-a (ukapljenog prirodnog plina) kao goriva i za glavne i za pomoćne motore značajno će se smanjiti emisije  $\text{NO}_x$ -a u usporedbi s korištenjem HFO (teškog dizelskog goriva) ili MDF (brodskog dizelskog goriva).[8]. Trenutno je na tržištu velika potražnja za prirodnim plinom i radi se veliki broj brodova koji bi mogao zadovoljiti potrebe svijeta. Korištenje LNG-a kao alternativnog goriva trajat će kratko, jer će IMO tražiti da se više ne koriste fosilna goriva već da se prijeđe na sintetska.

### 6.2. Vodik

Vodik kao gorivo je glavni stup budućeg transporta robe jer je ugljično neutralan i njihovim korištenjem moguće je razviti vozilo s nultom emisijom.[6] Vodik se može koristiti na više različitih načina. Može se ubacivati u motor kao čisti vodik što zapravo i nije tako lako jer se vodik teško samozapaljuje. Druga opcija je da se vodik miješa s dizelom i na taj način dobijemo dvojno gorivo gdje dizel služi samo za početno samozapaljenje. Treća opcija je da se vodik koristi u malim količinama s dizelskim gorivom kako bi se smanjile emisije  $\text{NO}_x$ -a. A četvrta opcija je korištenje vodika kao vodikovih ćelija čime se dobije struja i nusproizvod je voda, što znači da je to čisto gorivo.

### 6.3. Metanol

Metanol je nastao zelenom kemijom. Već se koristi u dizelskim motorima, što je doprinijelo rastu njegove ekonomske važnosti. Predviđa se da će metanol biti jedan od

najboljih alternativnih goriva za dizelske motore u bliskoj budućnosti. Metanol je već jedno vrijeme glavno gorivo za korištenje u utrkama. Istina je da se treba koristiti više metanola kako bi se postigli rezultati ali metanol čišće gori od dizela ili benzina i daje veću snagu. Metanol se ne mora koristiti sam kao gorivo, već se može koristiti i kao smjesa s dizelom. Ubacuju se manje količine metanola u dizel kako bi se smanjile koncentracije dušikovih oksida u ispuhu. Mora se paziti na količinu metanola u dizelu jer ako u smjesi dizela i metanola ima više od 10% metanola, taj metanol će se odvojiti, to jest neće više biti smjesa. Zato se za postotke veće od 10% trebaju dodavati aditivi kako bi ta smjesa opstala.[11]

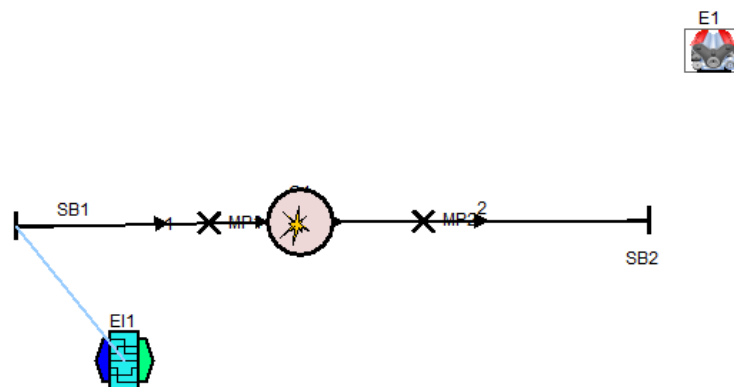
#### **6.4. Amonijak**

Amonijak je gorivo koje ne sadrži ugljik i ne proizvodi emisije CO<sub>2</sub> kada se dobiva iz obnovljivih izvora. Brod s pogonom na amonijak mogao bi smanjiti emisiju stakleničkih plinova za otprilike 83,7 - 92,1%, ovisno o vrsti pogona i načinu proizvodnje goriva.[14]

Osim korištenja samo amonijaka kao goriva, mogu se koristiti i spojevi amonijaka i drugih goriva kao što su dizel ili vodik. Korištenjem takve smjese, s većim udjelom amonijaka smanjuju se ispuštanja CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Ali ako se ne pogodi smjesa onda nastupaju veće količine NO<sub>x</sub>-a u ispuhu koji se dalje mogu riješiti korištenjem Selektivne katalitičke redukcije (SCR), koja opet koristi amonijak za smanjivanje NO<sub>x</sub>-a u ispuhu.[12]

## 7. SIMULACIJSKI MODEL

AVL Boost je simulacijski program koji je korišten kako bi se odradile simulacije u radu dizelskog motora. AVL Boost je potpuno integrirani *software* za simulaciju motora s unutarnjim izgaranjem.[18] Koristi se u većini velikih proizvođača automobila, pa čak postoji i program specijalno napravljen za kompanije koje se bave utrka. Unutar AVL Boost-a prvo se mora napraviti model na kojem će se obavljati simulacije. U ovom radu napravljen je pojednostavljeni model dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora MAN 6S50ME. Podaci koji su ubačeni u program uzeti su na samom motoru kada je brod bio u brodogradilištu Brodotrogir. Uzeti su i fizički podaci kao što su dijelovi stapa, ali i rezultati rada motora kao što su indicirani tlakovi. Nakon ubacivanja svih podataka u program odrađena je kalibracija i zatim validacija. Validacija je postignuta na način da su postignuti isti rezultati tlakova u programu kao i što su izmjereni na ispitivanju motora u eksploataciji.[19]

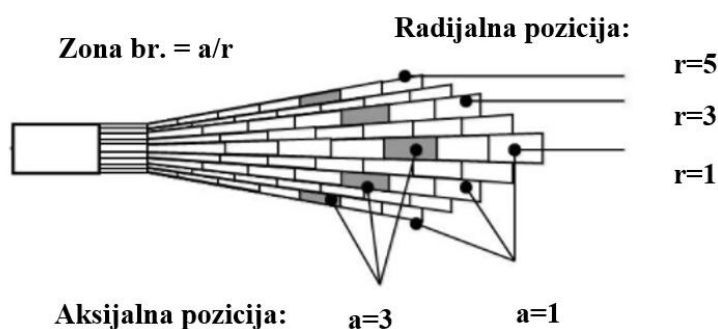


**Slika 10. Pojednostavljeni model motora unutar AVL Boost-a**

Na slici 10 je prikazan pojednostavljeni model sporokretnog dvotaktnog dizelskog motora. Model se sastoji od jednog cilindra, dvije cijevi koje povezuju cilindar s dva priključka okoline, jedan priključak za usis i jedan za ispuh. Na priključak za usis spojen je pojednostavljeni model turbopuhala koji nam zapravo daje konstantni tlak. Na dvjema cijevima još se nalaze mjerne točke koje su važne za ispis rezultata nakon obavljene simulacije. U samom desnom gornjem kutu nalazi se ikona koja označava motor, tu se daju osnovni podaci za dati model motora.

## 7.1. AVL više-zonski model izgaranja (AVLMZCM)

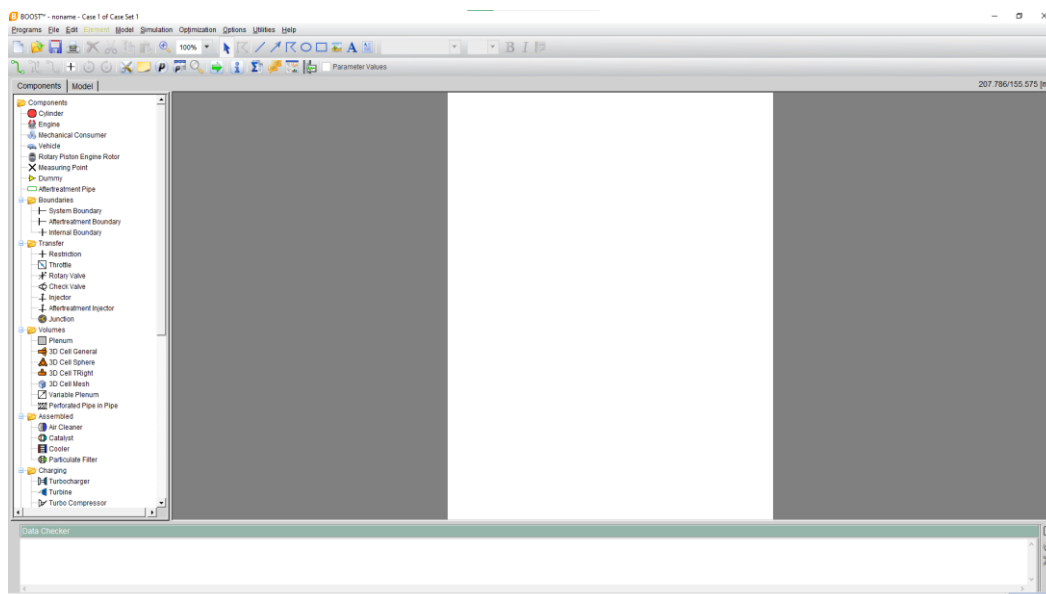
Pri izradi modela unutar dijela cilindra korišten je *AVL Multi Zone Combustion Model*, što je AVL-ov više-zonski model izgaranja. Taj model radi na način da se cjelokupni proračun smanjuje (diskretizira) na manje dijelove, što bi se moglo objasniti da se jedan paket sastoji od više pod-paketa, a svaki taj pod-paket je zapravo komplicirani izračun koji sam Boost odrađuje. Što je više tih pod-paketa, to je izračun, odnosno rezultati, točniji. AVLMZCM je najkompliciraniji model izgaranja koji Boost nudi i on služi kako bi se dobili rezultati emisija ispušnih plinova, što je i krajnji cilj ovog rada.



Slika 11. Raspad mlaza goriva [19]

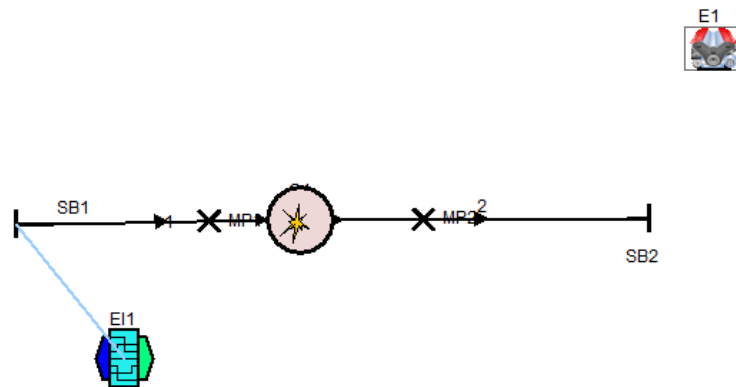
## 7.2. Izrada simulacijskog modela

Na samom početku izrade modela, pri paljenju AVL Boost-a otvori se prazan papir.



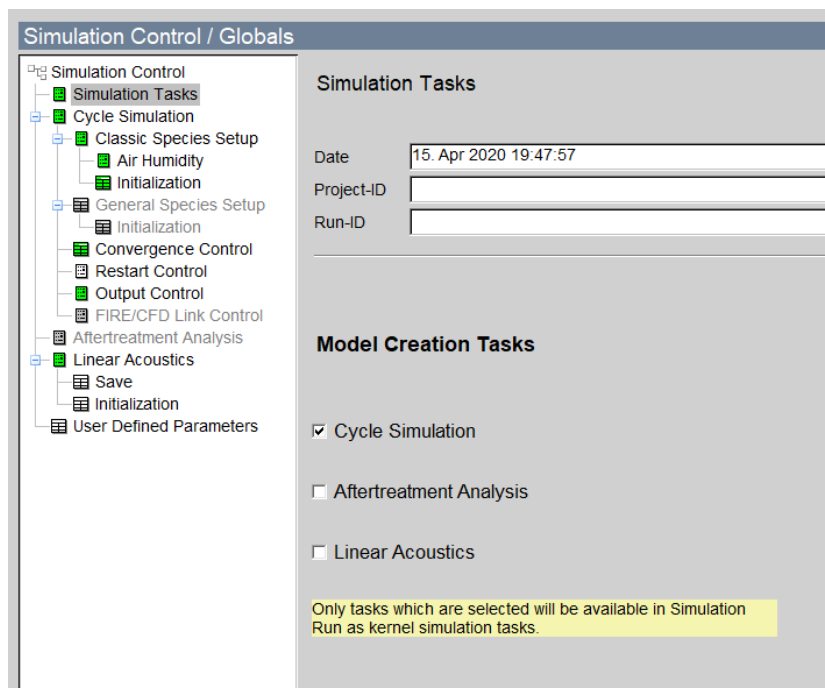
Slika 12. Početni prozor AVL Boost-a

Na taj prazan papir ubace se dijelovi potrebni za izradu modela koji se nalaze s lijeve strane. Svi dijelovi nabrojani su ispod naslova simulacijski model, ispod slike samog modela. Te se dobije ovakav model prikazan na sljedećoj slici 13.



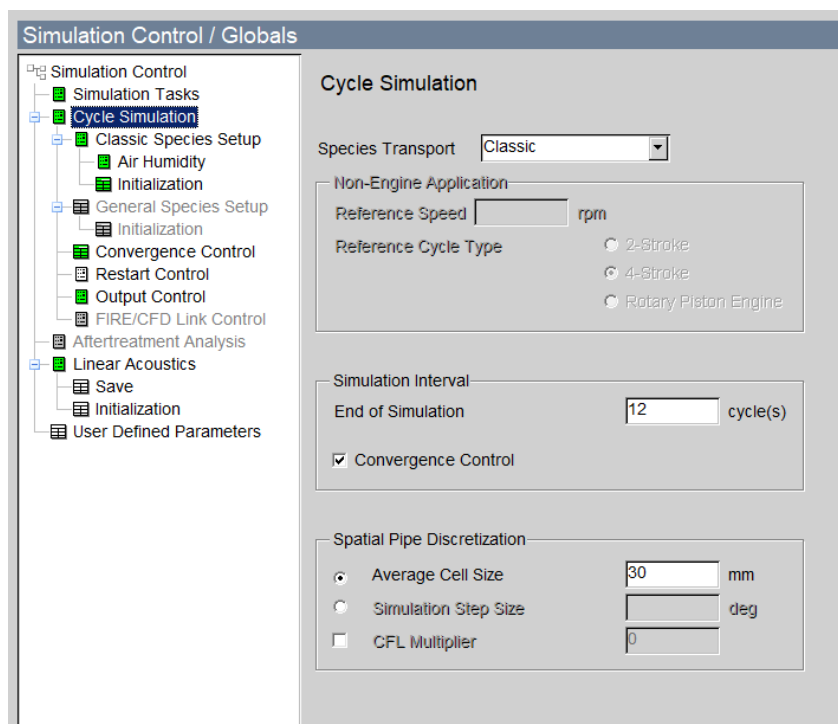
**Slika 13. Pojednostavljeni model motora unutar AVL Boost-a**

Daljnja izrada modela kreće od ulaska u *Simulation > Control* i prate se sljedeće slike:



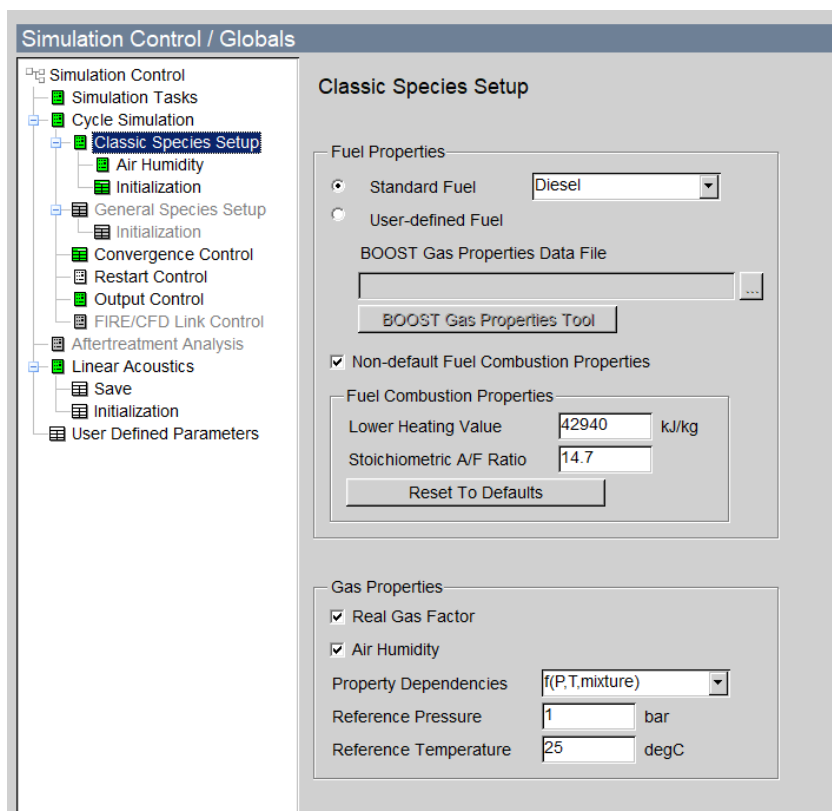
**Slika 14. Ciklusna simulacija**

Slika 14 nam govori da se radi o ciklusnoj simulaciji, što znači da program obavlja više kompleksnih izračuna zaredom kako bi se dobili rezultati.



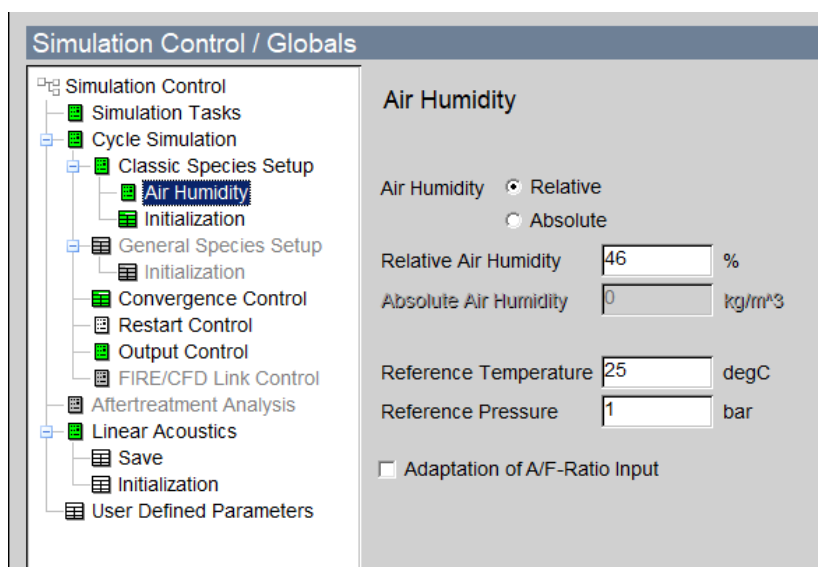
**Slika 15. Trajanje simulacije**

Simulacija će se zaustaviti nakon 12 odrađenih simulacija. Što je veći broj ciklusa, to simulacija duže traje. Također određeno je da se simulacija odrađuje svako 30 mm „cijevi“, na taj način dobijamo više podataka za rezultate. Naravno što je manja brojka duljine diskretizacije cijevi, to će biti više podataka, a to znači da će dulje trajati simulacija.



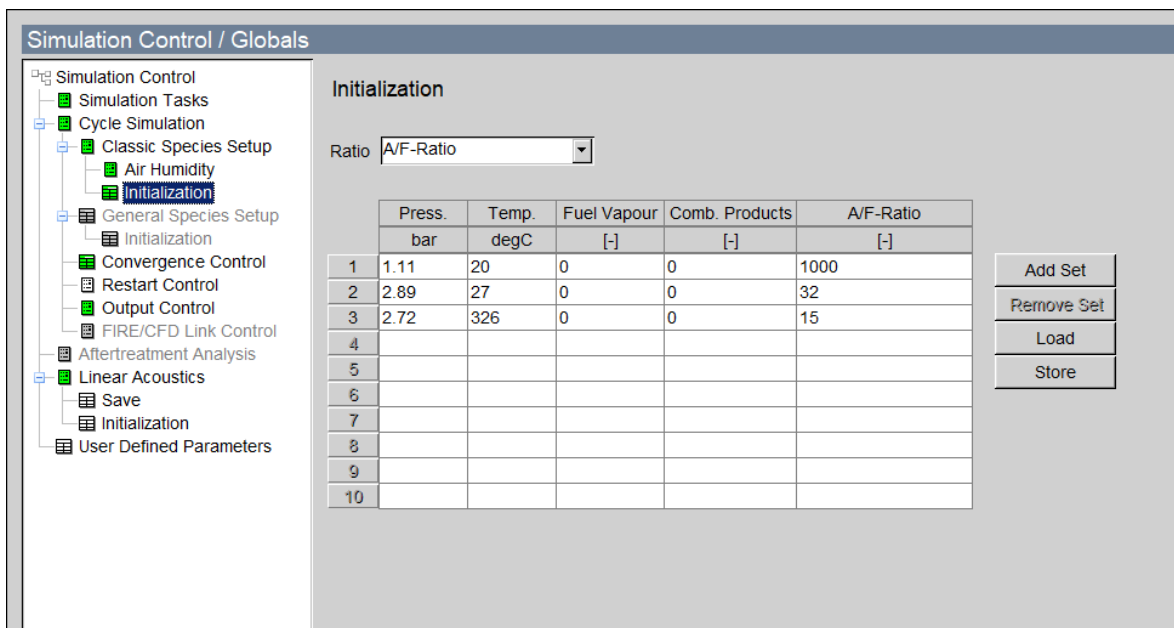
**Slika 16. Dizel**

Kao početno gorivo uzet je dizel s donjom ogrjevnom moći od 42940 kJ/kg. I stehiometrijskim omjerom zraka i goriva od 14,7. temperatura je standardna sobna temperatura od 25 stupnjeva Celzijusa.



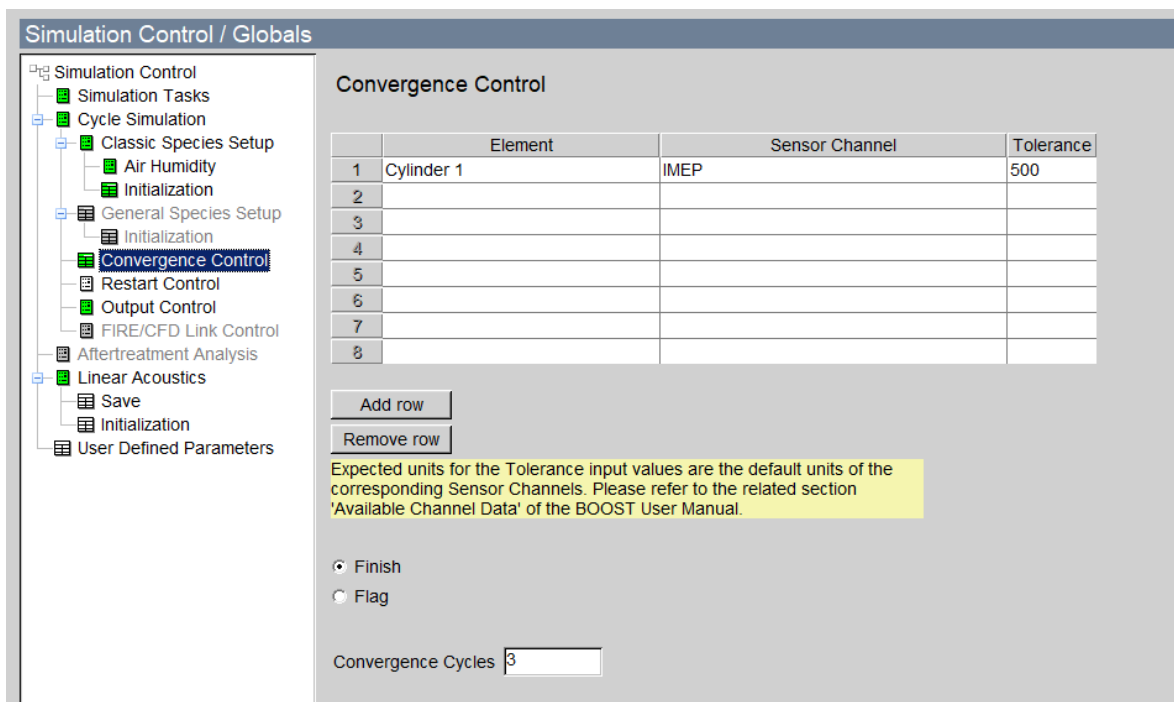
**Slika 17. Vlažnost zraka**

Uzeta je relativna vlažnost od 46% pri temperaturi od 25 stupnjeva Celzijusa i tlaku od 1 bar.



**Slika 18. Inicijalizacija**

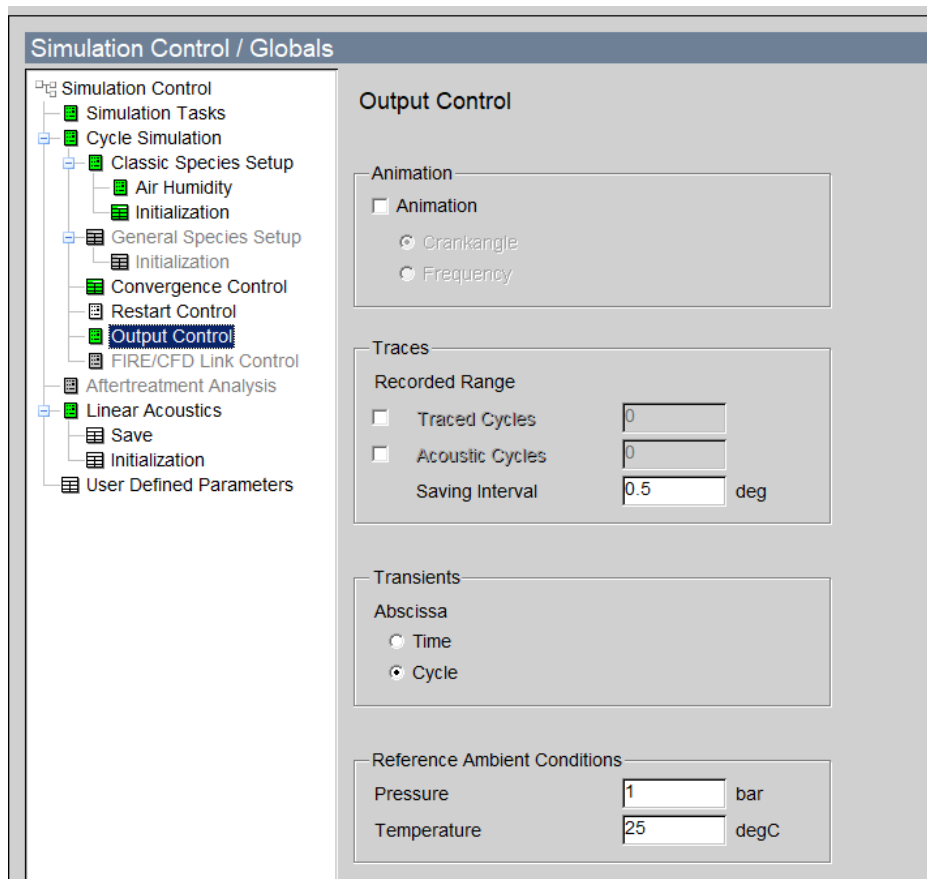
Inicijalizacijom su određene tri razine koje će nam poslije olakšati u izradi samog modela.



**Slika 19. Konvergencija**

Uključena je konvergencija, što znači da će se simulacija zaustaviti ako ima 3 ciklusa zaredom koja daju rezultat indiciranog tlaka s odstupanjima manjim od 500.



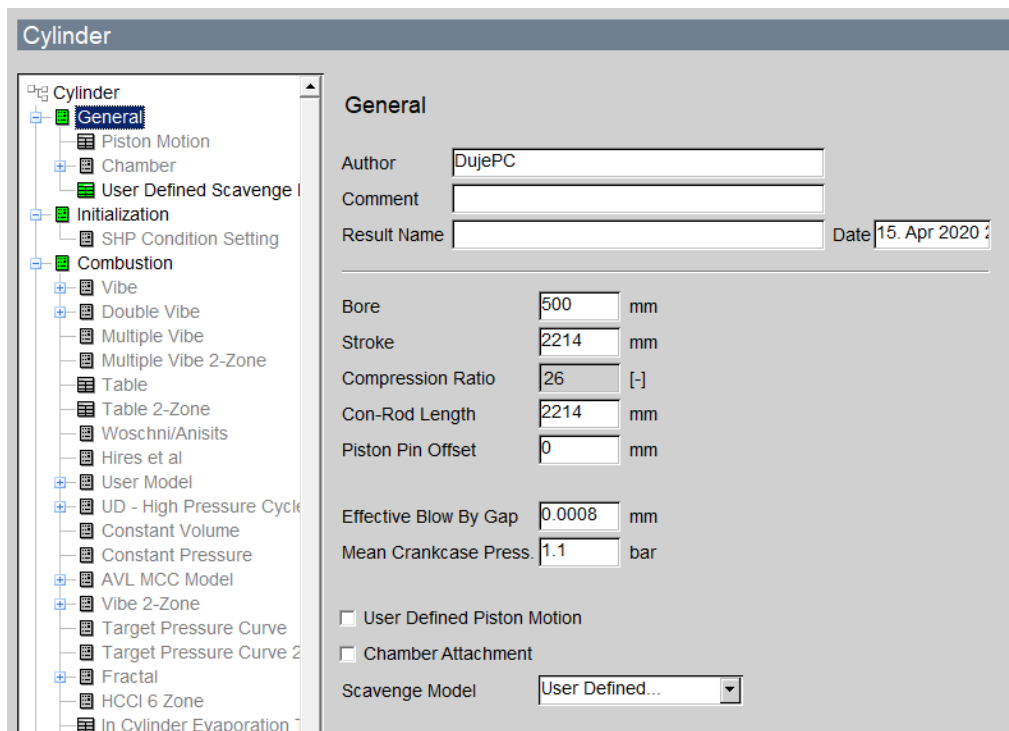


**Slika 20. Izlazna kontrola simulacije**

Rezultati se spremaju svako 0,5 stupnjeva kuta koljenastog vratila. Te je ambijentna temperatura 25 stupnjeva celzijusa i tlak je 1 bar.

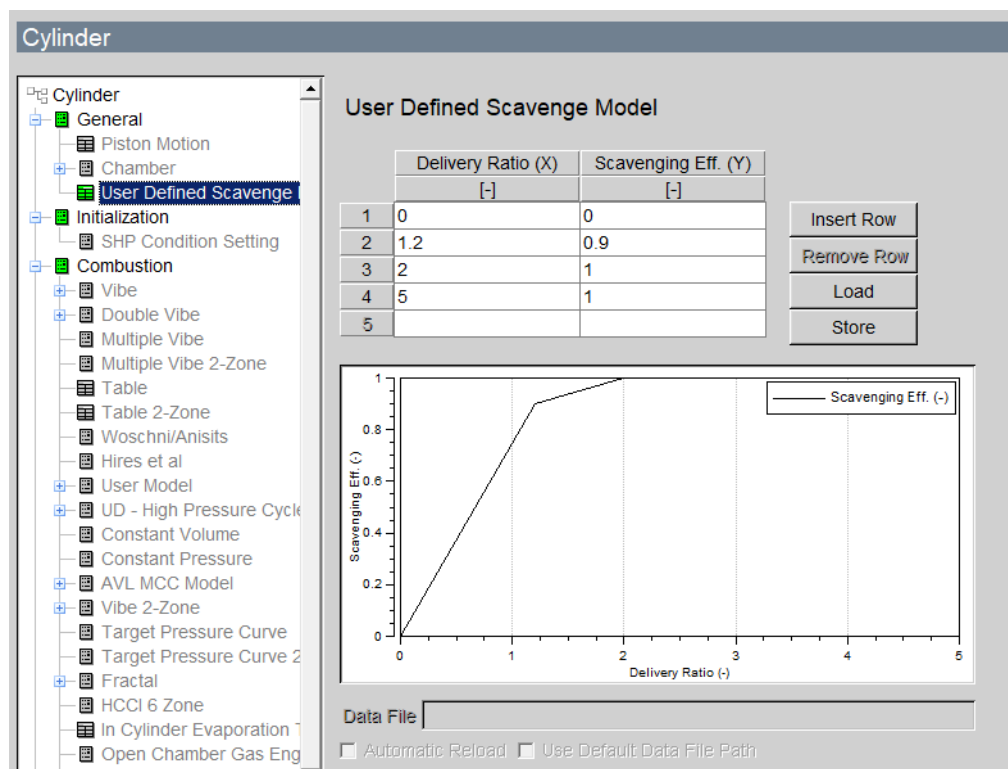
S time završava Simulacijska kontrola.

Daljnji odabir upisivanja podataka nije toliko važan. S tim da je Cilindar najteže za postaviti, pa će se u sklopu ovog rada započeti od njega.



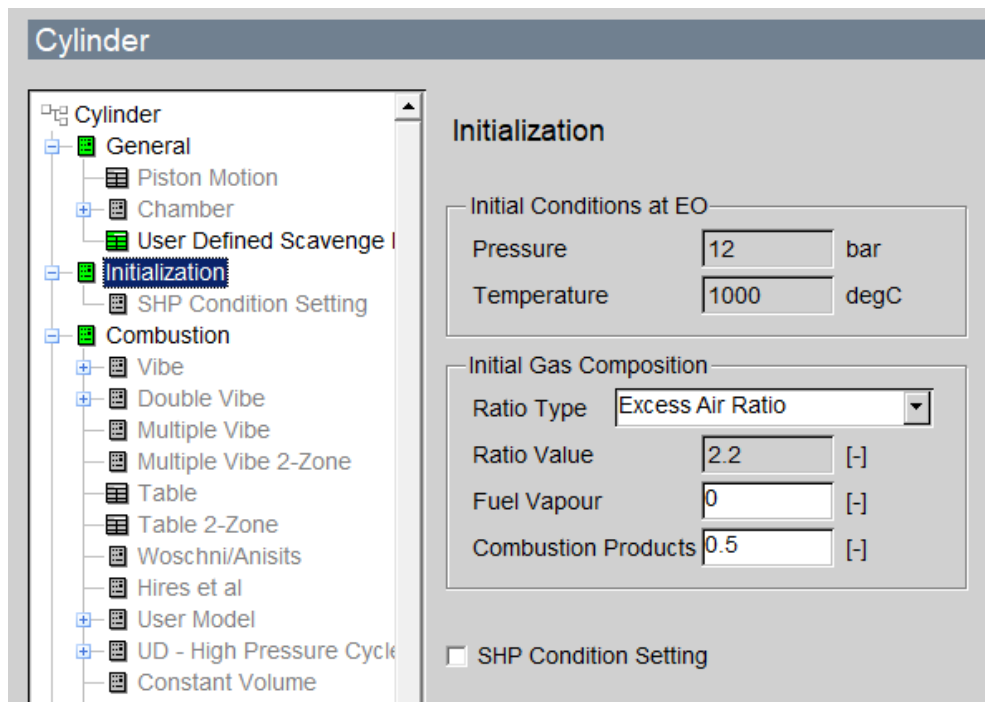
**Slika 21. Osnovne mjere motora**

Na slici 21 prikazani su osnovni podatci cilindra: promjer, stapaj, kompresijski omjer, duljina stapajice, razmak između stapa i cilindra, tlak.



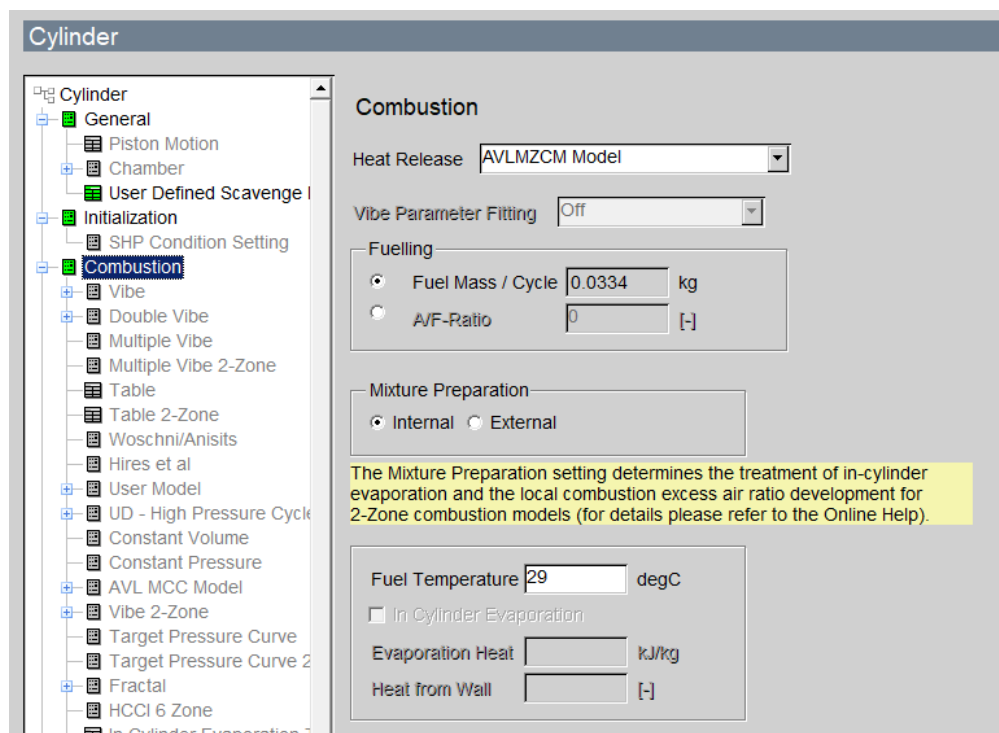
**Slika 22. Izmjena medija**

Na slici 22 prikazano je kako se obavlja izmjena medija kroz otvore u cilindru.



**Slika 23. Inicijalizacija cilindra**

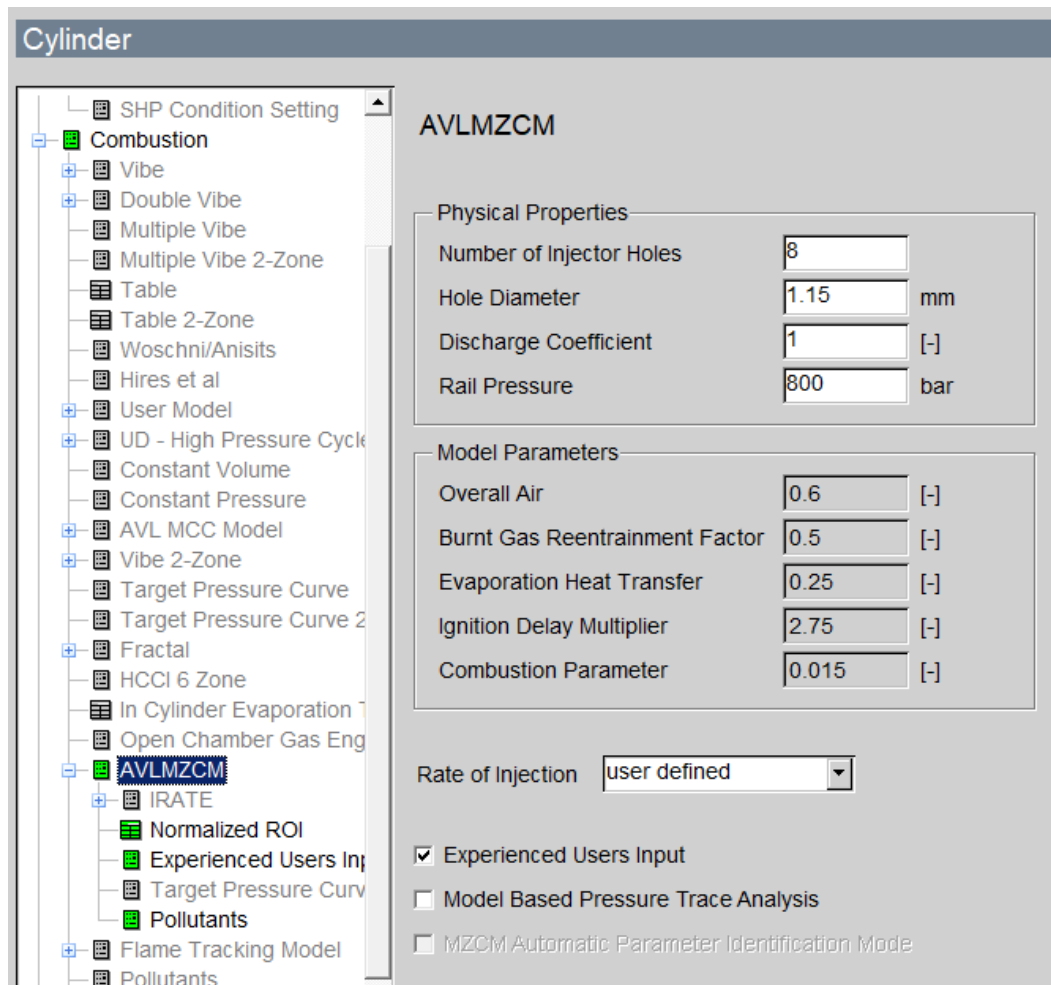
Inicijalizacija cilindra kaže kakvo je stanje u cilindru tijekom procesa s otvorenim ispuhom te koliki je pretičak zraka i količina izgorjenih produkata.



**Slika 24. Model izgaranja**

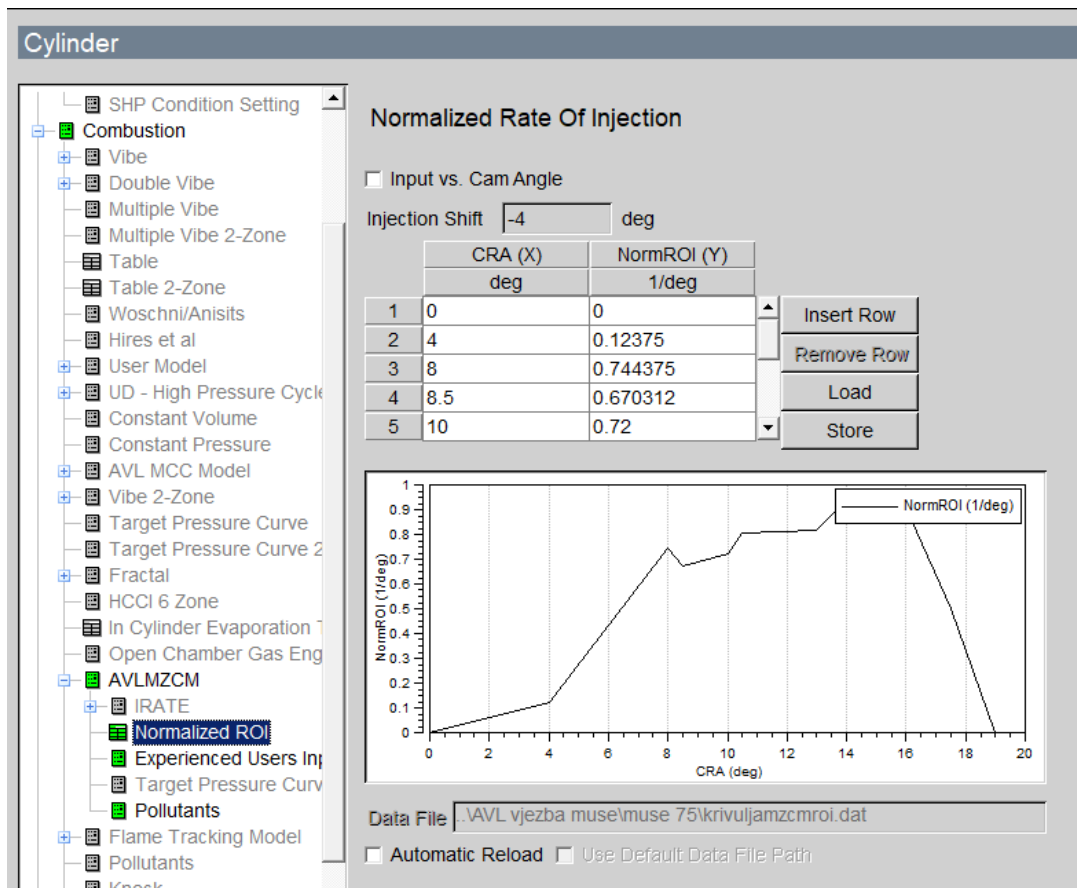
Na slici 24 vidi se kako je korišten AVLMZCM model i da se koristi 0,0334 kg goriva po jednom ciklusu, temperatura goriva je 29 stupnjeva Celzijusa, a miješanje zraka s gorivom

se odvija unutar cilindra. Da se stavi miješanje van cilindra, ne može se koristiti AVLMZCM model.



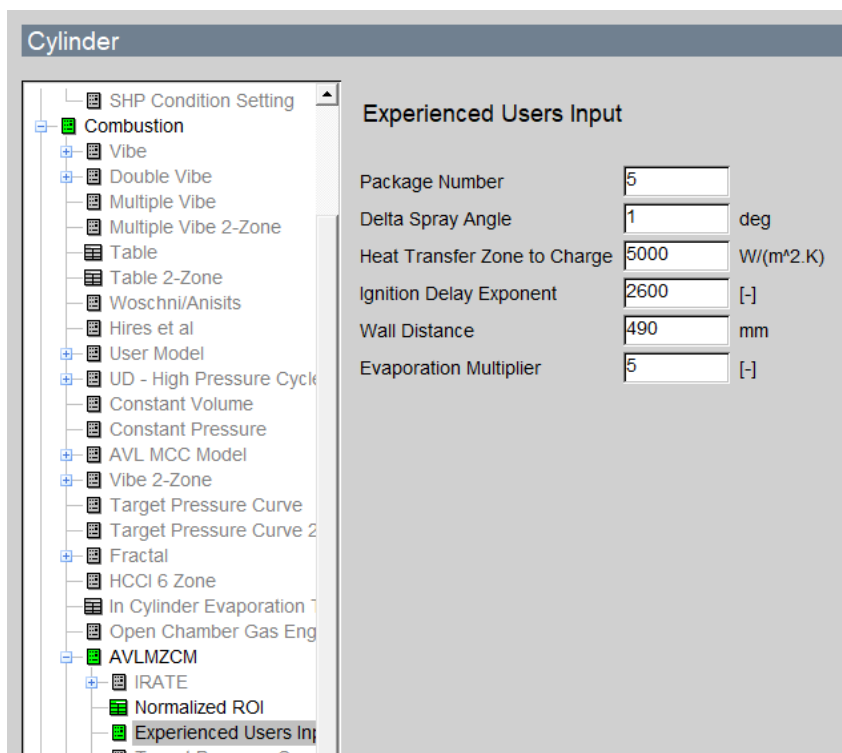
**Slika 25. Više-zonski model izgaranja**

Najvažniji podatci za simulaciju uspisani su pod „Model Parameters“ kao što je prikazano na slici 25. A poviše toga stoje osnovni podatci uzeti s motora.



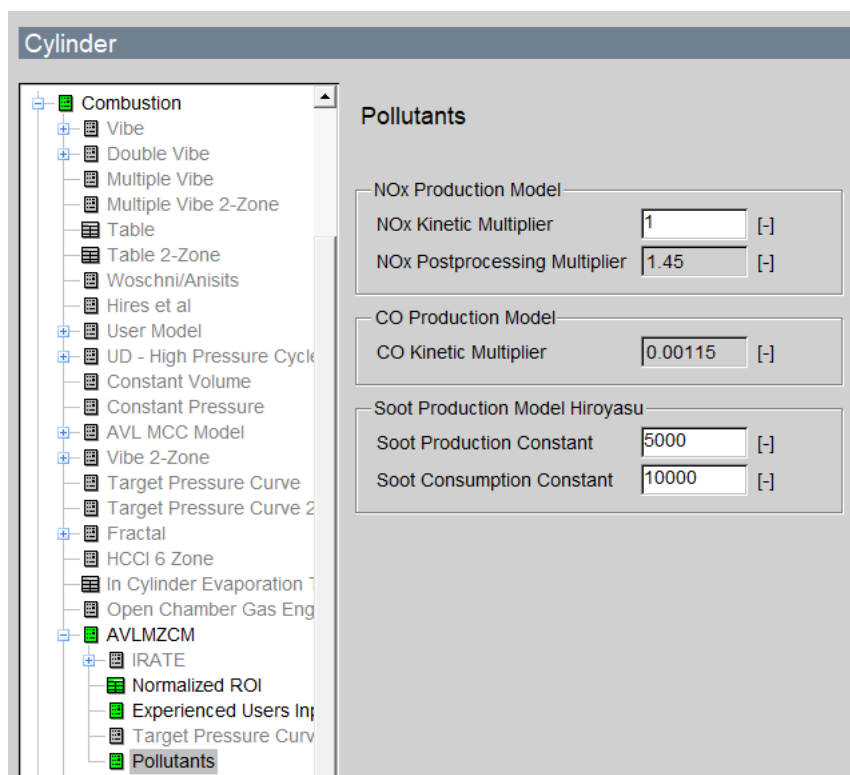
**Slika 26. Ubrizgavanje**

Slika 26 pokazuje kako izgleda graf ubrizgavanja goriva u cilindar, te da se početak ubrizgavanja goriva u cilindar obavlja na -4 stupnja koljenastog vratila od gornje mrtve točke.



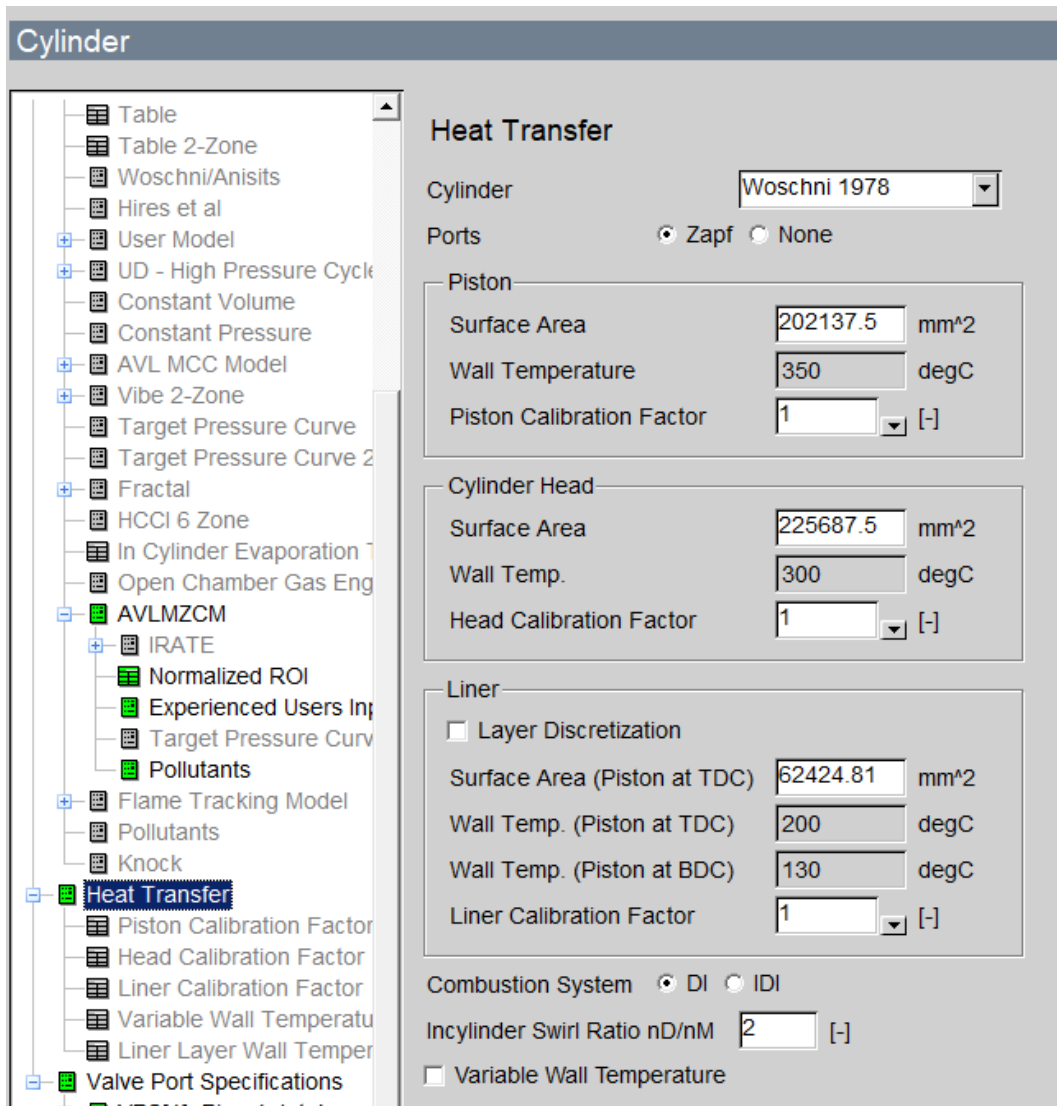
**Slika 27. Podatci ubrizgavanja za izračun**

Slika 27 predstavlja još neke fizičke podatke potrebne za izračun.



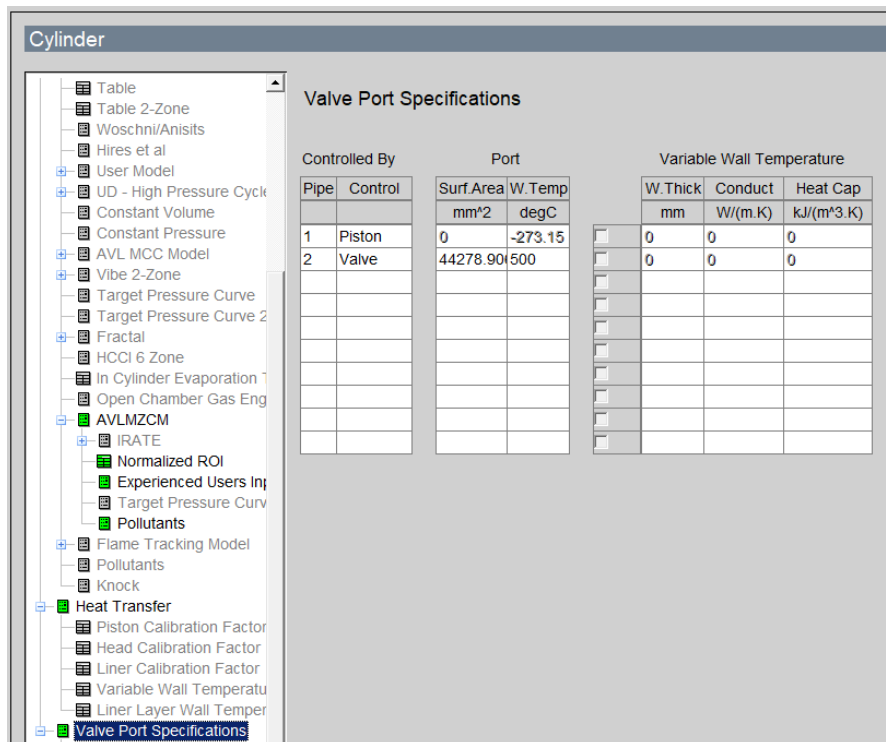
**Slika 28. Faktori emisija**

Na slici 28 se vide polutanti što su dušikovi oksidi NOx, ugljikov monoksid CO i čađa.



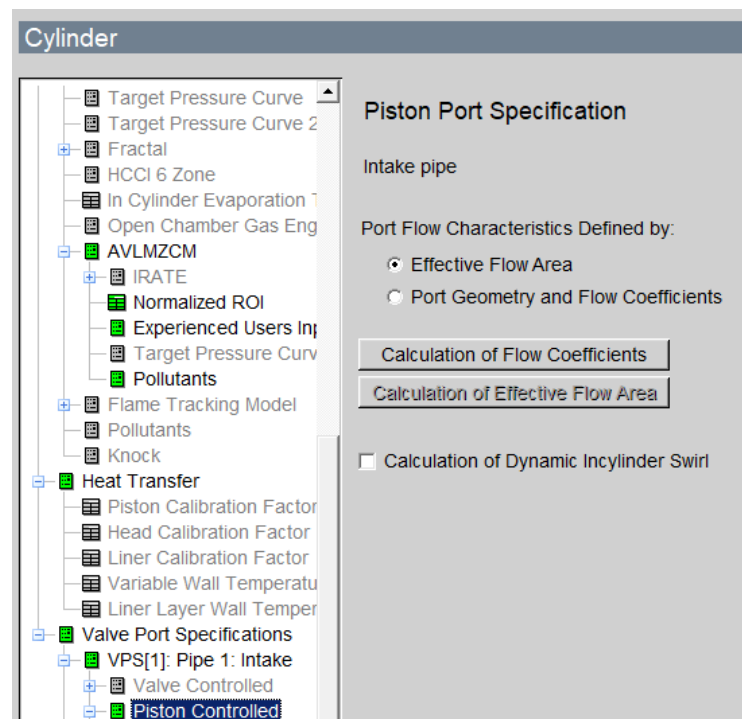
**Slika 29. Prijenos topline**

Način prijena topline uzet je po Woschni 1978 uz postavljene izmjerene vrijednosti uzete s motora.



Slika 30. Specifikacija ventila

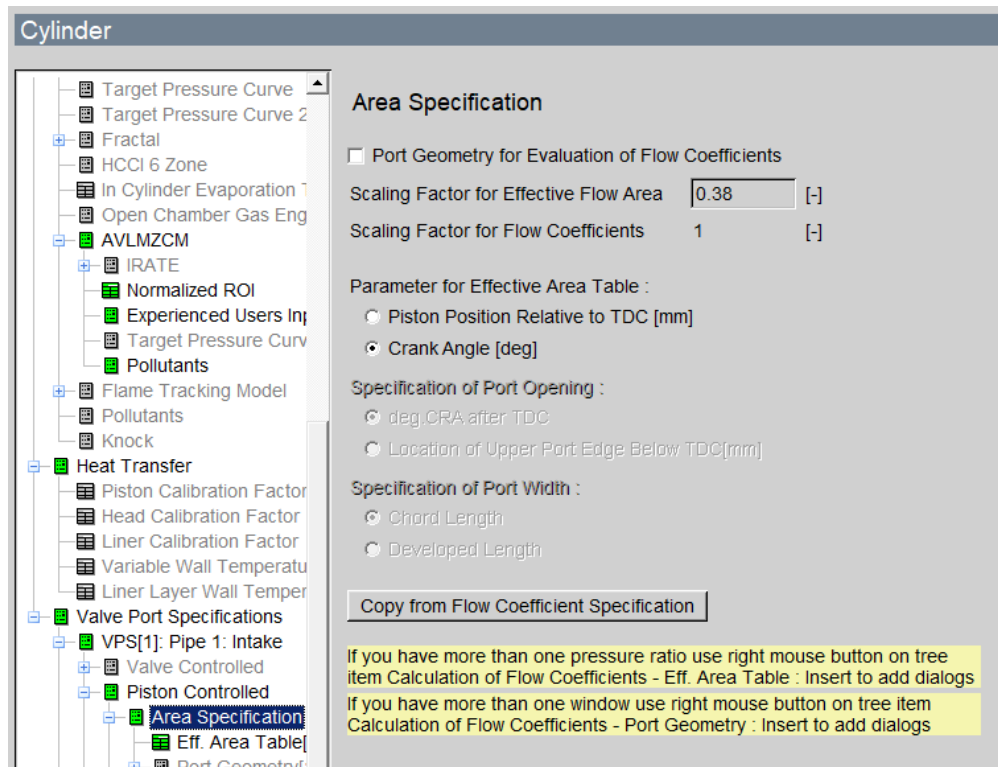
Specifikacija ventila je zapravo dokaz da se radi o stapu s otvorima na cilindru i ispušnim ventilima.



Slika 31. Usis zraka u cilindar

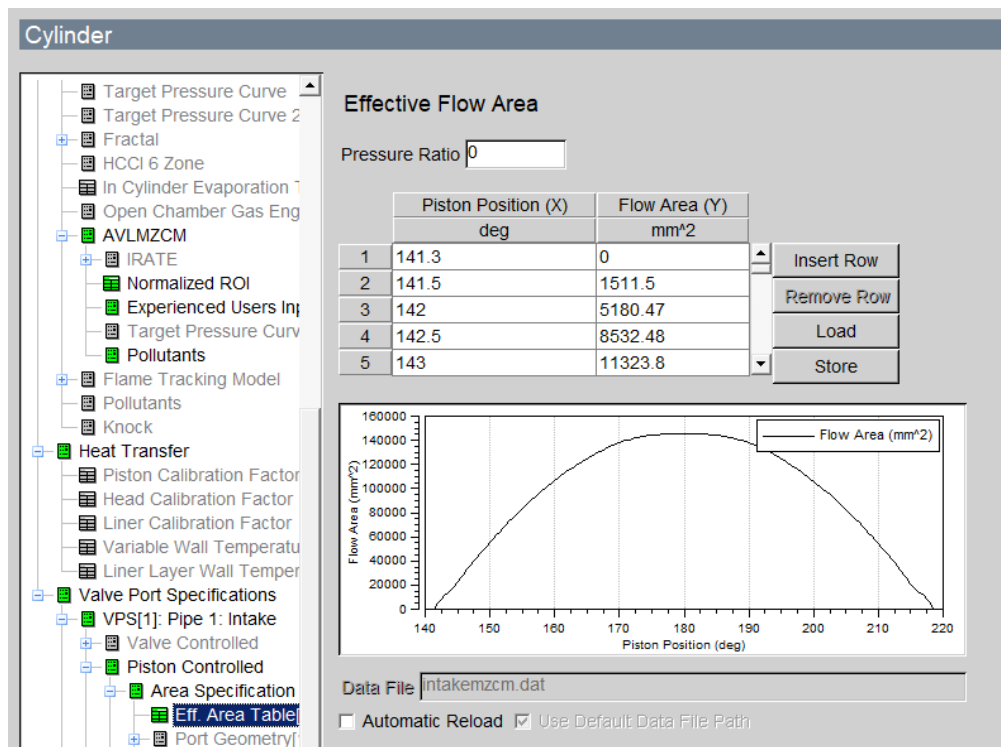
Usis se događa preko stapa.





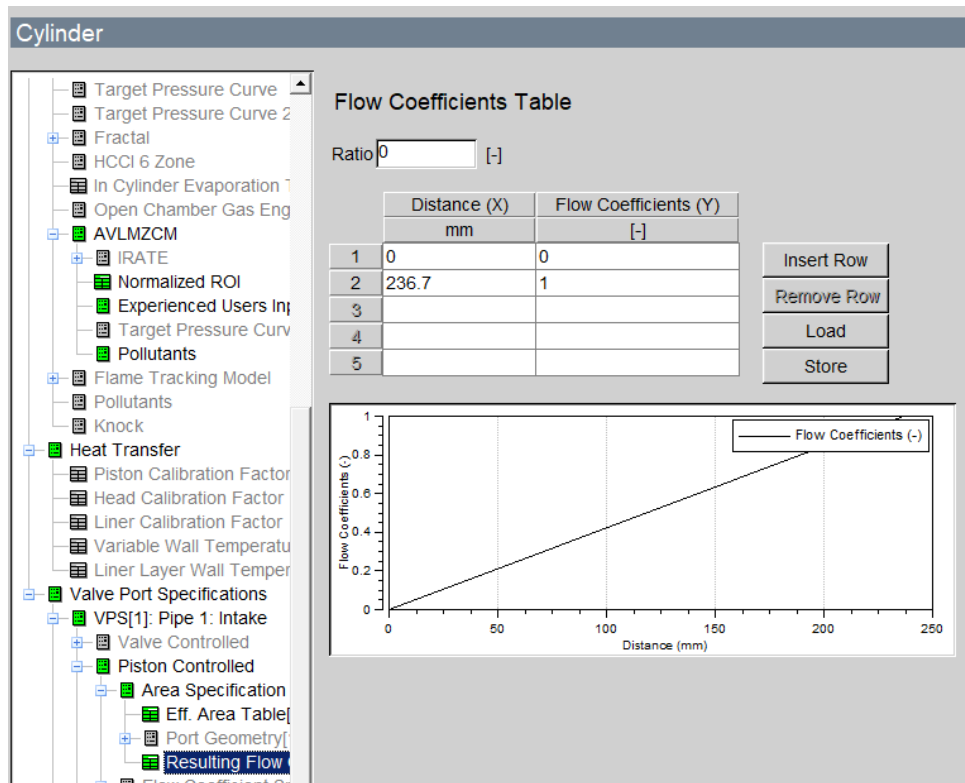
**Slika 32. Protok zraka**

Faktor protoka je 0,38, a tablica usisa ovisi o poziciji koljenastog vratila.



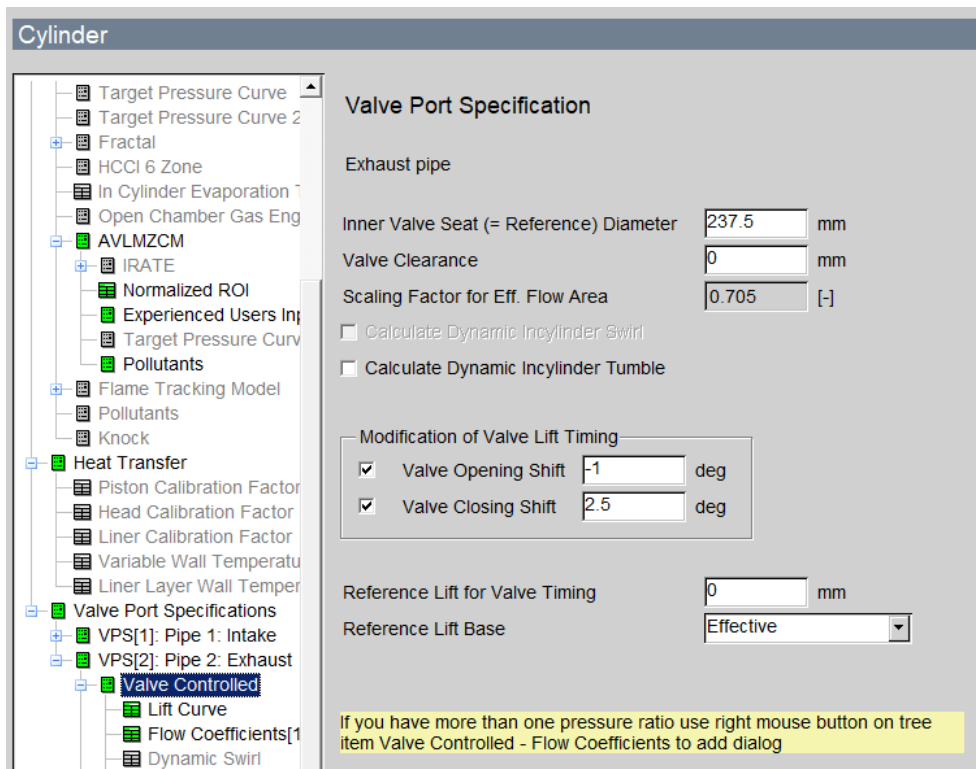
**Slika 33. Graf usisa zraka u cilindar**

Graf usisa kroz otvore u cilindru prema kutu koljenastog vratila.



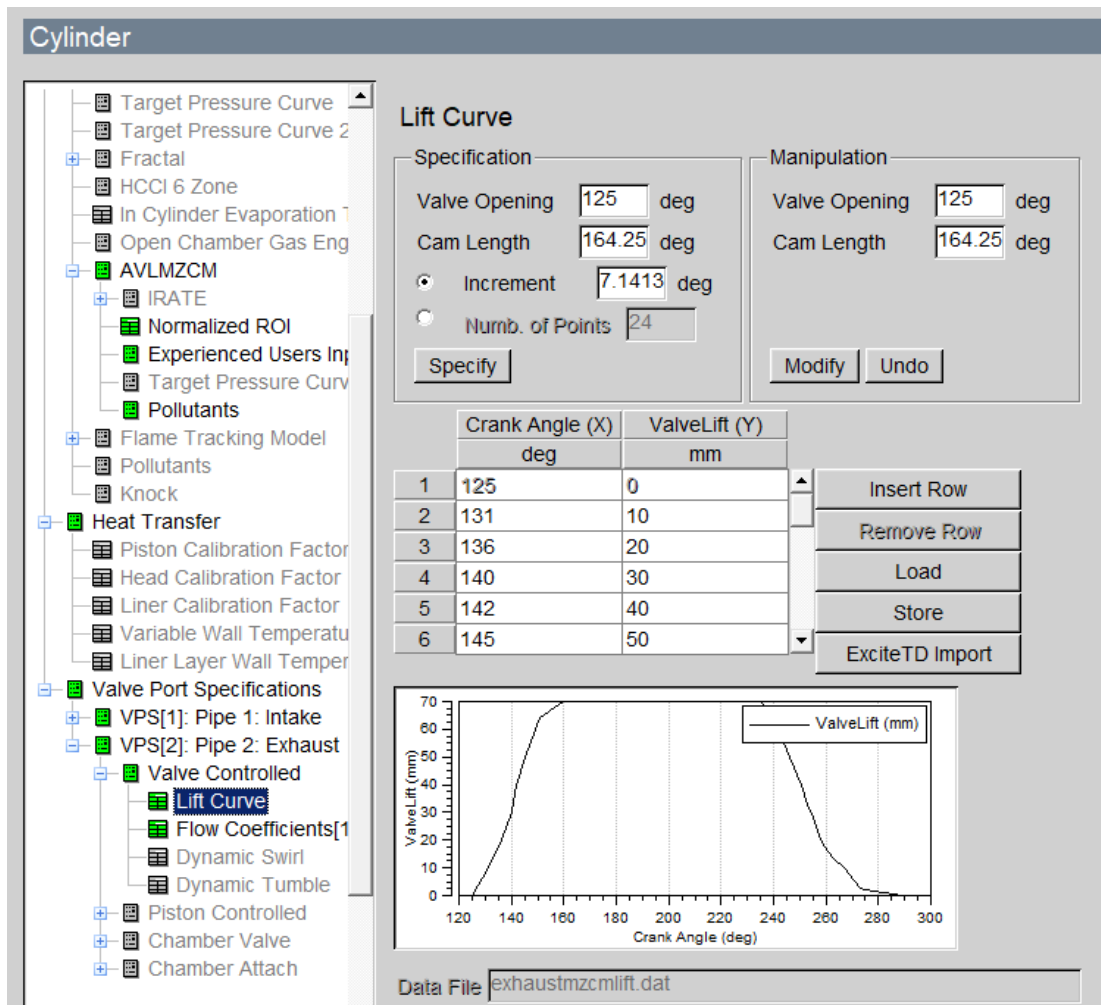
**Slika 34. Graf protoka zraka usisa u cilindar**

Graf protoka zraka od potpuno zatvorenih otvora do potpuno otvorenih otvora.



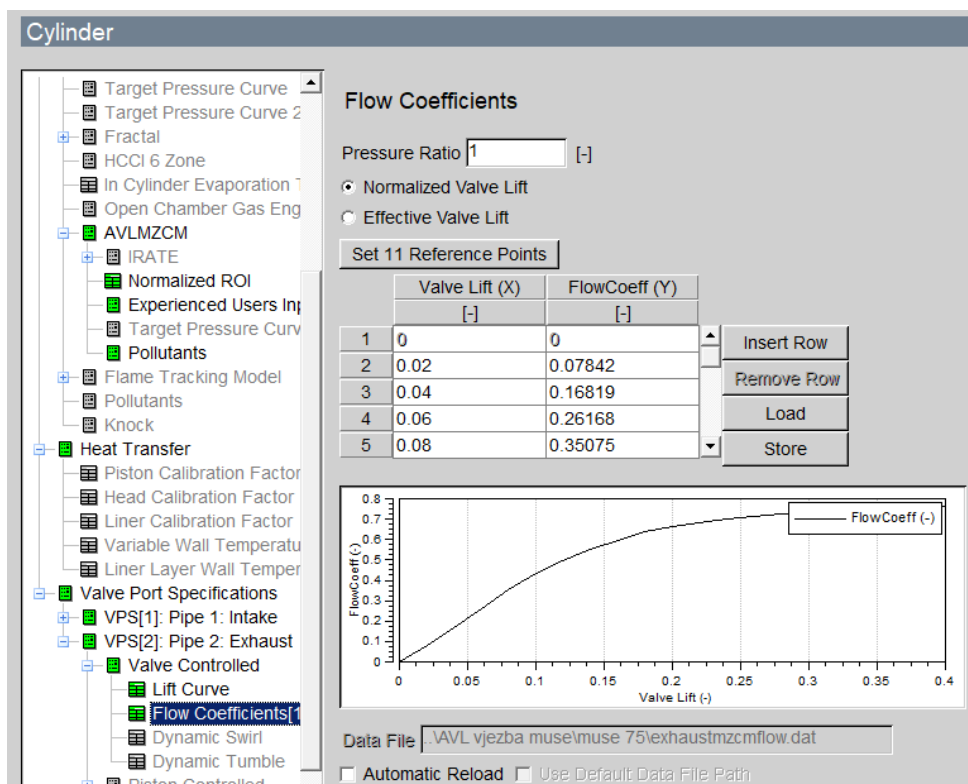
**Slika 35. Ispušni ventili**

Podatci za ispušne ventile gdje se vidi da se ispuh otvara pri -1 stupanj prije gornje mrtve točke a zatvara se pri 2,5 stupnjeva nakon gornje mrtve točke stapa.



**Slika 36. Otvaranje i zatvaranje ispušnih ventila**

Slika 36 prikazuje graf otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila.

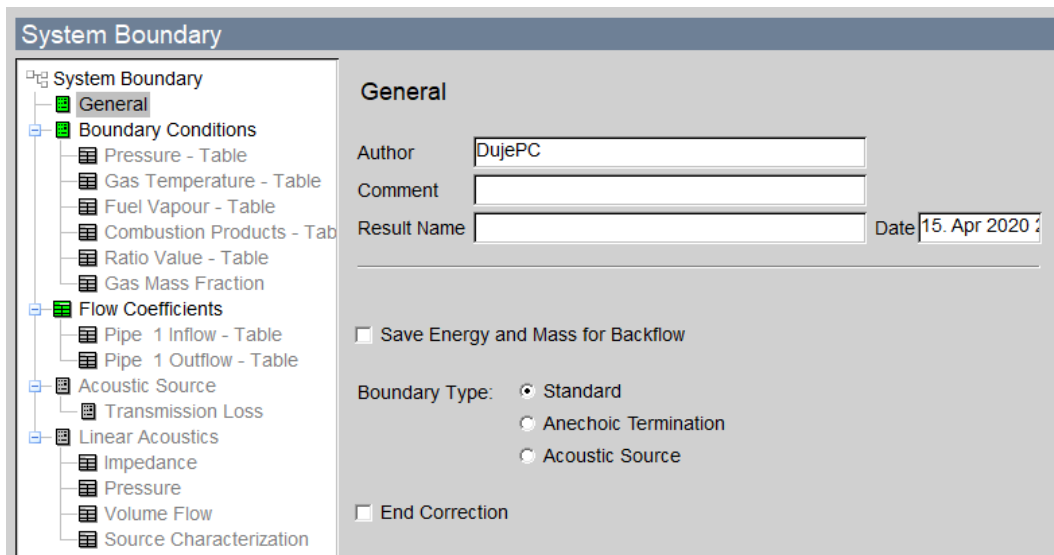


**Slika 37. Graf protoka zraka ispušnih ventila**

Slika 37 prikazuje protok kroz ispušne ventile.

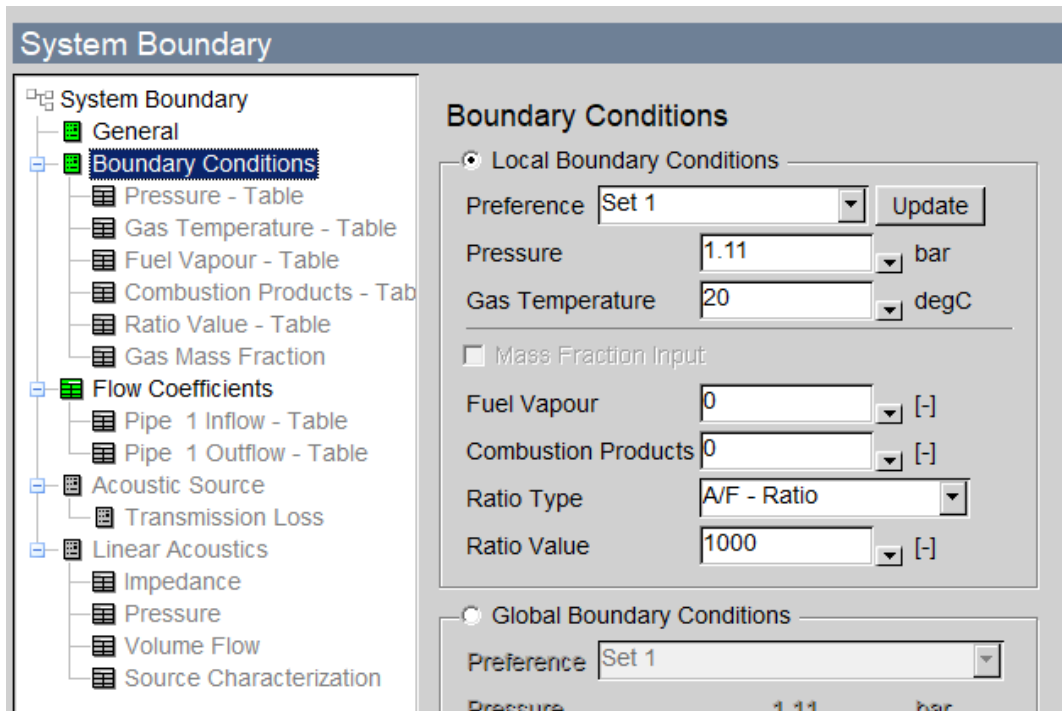
S time završava izrada modela cilindra.

Dalje će se definirati ulaz i izlaz samog sustava, to jest usis i ispuh:



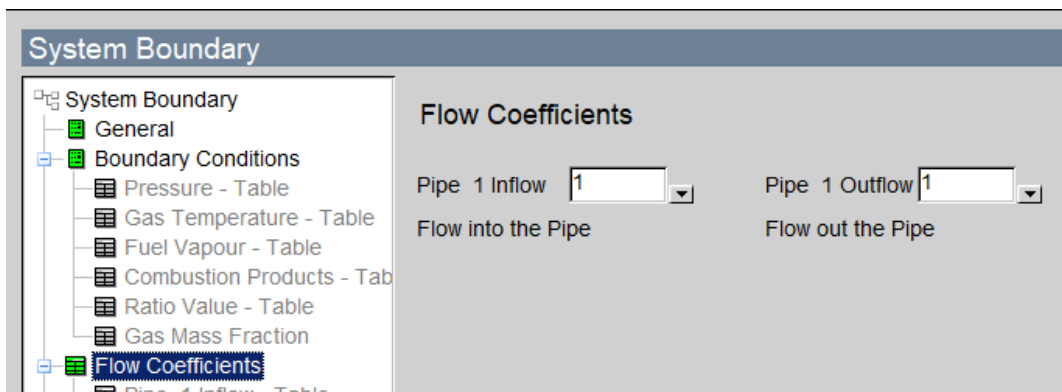
**Slika 38. Usis**

Uzima se standardni usis.



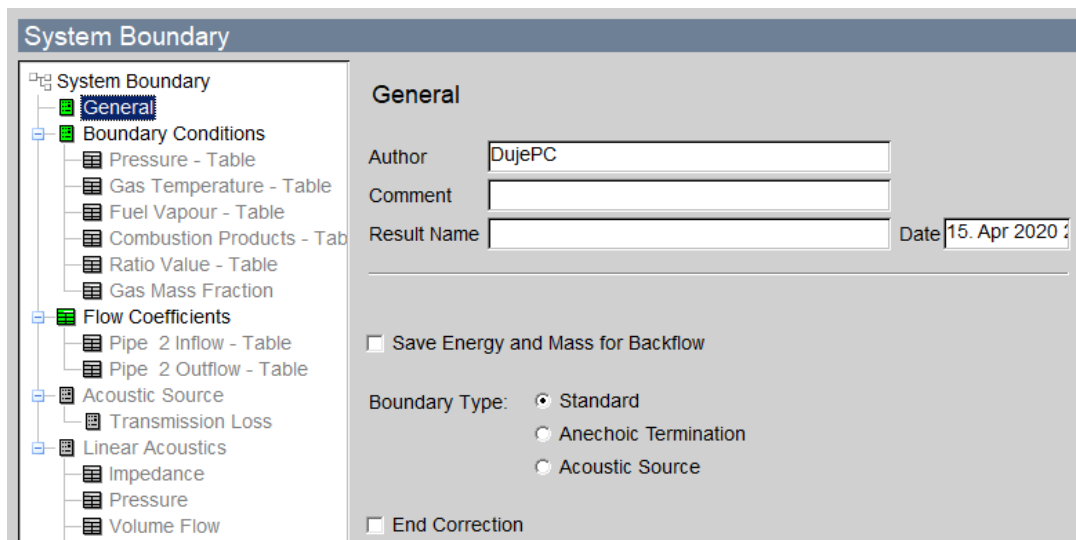
**Slika 39. Inicijalizacija usisa**

Koristi se inicijalizacija broj 1 gdje je temperatura usisnog zraka 20 stupnjeva Celzijusa pri tlaku od 1,11 bar-a.



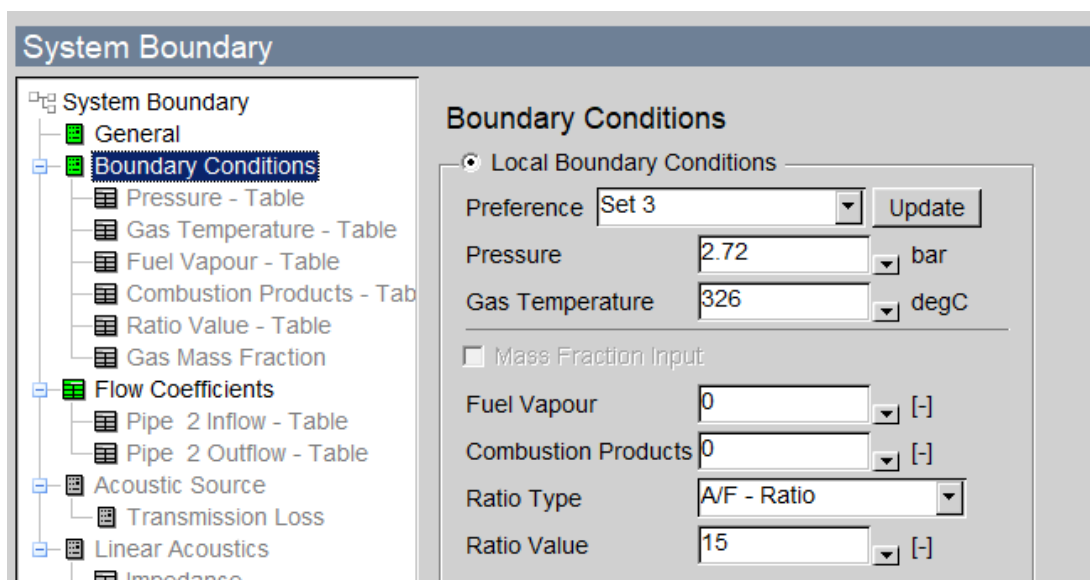
**Slika 40. Koeficijenti protoka usisa i cijevi**

Koeficijenti protoka od strane cijevi broj 1 su 1.



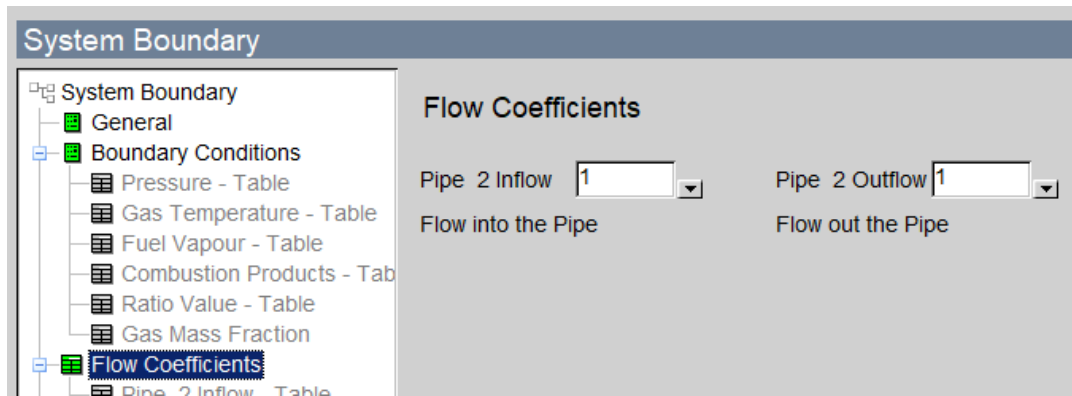
**Slika 41. Ispuh**

Ispuh je također standardan.



**Slika 42. Inicijalizacija ispuha**

Korištena je treća inicijalizacija gdje se vidi da je temperatura ispušnih plinova 326 stupnjeva Celzijusa i tlak je 2,72 bar-a.

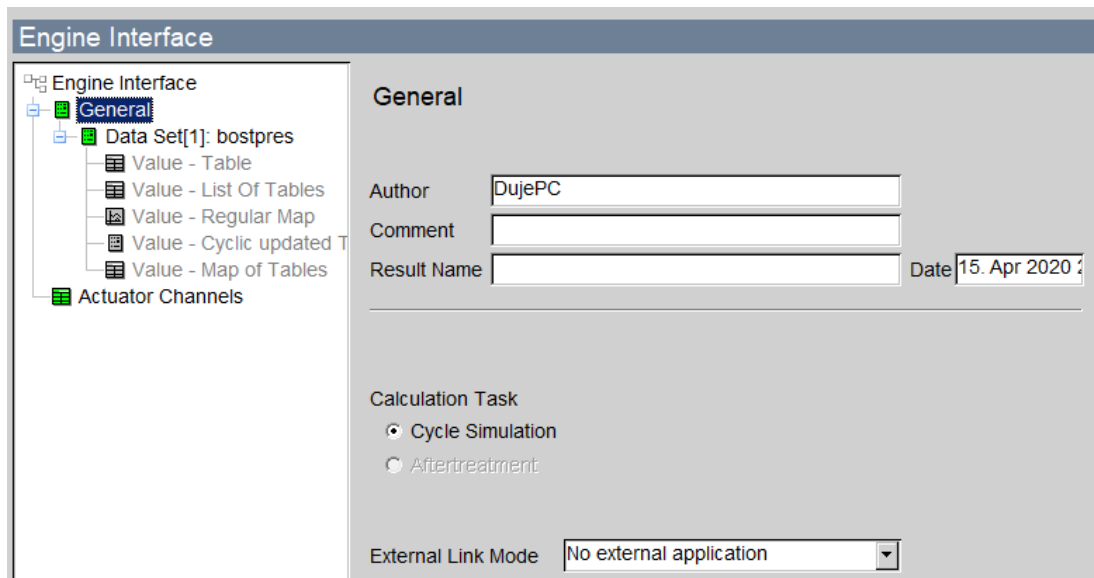


**Slika 43. Koeficijenti protoka ispuha i cijevi**

Koeficijenti od strane cijevi broj 2 su također 1.

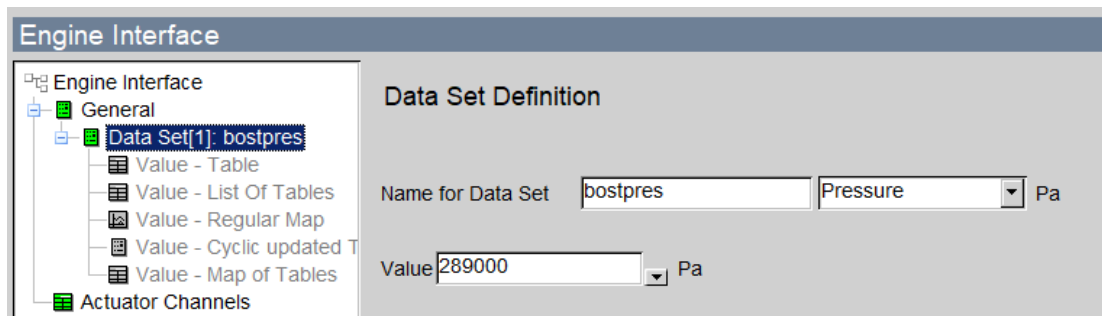
Tu završava modeliranje usisa i ispuha.

Prelazi se na modeliranje pojednostavljenog turbopuhala:



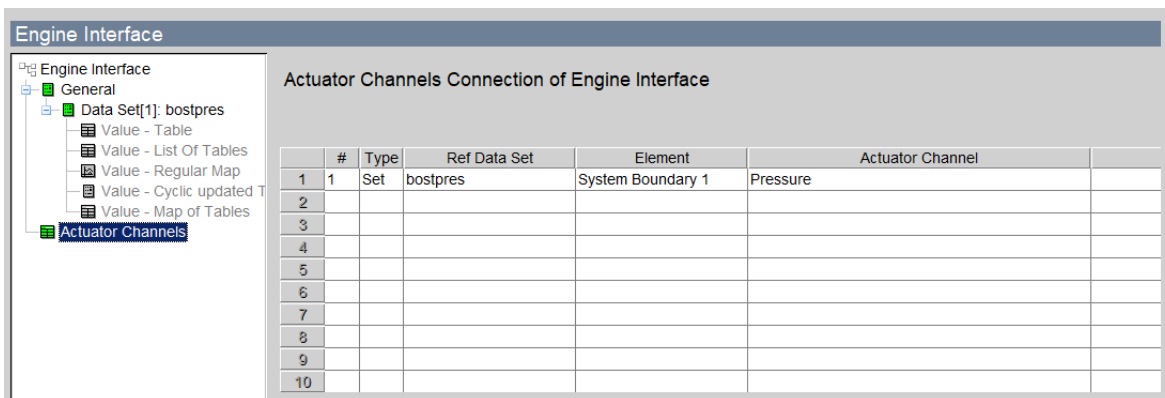
**Slika 44. Pojednostavljeno turbopuhalo**

Postavljena je ciklusna simulacija.



**Slika 45. Konstantni tlak turbopuhala**

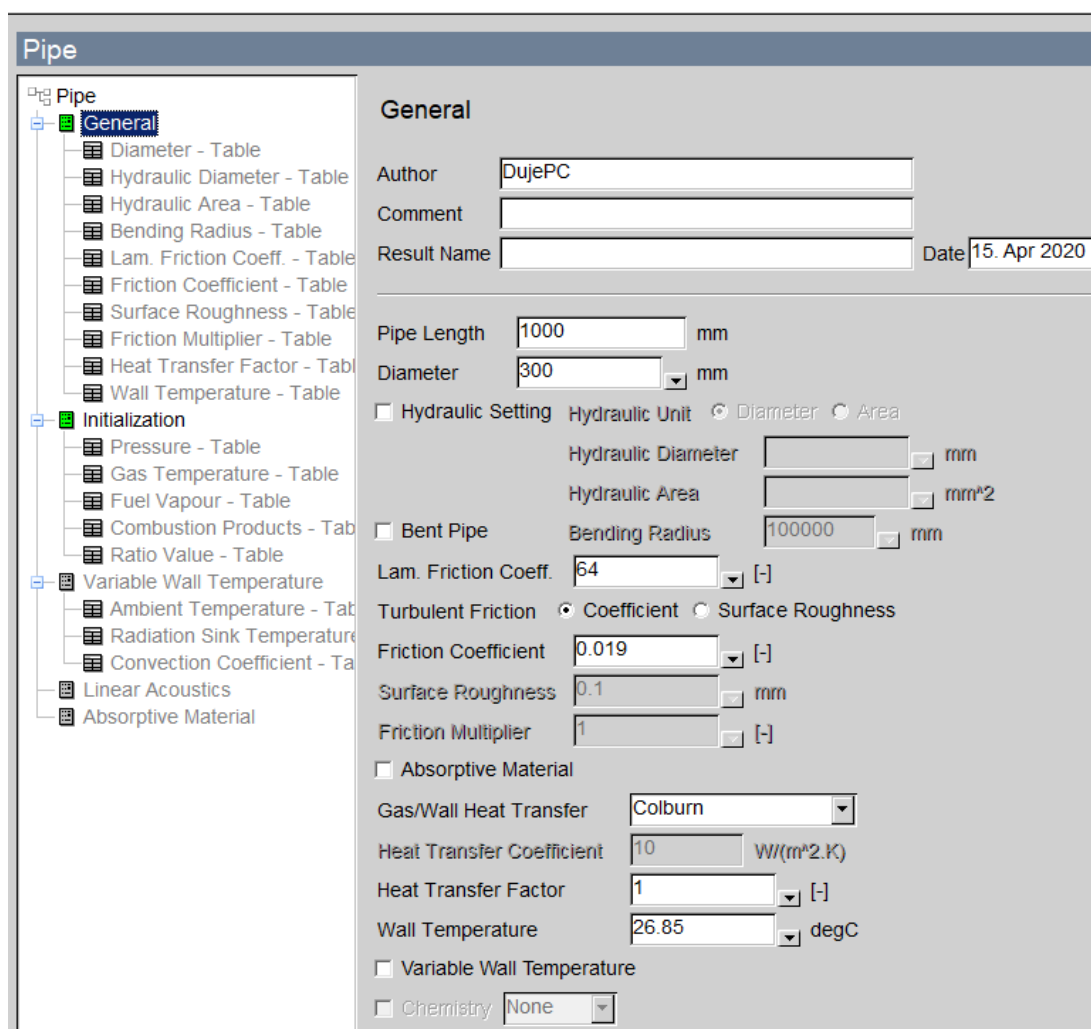
Postavljen je tlak kao konstanta od 289000 Pa.



**Slika 46. Aktuator postavljen na usis**

Te je označeno da se taj tlak odnosi na spoj s usisom, i na taj način se dobiva pojednostavljeno turbopuhalo koje daje tlak od 28,9 bara.

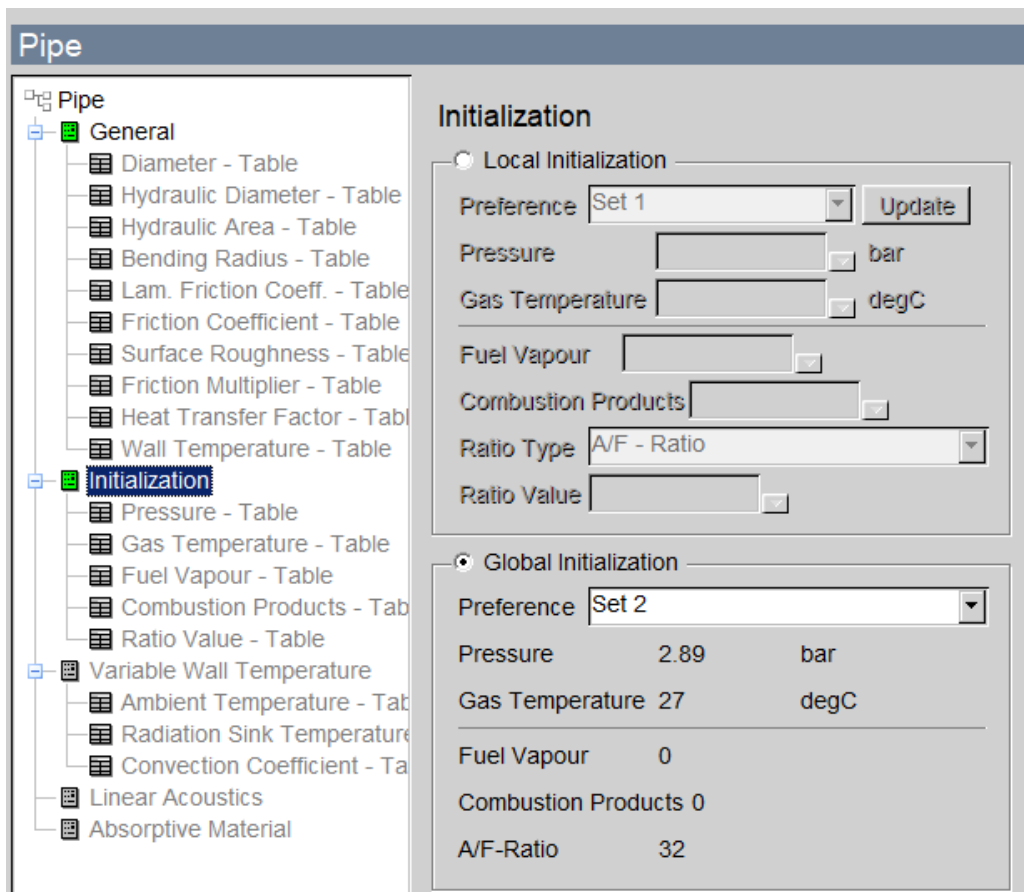
Prelazi se na modeliranje cijevi:



**Slika 47. Općenite veličine pojednostavljene cijevi usisa**

Cijevi su također pojednostavljene, te se vidi da je cijev 1 duga 1 metar s promjerom 300 mm.





**Slika 48. Inicijalizacija cijevi usisa**

Inicijalizacija cijevi 1 je inicijalizacija 2 što znači da je to nakon što je turbopuhalo nadtlučilo zrak.

**Pipe**

- Pipe
  - General
    - Diameter - Table
    - Hydraulic Diameter - Table
    - Hydraulic Area - Table
    - Bending Radius - Table
    - Lam. Friction Coeff. - Table
    - Friction Coefficient - Table
    - Surface Roughness - Table
    - Friction Multiplier - Table
    - Heat Transfer Factor - Table
    - Wall Temperature - Table
  - Initialization
    - Pressure - Table
    - Gas Temperature - Table
    - Fuel Vapour - Table
    - Combustion Products - Table
    - Ratio Value - Table
  - Variable Wall Temperature
    - Ambient Temperature - Table
    - Radiation Sink Temperature
    - Convection Coefficient - Table
  - Linear Acoustics
  - Absorptive Material

### General

Author: DujePC  
 Comment:   
 Result Name:   
 Date: 15. Apr 2020

Pipe Length: 3000 mm  
 Diameter: 300 mm

Hydraulic Setting    Hydraulic Unit:  Diameter     Area

Hydraulic Diameter:   
 Hydraulic Area:   
 Bent Pipe    Bending Radius: 100000 mm

Lam. Friction Coeff.: 64 [-]  
 Turbulent Friction:  Coefficient     Surface Roughness

Friction Coefficient: 0.019 [-]  
 Surface Roughness: 0.1 mm  
 Friction Multiplier: 1 [-]

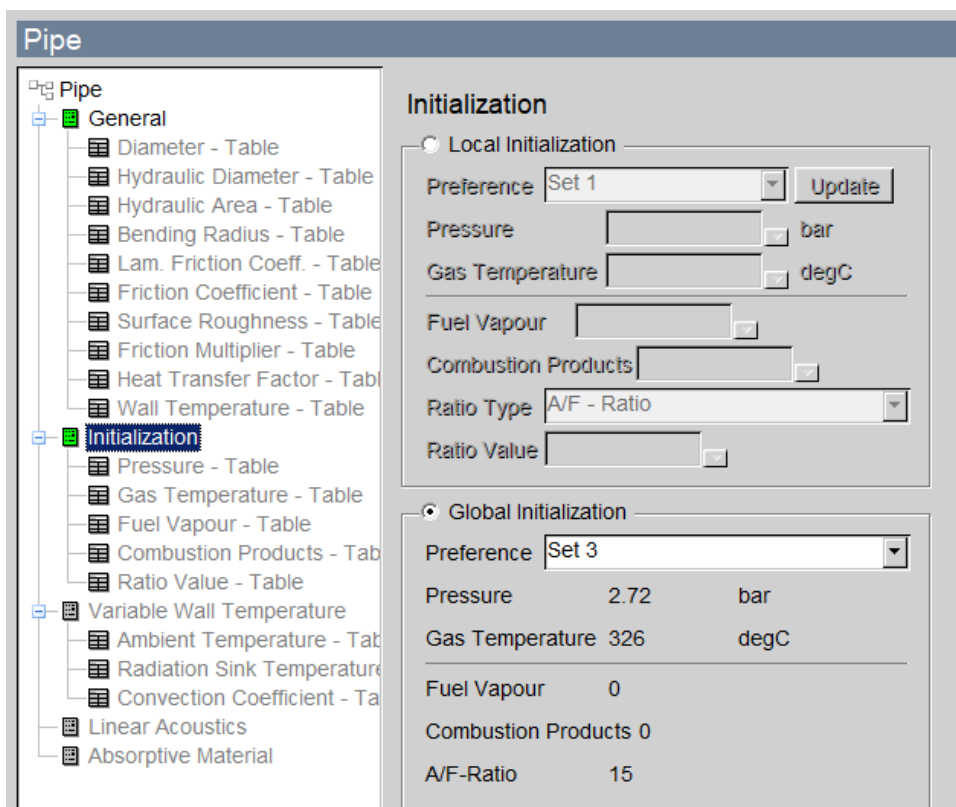
Absorptive Material

Gas/Wall Heat Transfer: Colburn  
 Heat Transfer Coefficient: 10 W/(m<sup>2</sup>.K)  
 Heat Transfer Factor: 1 [-]  
 Wall Temperature: 26.85 degC

Variable Wall Temperature  
 Chemistry: None

**Slika 49. Općenite veličine pojednostavljene cijevi ispuha**

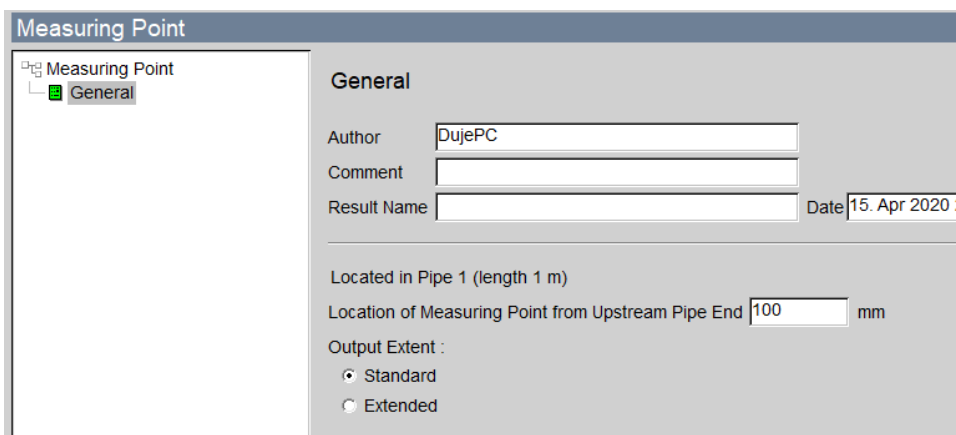
Cijev 2 je duljine 3 metra te je također promjer stavljen 300 mm.



**Slika 50. Inicijalizacija cijevi ispuha**

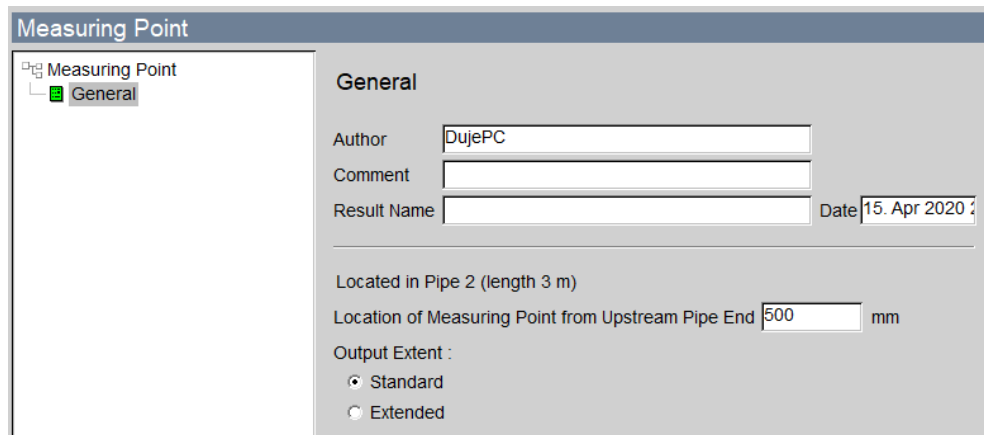
Inicijalizacija cijevi 2 je logično inicijalizacija 3 jer je to atmosfera nakon cilindra.

Slijede 2 mjerne točke:



**Slika 51. Mjerna točka 1**

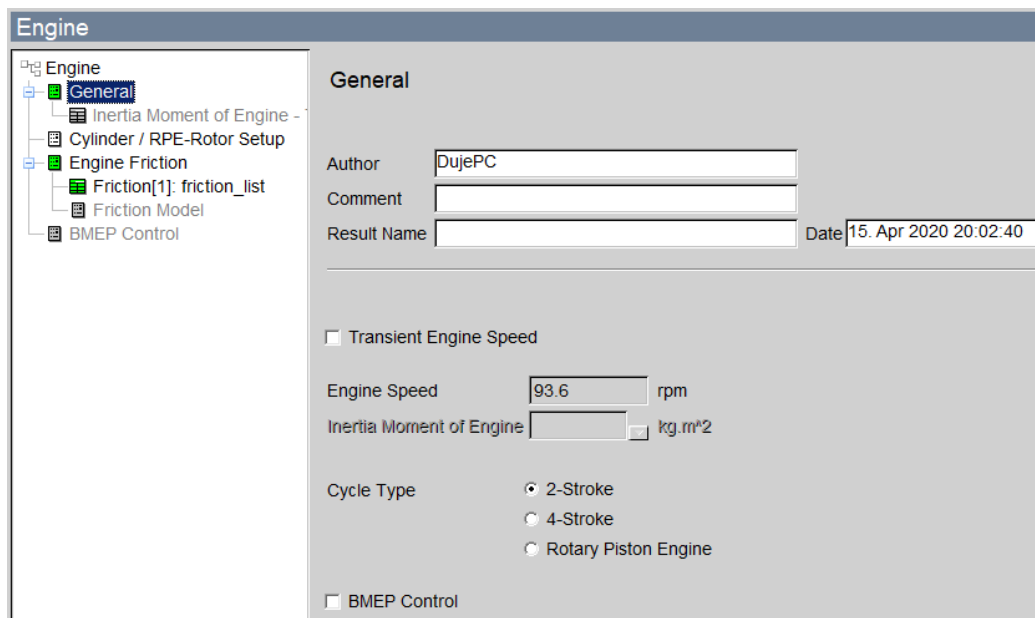
Mjerna točka 1 nalazi se 100 mm od početka sustava.



**Slika 52. Mjerna točka 2**

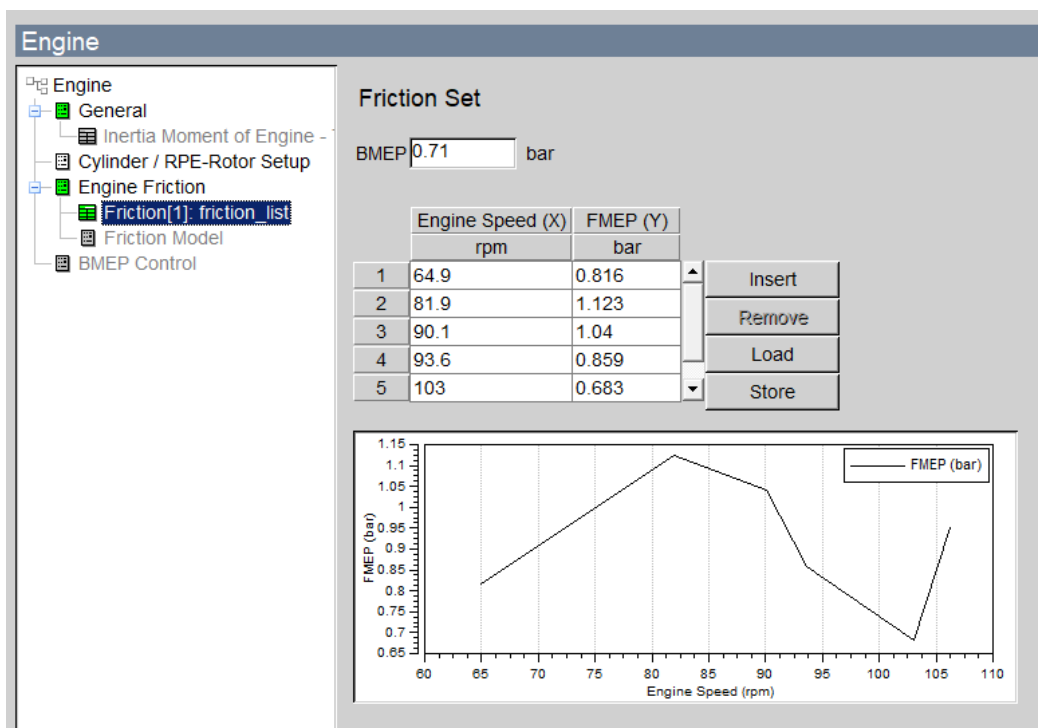
Mjerna točka 2 nalazi se na 500 mm udaljena od cilindra.

Preostaje još samo modelirati motor:



**Slika 53. Motor**

Motor je dakle dvotaktni s konstantnim 93,6 okretaja u minuti.



**Slika 54. Trenje motora**

Trenje je tablično kao što je prikazano na grafu.

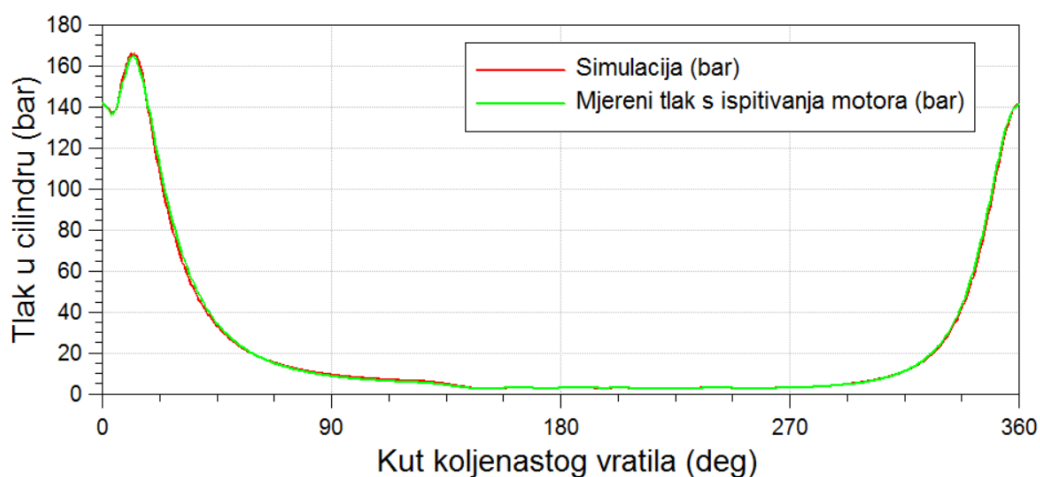
### 7.3. Validacija modela

Nakon izrade modela, model se treba kalibrirati na način da se određene stavke unutar modela proglase parametrima. Najvažnije je podesiti točnu količinu ubrizganog goriva, te maseni protok zraka. Model je validiran nakon što se u rezultatima simulacija dobiju tlakovi u cilindru koji su približni ili jednaki tlakovima s ispitivanja motora.

**Tablica 3. Tablica parametara [19]**

Korekcijski faktor protoka zraka na usisu	0.38
Korekcijski faktor protoka plinova na ispuhu	0.705
Kut početka ubrizgavanja	-4 °KV
Tlačni profil i trajanje ubrizgavanja	Prikazan na slici 57.
Količina goriva po ciklusu	0.0334 kg/ciklusu
Kut otvaranja ispušnog ventila	124 °KV
Kut zatvaranja ispušnog ventila	291.75 °KV
Korekcijski faktor dobave zraka do mlaza goriva	0.6
Korekcijski faktor povrata izgorenog plina u mlaz goriva	0.5

Korekcijski faktor isparavanja goriva i prijenosa topline između zona mlaza	0.25
Korekcijski faktor zakašnjenja paljenja	2.75
Korekcijski faktor parametra izgaranja	0.015
NOx korekcijski faktor	1.45
CO korekcijski faktor	0.00115



**Slika 55. Usporedba ispitivanog motora i simulacije [19]**

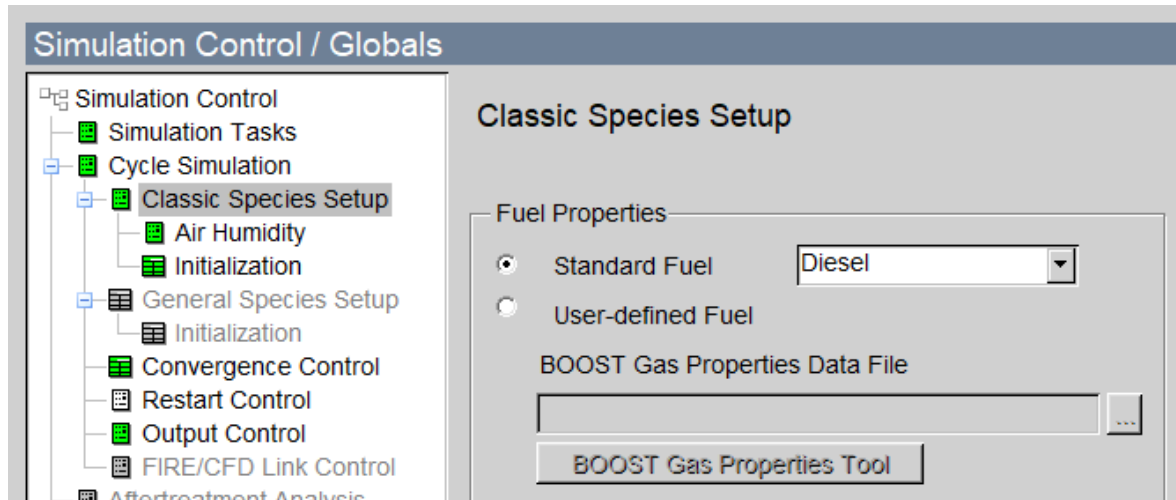
Na slici se vidi da su tlakovi dobiveni simulacijama približno jednaki tlakovima s ispitivanja motora, što znači da je ovaj model validiran.

**Tablica 4. Tablica usporedbe rezultata simulacije i podataka dobivenim mjerenjem na motoru [19]**

Rezultati	Simulacija	Mjerenja	Odstupanje %
Srednji indicirani tlak (bar)	15.96	15.99	0.19%
Efektivna Snaga (kW)	6138	6505	5.65%
Specifična efektivna potrošnja goriva (g/kWh)	173.5	164.21	5.36%
Maksimalni tlak u cilindru (bar)	166.23	166	0.139%

## 7.4. Mijenjanje vrste goriva

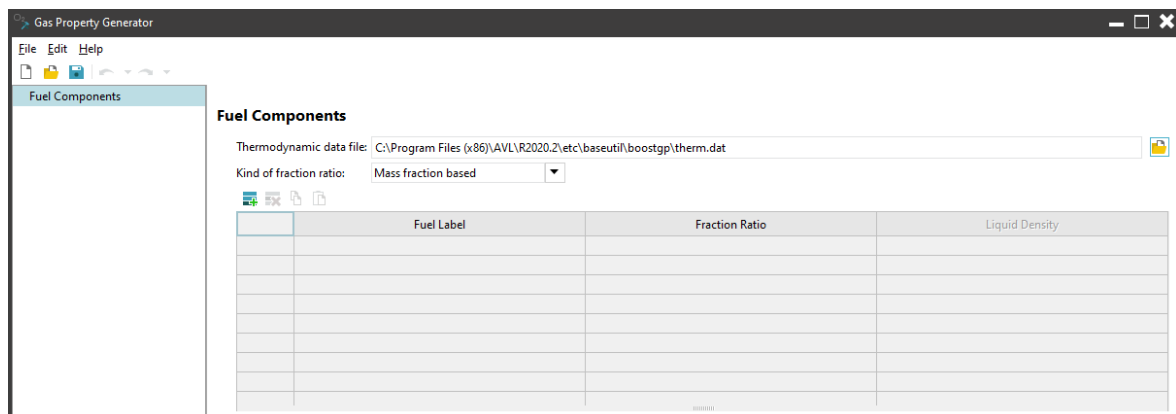
Kako bi se promijenila vrsta goriva koja se ubacuje u cilindar potrebno je unutar Simulacijske kontrole promijeniti vrstu goriva, koja se mijenja na dva različita načina.



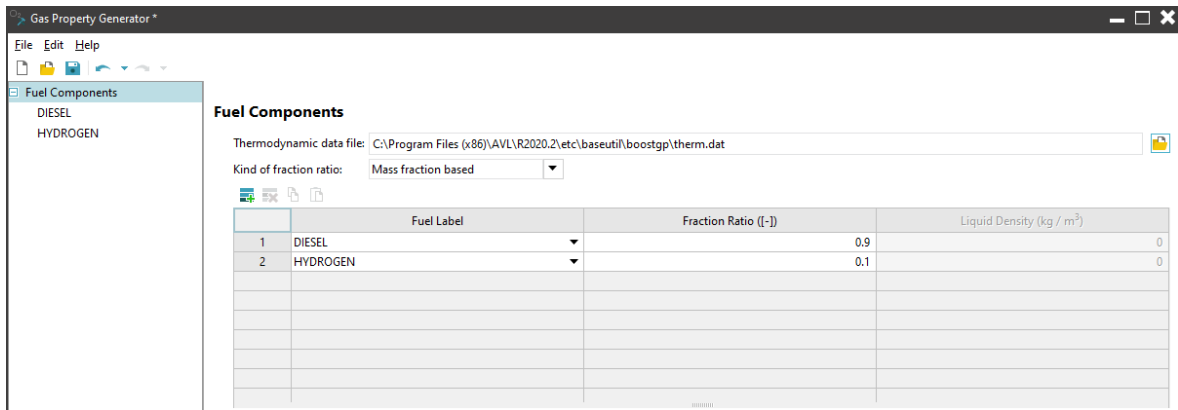
Slika 56. Vrsta goriva

Kao prvo mora se znati da se za mijenjanje vrste goriva koja se direktno ubrizgava u cilindar i gdje se miješanje zraka i goriva odvija u cilindru, mora koristiti *Classic Species Setup* (klasični odabir).

AVL Boost je tokom dosta godina skupio različite modele raznih vrsta goriva i ta goriva su optimizirana kako bi se dobivali najtočniji rezultati. Tako da na slici 56 stoji da se koristi dizel koji je standardno gorivo. Prvi način mijenjanja vrste goriva je mijenjanje standardnog goriva u padajućem izborniku. Drugi način je prebacivanje na *User-defined Fuel* (korisnički definirano gorivo) i potom korištenje software-a zvanog *BOOST Gas Properties Tool* (alat za promjenu svojstva goriva) kako bi se napravilo vlastito gorivo.

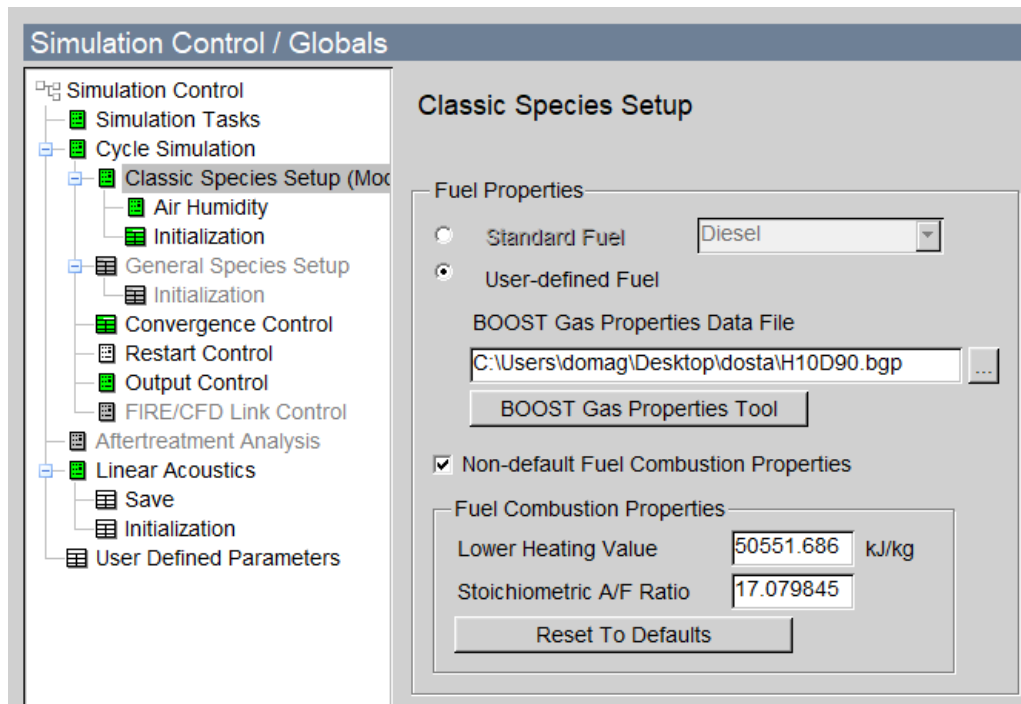


Slika 57. Početni zaslon alata za promjenu svojstva goriva



**Slika 58. Nova mješavina goriva**

Kao što se vidi na slici 58, napravljeno je novo gorivo s 90% dizela i 10% vodika. Takvo gorivo je i korišteno kao jedno od alternativnih goriva u sljedećim simulacijama.



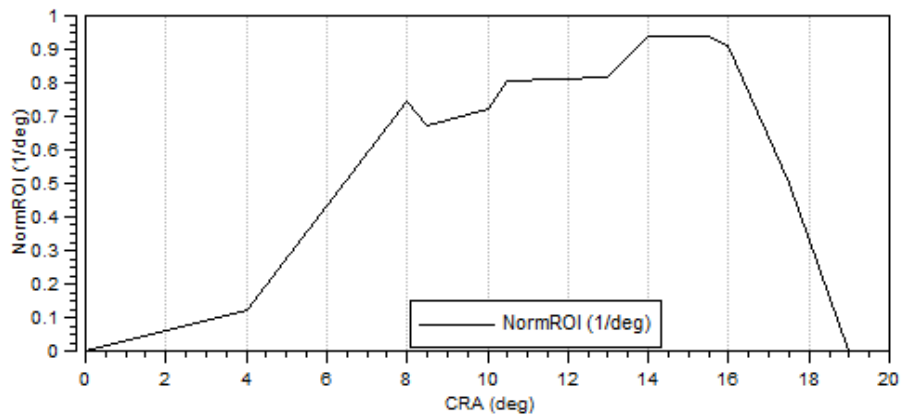
**Slika 59. Izabrana nova mješavina goriva**

Nakon spremanja novog goriva i odabira za korištenje tog goriva, Boost sam izračunava donju ogrjevnu moć tog goriva i stehiometrijski omjer goriva i zraka.



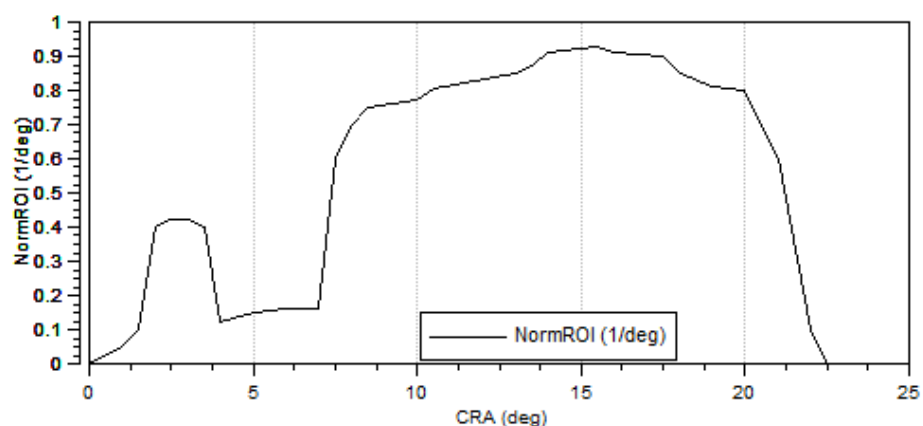
## 8. OPTIMIZACIJA I KOMENTAR DOBIVENIH REZULTATA SIMULACIJA

Optimizacija radnih karakteristika modeliranog motora se radila na način da se promijenio zakon ubrizgavanja goriva. Pređeno je na predubrizgavanje s dužim ubrizgavanjem pri konstantnom tlaku, te je produženo trajanje samog ubrizgavanja.



Slika 60. Stari graf ubrizgavanja

Na slici 60 je graf ubrizgavanja od validiranog modela, s kojim se nisu dobivali dobri rezultati korištenjem alternativnih goriva. Mijenjanjem grafa kao što je prikazano na slici 61, dobiveni su zadovoljavajući rezultati kad je u pitanju korištenje alternativnih goriva. Kroz sve simulacije s korištenjem alternativnih goriva korišten je novi graf za ubrizgavanje.



Slika 61. Novi graf ubrizgavanja

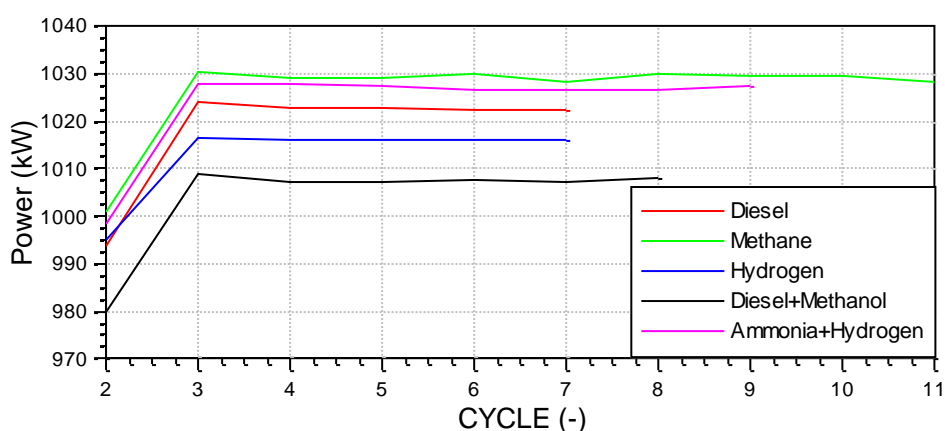
Osim mijenjanja grafa ubrizgavanja, mijenjala se količina ubrizganog goriva po ciklusu. Količine ubrizganog alternativnog goriva po ciklusu su:

- LNG (metan) - 0,0300 kg/ciklus,

- Vodik - 0,0133 kg/ciklus,
- Dizel + metanol - 0,0358 kg/ciklus i
- Amonijak + vodik - 0,0455 kg/ciklus.

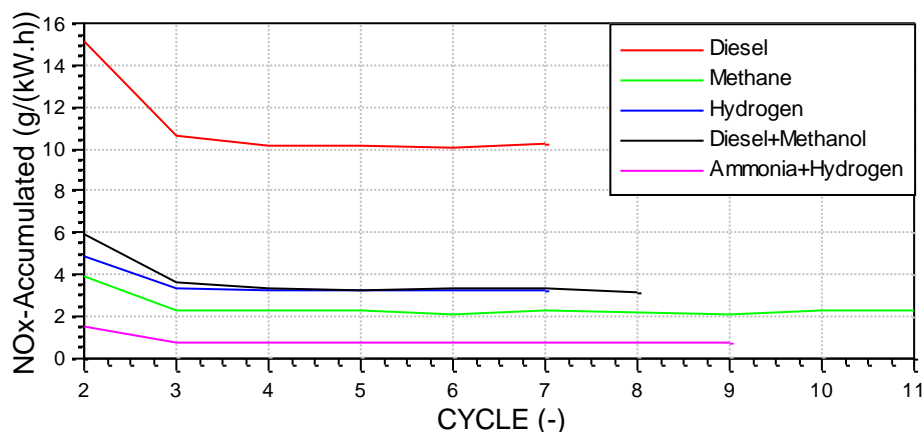
### 8.1. Rezultati alternativnih goriva

Kao što je već otprije rečeno, pokušala se dobiti približno ista snaga koristeći gore nabrojana alternativna goriva. Uz tu snagu najviše se pazilo na zadovoljavanje emisija štetnih dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) u ispušnim plinovima. Obje stavke biti će potvrđene svojim grafovima.



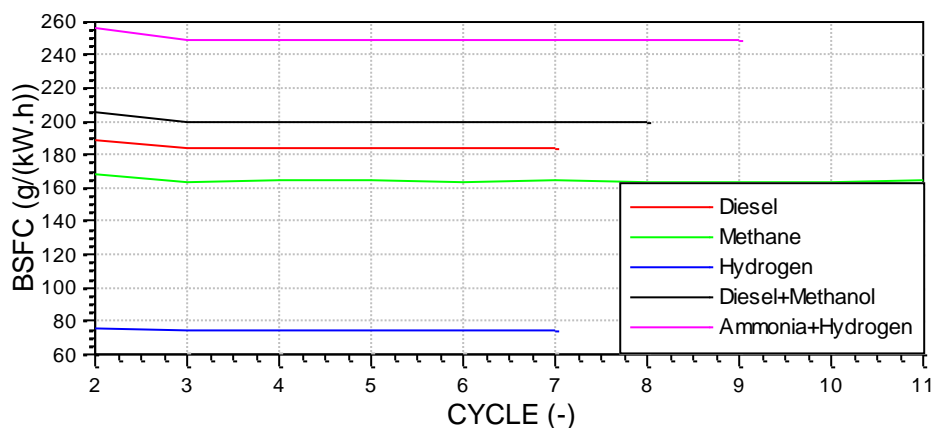
**Slika 62. Rezultati simulacija snage alternativnih goriva**

Graf snage ukazuje na neka odstupanja koristeći različita goriva. Sa svakim alternativnim gorivom nije postignuta ista snaga. Korištenjem LNG-a (metana) i korištenjem smjese amonijaka i vodika postignuta je veća snaga od referentne snage motora pogonjenog dizelskim gorivom. Korištenjem vodika i smjese dizela i metanola postignute su manje snage od referentne snage s dizelskim gorivom.



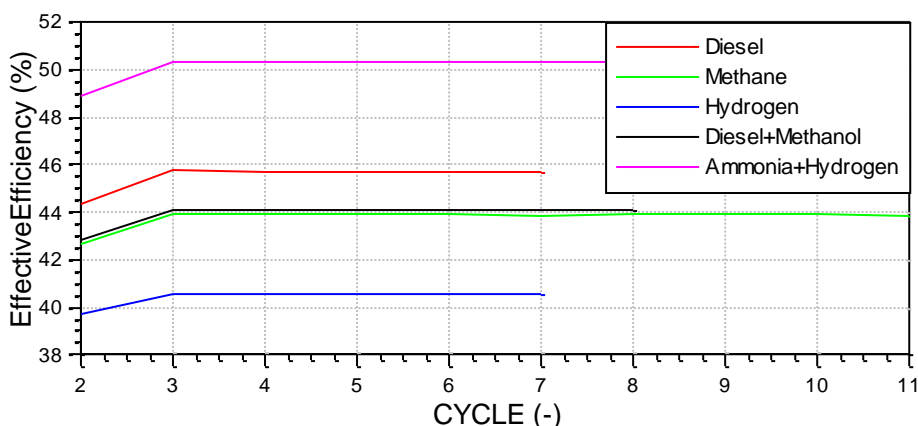
**Slika 63. Rezultati simulacija NO<sub>x</sub>-a alternativnih goriva**

Graf emisija NO<sub>x</sub>-a na slici 63 potvrđuje da se korištenjem alternativnih goriva uspješno postići zadovoljavajuće emisije štetnih dušikovih oksida. Sva goriva postigla su emisije manje od 3,4 g/kWh NO<sub>x</sub>-a. Na grafu se vidi i usporedba s dizelskim gorivom koje postiže veličinu od malo iznad 10 g/kWh emisija NO<sub>x</sub>-a. Također se na grafu vidi kako je smjesa amonijaka i vodika najbolja opcija za smanjenje emisija, te se može reći da se korištenjem te smjese u budućnosti može postići motor sa nultom emisijom NO<sub>x</sub>-a.



**Slika 64. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva alternativnih goriva**

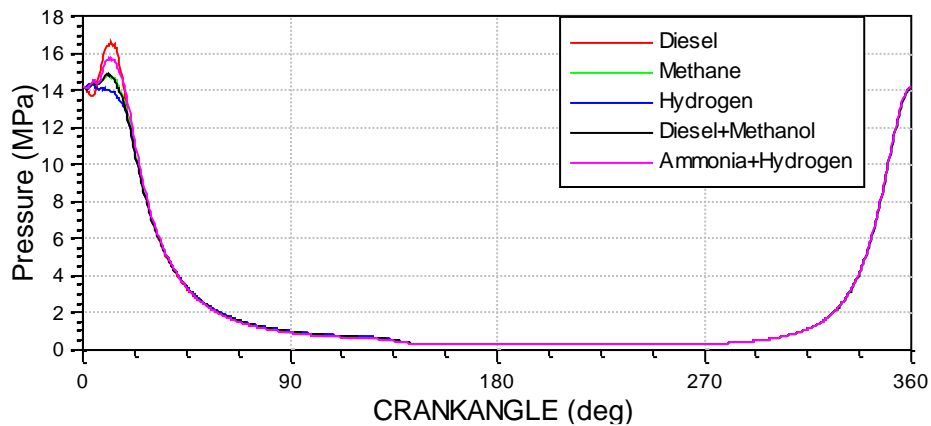
Specifična potrošnja goriva ukazuje kako korištenjem LNG-a i vodika smanjujemo potrošnju goriva, dok korištenjem smjesa dizela i metanola, te amonijaka i vodika povećavamo potrošnju goriva. Na to ima velik utjecaj količina ubrizganog goriva za koju je već otprije rečeno da se morala korigirati u odnosu na donju ogrjevnu moć goriva, ali i na zadovoljavanje emisija NO<sub>x</sub>-a.



**Slika 65. Rezultati simulacija učinkovitosti alternativnih goriva**

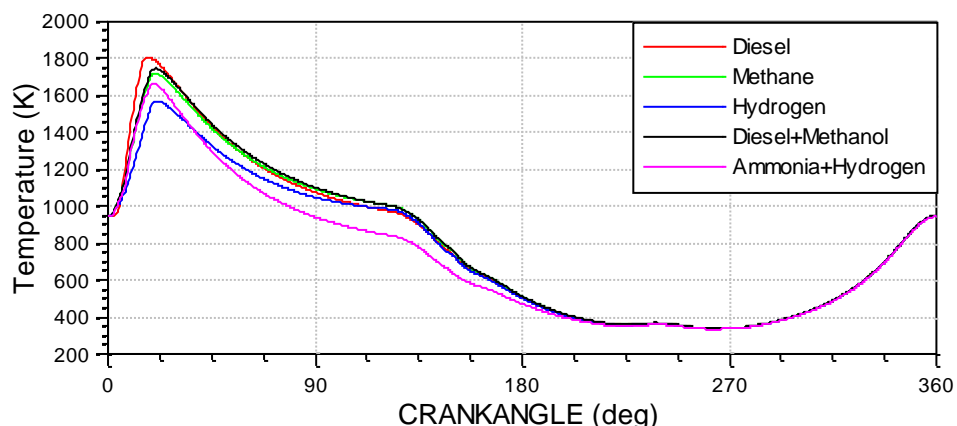
Graf efektivne učinkovitosti govori da jedino korištenjem smjese amonijaka i vodika dobivamo veću učinkovitost od korištenja samog dizelskog goriva. S tim da ta učinkovitost sada iznosi više od 50%, što je veliko povećanje. Ali se vidi i da korištenjem samog vodika učinkovitost jako opada. Može se reći da koliko se poveća učinkovitost korištenjem smjese

amonijaka i vodika, toliko se smanjuje učinkovitost samog vodika naspram stopostotnog dizelskog goriva. Opet tu ima veliku ulogu donja ogrjevna moć pojedinog goriva ali i ubrizgana količina goriva unutar cilindra.



**Slika 66. Rezultati simulacija tlaka alternativnih goriva**

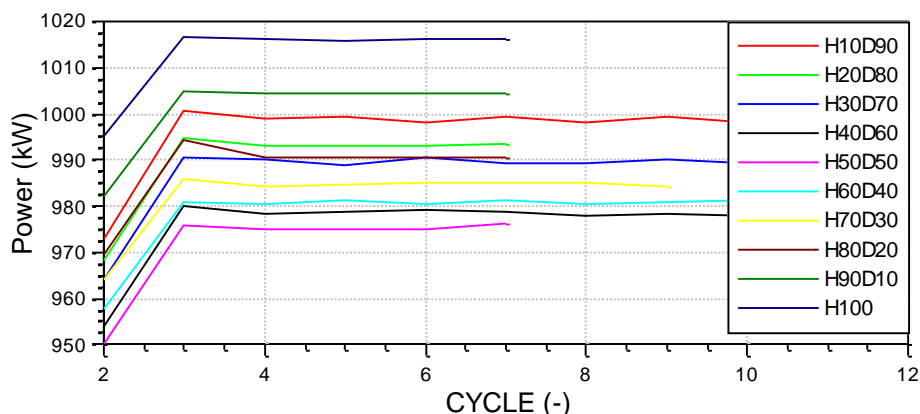
Graf tlakova unutar cilindra naspram kuta koljenastog vratila nije ni približno jednak. Razlike su i veće od 2 MPa. Tlak referentnog dizelskog goriva je najveći, a tlak vodika je najmanji. Tlak dizelskog goriva daje i najviše emisije NO<sub>x</sub>-a, što se već otprije vidjelo. Nije moguće na lagan način postići veći tlak, jer ako se želi dostići razina tlaka dizelskog goriva, treba se ubrizgati veća količina alternativnog goriva. To ne odgovara emisijama, jer ako povećamo količinu ubrizganog goriva, skaču i same emisije NO<sub>x</sub>-a. A na samom početku je već rečeno da se nije htjelo mijenjati ništa vezano za turbopuhalo, jer bi se na taj način sve još dodatno zakompliciralo.



**Slika 67. Rezultati simulacija temperature alternativnih goriva**

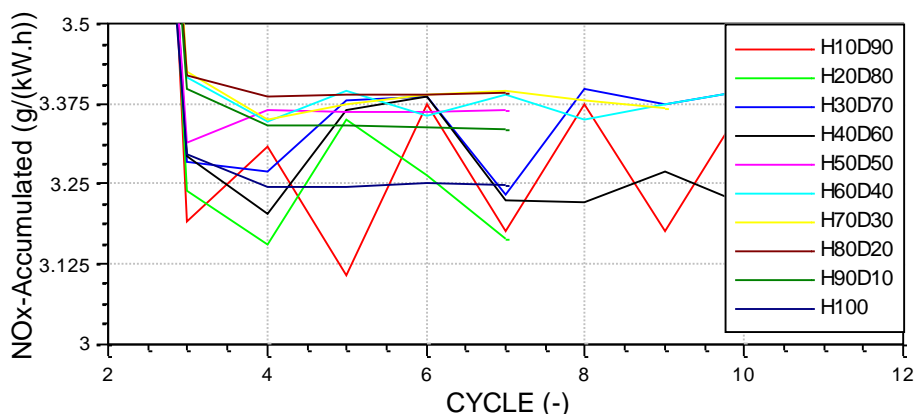
Graf temperatura unutar cilindra može se povezati s veličinom tlaka, jer je očekivano da ako je veći tlak, da je veća i temperatura. Tako se vidi da se korištenjem vodika dobivaju znatno niže temperature u cilindru naspram korištenja dizelskog goriva, i to je razlika od 250 stupnjeva Kelvina.

## 8.2. Rezultati smjesa vodika i dizela



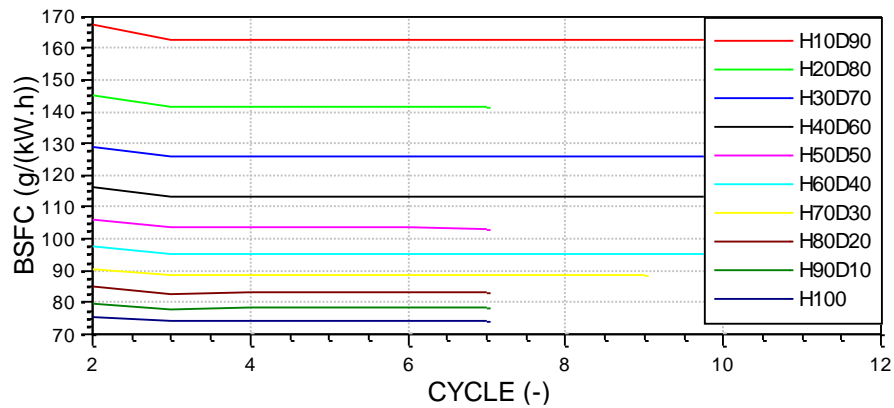
**Slika 68. Rezultati simulacija snage smjesa vodika i dizela**

Nastavno na prošlo poglavlje uzeto je u obzir korištenje više različitih smjesa dizela i vodika i to usporedno s potpunim vodikom koji je već prije uspoređen s referentnim dizelskim i ostalim alternativnim gorivima. Svaka smjesa je povećanje postotka vodika od 10% u smjesi s dizelom. Tako da se prva smjesa sastoji od 90% dizela i 10% vodika, druga je 80% dizela i 20% vodika, pa sve do potpunog vodika (100% vodika). Također se pokušalo dovesti snagu na približnu vrijednost samog dizela ali pogledom na graf vide se malo veća odstupanja. Razlika između najveće dobivene vrijednosti i najmanje vrijednosti je 4%, od 975 do 1015 kW.



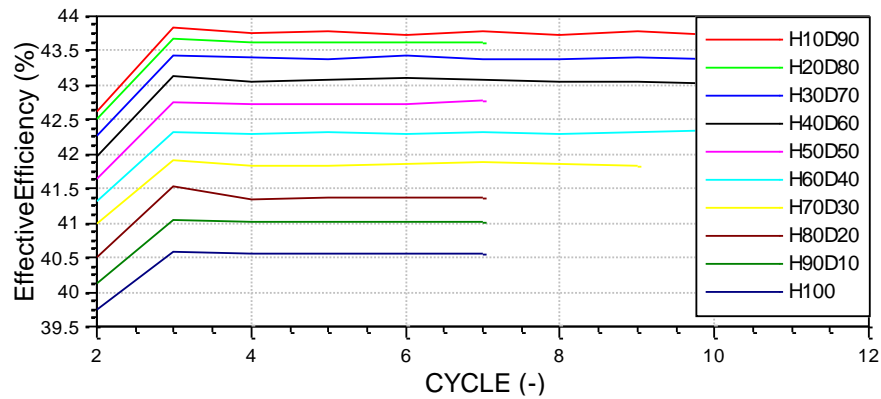
**Slika 69. Rezultati simulacija NOx-a smjesa vodika i dizela**

Graf emisija dušikovih oksida sa slike 69 dokazuje da svaka smjesa zadovoljava 3,4 g/kWh emisija NOx. Što je bio i prvotni cilj.



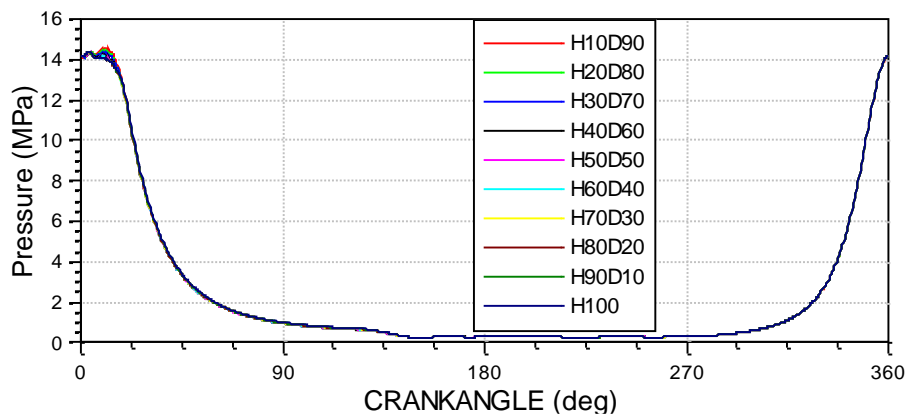
**Slika 70. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva smjesa vodika i dizela**

Graf specifične potrošnje goriva daje do znanja: što je veći postotak vodika unutar smjese, manja je potrošnja goriva. Razlog tome je opet različita donja ogrjevna moć, i količina ubrizganog goriva u cilindar.



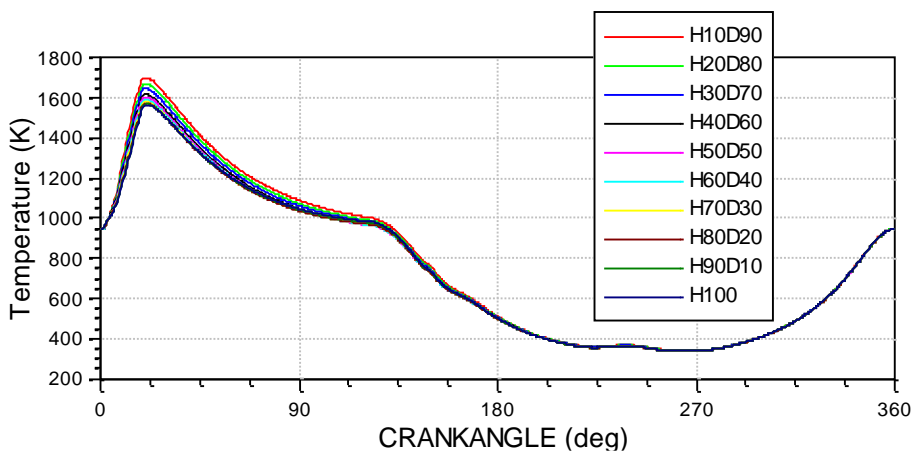
**Slika 71. Rezultati simulacija učinkovitosti smjesa vodika i dizela**

Graf efektivne učinkovitosti sa slike 71 kaže: što je veći postotak vodika unutar smjese, manja je učinkovitost. A sve ove učinkovitosti su manje od referentne učinkovitosti dobivene korištenjem samog dizelskog goriva (~46%).



**Slika 72. Rezultati simulacija tlaka smjesa vodika i dizela**

Graf tlakova na slici 72 ukazuje da su svi tlakovi otprilike jednaki. A u odnosu na referentni tlak od dizela manji su za otprilike 2 MPa.

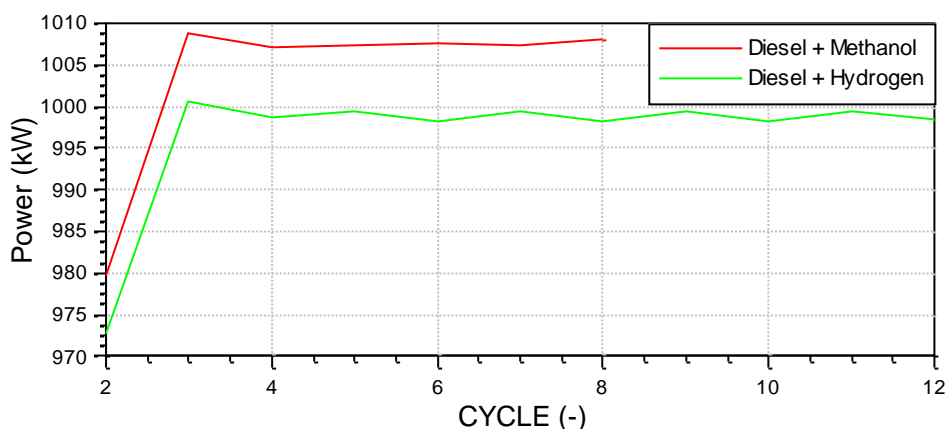


**Slika 73. Rezultati simulacija temperature smjesa vodika i dizela**

Temperaturni graf ukazuje na različite temperature unutar cilindra koristeći različite postotke vodika u smjesi dizela i vodika. Razlika je od 1550 K do 1700 K. Te se može primijetiti da što je veći postotak vodika, manja je temperatura.

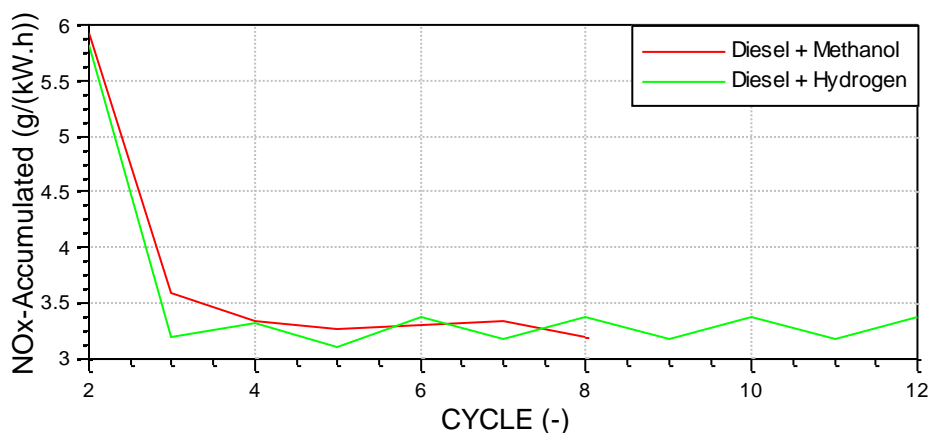
### 8.3. Usporedba smjese dizela i metanola s dizelom i vodikom

Poznato je iz prethodnih potpoglavlja da smjese dizel + metanol i dizel + vodik zadovoljavaju emisije ispušnih plinova. Ovdje se točnije radi o smjesi 91% dizela i 9% metanola te smjesi 90% dizela i 10% vodika. Ova usporedba je uzeta kako bi se bolje približio učinak korištenja alternativnog goriva s većom količinom dizela. Također ova usporedba je uzeta jer ima otprilike iste postotke unutar smjese. Sljedeći rezultati na grafovima su uzeti iz prethodnih rezultata.



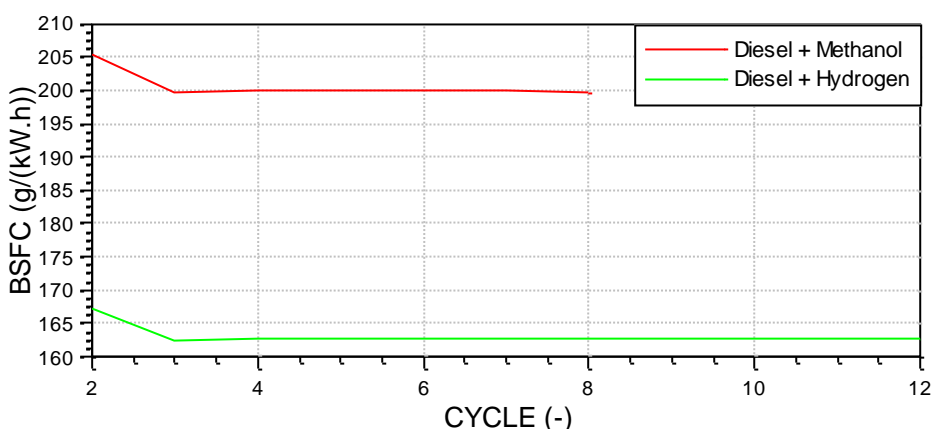
**Slika 74. Rezultati simulacija snage smjesa metanola i vodika s dizelom**

Na taj način vidi se da nema velikih odstupanja između dobivenih snaga motora korištenjem obiju smjesa, što je i bio cilj, da se ostave približno iste snage uz smanjenje emisija NO<sub>x</sub>-a.



**Slika 75. Rezultati simulacija NO<sub>x</sub>-a smjesa metanola i vodika s dizelom**

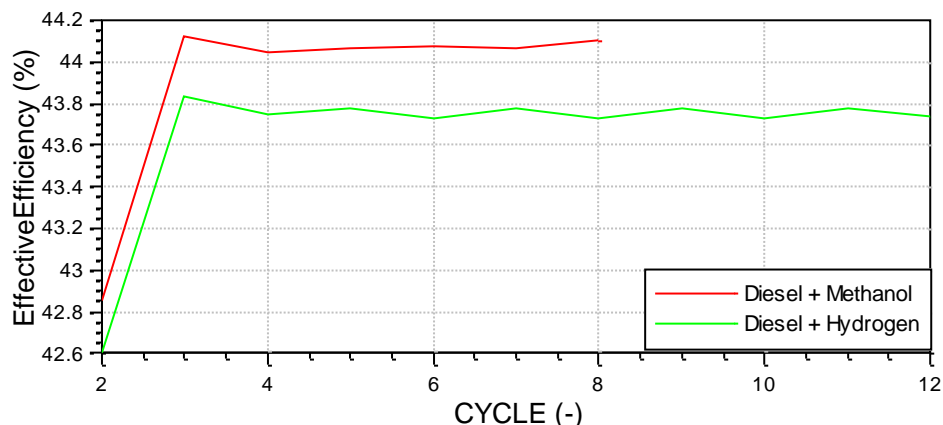
Graf emisija ispušnih plinova sa slike 75 dokazuje da su postignuti potrebni rezultati, točnije emisije NO<sub>x</sub>-a manje od 3,4 g/kWh.



**Slika 76. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva smjesa metanola i vodika s dizelom**

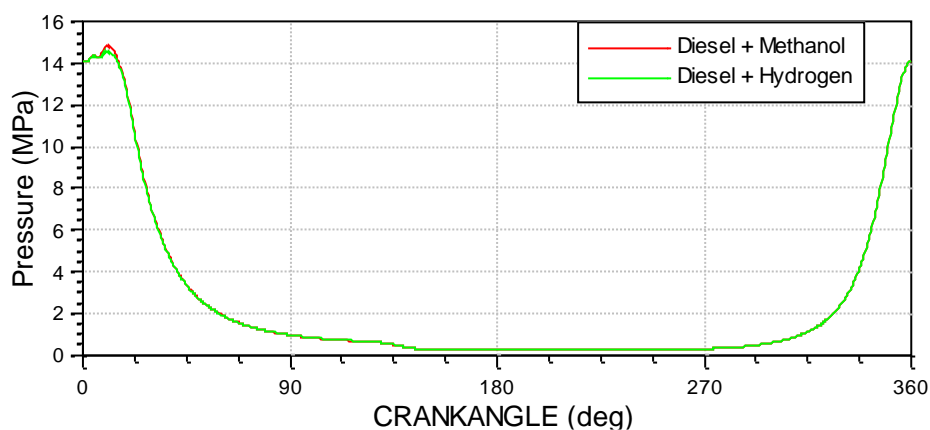
Graf specifične potrošnje goriva ukazuje da je korištenje vodika u smjesi s dizelom isplativija opcija. Ne samo da se koristi manja količina goriva naspram smjese dizela i metanola već se koristi i manja količina naspram referentne količine dizelskog goriva, koja je prikazana na slici 64. Smjesa dizela i metanola ima jako veliku potrošnju goriva. Ali se zna da je metanol trenutno jednostavnije za nabaviti, skladištiti i koristiti.





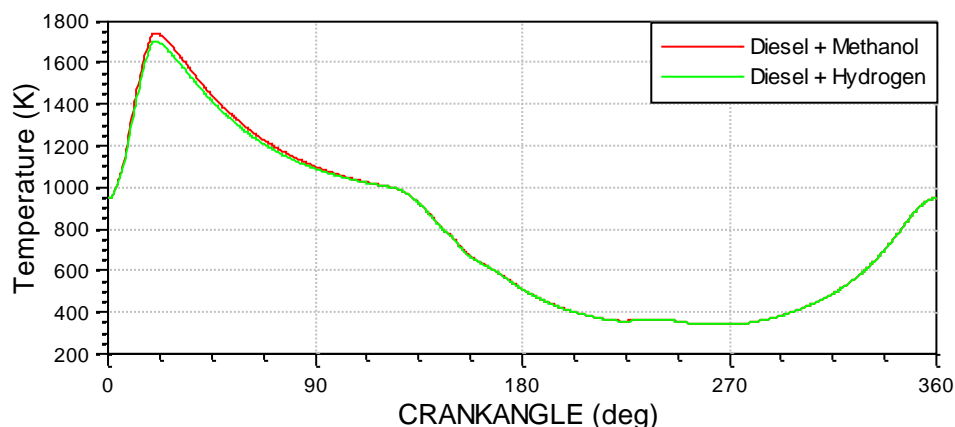
**Slika 77. Rezultati simulacija učinkovitosti smjesa metanola i vodika s dizelom**

Efektivna učinkovitost je otprilike jednaka između obiju smjesa, razlika je u 0,3%.



**Slika 78. Rezultati simulacija tlaka smjesa metanola i vodika s dizelom**

Korištenjem smjese dizela i metanola stvara se veći tlak u cilindru naspram korištenja smjese dizela i vodika. Ali te veličine nisu toliko različite, obje veličine su ispod 15 MPa.



**Slika 79. Rezultati simulacija temperature smjesa metanola i vodika s dizelom**

Temperaturna razlika korištenja ove dvije smjese je 50 stupnjeva Kelvina. Veća je temperatura unutar cilindra kada se koristi smjesa dizela i metanola, što je i logično jer se dobije veći tlak korištenjem te smjese.

## ZAKLJUČAK

Može se zaključiti da će budućnost pomorstva, što znači i da će budućnost transporta biti u prijelaznom stanju dok se ne nađe gorivo koje će se dugo vremena koristiti nakon što se dizel izbací iz cirkulacije. Trenutno rješenje je LNG, ali smatrajući da je i LNG fosilno gorivo, i on će se jednom trebati zamijeniti. Trenutni trendovi su da će vodik biti glavno pogonsko gorivo, bilo to kao čisti vodik, smjese s drugim gorivima ili pak gorivni članci na vodik. Analizama provedenim u radu dokazano je da je moguće koristiti razna alternativna goriva koja zadovoljavaju IMO *Tier III* standarde za emisije. Analizirana goriva su: LNG kao trenutno najbolje rješenje, čisti vodik, kombinacije vodika i dizela, dizel s dodatkom metanola i amonijak s dodatkom vodika. Amonijak je gorivo koje bi se moglo početi primjenjivati u pomorstvu. Dokazano je da ima jako niske ispušne plinove NO<sub>x</sub>-a i CO-a, te je simulacijama utvrđeno da se povećava učinkovitost motora. Amonijak nije novina u pomorstvu jer se amonijak već nalazi na velikom broju brodova koji su opremljeni SCR-om. A samim time posada već zna kako se amonijak skladišti i ne bi trebalo biti problema, već samo zamjena dizelskih tankova goriva s tankovima amonijaka. Takve stvari su prepoznali i u MAN-u pa su zacrtali izgradnju motora na amonijak za 2024. Ovim radom osim analize objašnjene su i trenutne regulative u svijetu emisija ispušnih plinova, te su nabrojani primjeri korištenja alternativnih goriva. Objašnjen je cijeli postupak izrade modela unutar programa AVL Boost i optimiziranje parametara motora. Objašnjeni su i različiti modeli dvotaktnih motora na dvojno gorivo, gdje se vidi razlika između korištenja motora s niskim tlakom ubrizgavanja plina i motora koji koriste standardni dizelski ciklus. Objašnjeno je izgaranje koje se događa u dvotaktnom dizelskom motoru, te je opisana cijela regulativa MARPOL-a. S naglaskom na Prilog VI koji se odnosi na emisije štetnih plinova, te metode za njihovo smanjenje. Nastavak ovog rada bilo bi istraživanje najekonomičnijeg načina preinake (*retrofit*) na brodove u eksploataciji. Trebalo bi se uzeti u obzir kakva je aplikacija broda, te moguća dobava alternativnog goriva s obzirom na trendove i strategiju razvoja.

## LITERATURA

- [1] <https://unctad.org/topic/transport-and-trade-logistics/review-of-maritime-transport>  
(pristupljeno 30.4.2021.)
- [2] Radica, G.: *Brodski motori*, Autorizirana predavanja, Pomorski fakultet u Splitu, 2015.
- [3] <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx>  
(pristupljeno 30.4.2021.)
- [4] <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels.html>  
(pristupljeno 30.4.2021.)
- [5] <https://www.liscr.com/sites/default/files/NOx%20Technical%20Code%202008%2C%20as%20amended.pdf> (pristupljeno 30.4.2021.)
- [6] Raser B., Wieser M., Grabner F.: *CO<sub>2</sub> Reduction in Commercial Vehicles - The AVL Hydrogen Engine*, ožujak 2021.
- [7] Arman Arefin, Nurun Nabi, Washim Akram, Mohammad Towhidul Islam, Wahid Chowdhury: *A Review on Liquefied Natural Gas as Fuels for Dual Fuel Engines: Opportunities, Challenges and Responses*, MDPI, 23. studeni 2020. godine
- [8] Congbiao Sui, Peter de Vos, Douwe Stapersma, Klaas Visser, Yu Ding: *Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage*, Journal of Marine Science and Engineering, 6. kolovoza 2020. godine
- [9] Dimitiou P. i Tsujimura T.: *A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel*, International Journal of Hydrogen Energy (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
- [10] J.O. Abe, A.P.I. Popoola, E. Ajenifuja i O.M. Popoola: *Hydrogen energy and storage: Review and recommendation*, International Journal of Hydrogen Energy (2019), 15072-15086
- [11] Hardikk Valera, Avinash Kumar Agarwal: *Methanol and the Alternate Fuel Economy*, siječanj 2019. godine
- [12] Erdemir D, Dincer I.: *A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: Challenges and solutions*. Int J Energy Res. 2021;45:4827-4834. <https://doi.org/10.1002/er.6232>

- [13] Aaron J. Reiter, Song-Chang Kong: *Diesel Engine Operation Using Ammonia as a Carbon-Free Fuel*, ICEF 2010-35026, rujan 2010. godine
- [14] Kyunghwa Kim, Gilltae Roh, Kangwoo Chun: *A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments*, Journal of Marine Science and Engineering, 7. ožujka 2020. godine
- [15] LNGC- optimised designs of ME-GI engines and fuel gas supply systems
- [16] The Methanol fuelled MAN B&W LGIM Engine
- [17] MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia
- [18] <https://www.avl.com/boost>, (pristupljeno 4.6.2021.)
- [19] Muše A.: *Analiza rada i optimizacija brodskih sporokretnih diesel motora*, Split 2018.
- [20] <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/Marpol.aspx> (pristupljeno 3.6.2021.)
- [21] Slišković M.: Predavanja iz kolegija Zaštita mora i morskog okoliša, Sveučilište u Splitu, 2019.
- [22] Čampara, L.; Hasanspahić, N.; Vujicic, S.: *Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines*, Sveučilište u Dubrovniku, 2018.
- [23] Lalić, B.: *Optimiranje rada brodskog porivnog dizelskog motora u svrhu ispunjenja novih zahtjeva o ispušnim emisijama*, Split, 2013.
- [24] <https://www.onthemosway.eu/18823-2/?cn-reloaded=1> (4.6.2021.)
- [25] [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx), (pristupljeno 4.6.2021.)
- [26] [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx), (pristupljeno 4.6.2021.)
- [27] [https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical\\_review/2015/0727\\_2.html](https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical_review/2015/0727_2.html) (pristupljeno 12.9.2021.)
- [28] <https://www.motorship.com/gfsconference/latest-news101/dual-fuel-two-stroke-technology-advances> (pristupljeno 12.9.2021.)
- [29] <https://www.wartsila.com/media/news/20-11-2013-wartsila's-2-stroke-dual-fuel-engine-introduced> (pristupljeno 12.9.2021.)
- [30] <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ls-x-engine/brochure-o-e-wartsila-dual-fual-low-speed.pdf?sfvrsn=4> (pristupljeno 12.9.2021.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Graf graničnih vrijednosti NO <sub>x</sub> [23] .....	9
Slika 2. Udio sumpora u gorivu[22] .....	10
Slika 3. ECA zone [24].....	10
Slika 4. Faze izgaranja u dvotaktnim dizelskim motorima [2].....	12
Slika 5. Ciklus izgaranja kod dvotaktnog motora na dvojno gorivo [27].....	14
Slika 6. Ciklus izgaranja kod dvotaktnog motora na dvojno gorivo s niskotlačnim ubrizgavanjem plina [27].....	15
Slika 7. Ciklus dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora [19] .....	16
Slika 8. Wartsila ubrizgavanje plina (desno) i zapaljenje (lijevo) [30] .....	16
Slika 9. MAN portfolio dvotaktnih motora na dvojno gorivo [17] .....	17
Slika 10. Pojednostavljeni model motora unutar AVL Boost-a .....	20
Slika 11. Raspad mlaza goriva [19].....	21
Slika 12. Početni prozor AVL Boost-a.....	21
Slika 13. Pojednostavljeni model motora unutar AVL Boost-a .....	22
Slika 14. Ciklusna simulacija .....	22
Slika 15. Trajanje simulacije .....	23
Slika 16. Dizel .....	24
Slika 17. Vlažnost zraka .....	24
Slika 18. Inicijalizacija .....	25
Slika 19. Konvergencija .....	25
Slika 20. Izlazna kontrola simulacije.....	26
Slika 21. Osnovne mjere motora .....	27
Slika 22. Izmjena medija .....	27
Slika 23. Inicijalizacija cilindra .....	28
Slika 24. Model izgaranja.....	28
Slika 25. Više-zonski model izgaranja .....	29
Slika 26. Ubrizgavanje .....	30
Slika 27. Podatci ubrizgavanja za izračun .....	31
Slika 28. Faktori emisija.....	31
Slika 29. Prijenos topline.....	32
Slika 30. Specifikacija ventila .....	33

Slika 31. Usis zraka u cilindar .....	33
Slika 32. Protok zraka.....	34
Slika 33. Graf usisa zraka u cilindar .....	34
Slika 34. Graf protoka zraka usisa u cilindar.....	35
Slika 35. Ispušni ventili .....	35
Slika 36. Otvaranje i zatvaranje ispušnih ventila .....	36
Slika 37. Graf protoka zraka ispušnih ventila.....	37
Slika 38. Usis.....	37
Slika 39. Inicijalizacija usisa .....	38
Slika 40. Koeficijenti protoka usisa i cijevi.....	38
Slika 41. Ispuh .....	39
Slika 42. Inicijalizacija ispuha.....	39
Slika 43. Koeficijenti protoka ispuha i cijevi .....	40
Slika 44. Pojednostavljeno turbopuhalo .....	40
Slika 45. Konstantni tlak turbopuhala .....	40
Slika 46. Aktuator postavljen na usis .....	41
Slika 47. Općenite veličine pojednostavljene cijevi usisa.....	41
Slika 48. Inicijalizacija cijevi usisa .....	42
Slika 49. Općenite veličine pojednostavljene cijevi ispuha .....	43
Slika 50. Inicijalizacija cijevi ispuha.....	44
Slika 51. Mjerna točka 1 .....	44
Slika 52. Mjerna točka 2.....	45
Slika 53. Motor.....	45
Slika 54. Trenje motora .....	46
Slika 55. Usporedba ispitivanog motora i simulacije [19] .....	47
Slika 56. Vrsta goriva .....	48
Slika 57. Početni zaslon alata za promjenu svojstva goriva .....	48
Slika 58. Nova mješavina goriva.....	49
Slika 59. Izabrana nova mješavina goriva .....	49
Slika 60. Stari graf ubrizgavanja .....	50
Slika 61. Novi graf ubrizgavanja.....	50
Slika 62. Rezultati simulacija snage alternativnih goriva.....	51
Slika 63. Rezultati simulacija NO <sub>x</sub> -a alternativnih goriva.....	51
Slika 64. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva alternativnih goriva .....	52

Slika 65. Rezultati simulacija učinkovitosti alternativnih goriva.....	52
Slika 66. Rezultati simulacija tlaka alternativnih goriva.....	53
Slika 67. Rezultati simulacija temperature alternativnih goriva.....	53
Slika 68. Rezultati simulacija snage smjesa vodika i dizela.....	54
Slika 69. Rezultati simulacija NO <sub>x</sub> -a smjesa vodika i dizela.....	54
Slika 70. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva smjesa vodika i dizela .....	55
Slika 71. Rezultati simulacija učinkovitosti smjesa vodika i dizela.....	55
Slika 72. Rezultati simulacija tlaka smjesa vodika i dizela.....	55
Slika 73. Rezultati simulacija temperature smjesa vodika i dizela.....	56
Slika 74. Rezultati simulacija snage smjesa metanola i vodika s dizelom .....	56
Slika 75. Rezultati simulacija NO <sub>x</sub> -a smjesa metanola i vodika s dizelom .....	57
Slika 76. Rezultati simulacija specifične potrošnje goriva smjesa metanola i vodika s dizelom .....	57
Slika 77. Rezultati simulacija učinkovitosti smjesa metanola i vodika s dizelom .....	58
Slika 78. Rezultati simulacija tlaka smjesa metanola i vodika s dizelom .....	58
Slika 79. Rezultati simulacija temperature smjesa metanola i vodika s dizelom .....	58

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Granične vrijednosti NOx [25] .....	8
Tablica 2. Ograničenja za SOx i PM [26] .....	10
Tablica 3. Tablica parametara [19].....	46
Tablica 4. Tablica usporedbe rezultata simulacije i podataka dobivenim mjerenjem na motoru [19].....	47