

# Sekvencijalno prednabijanje dizelskog motora

---

**Tomičić, Iva**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:915170>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**SEKVENCIJALNO PREDNABIJANJE DIZELSKOG MOTORA**

Rijeka, srpanj 2024.

Iva Tomičić  
0069073535

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**SEKVENCIJALNO PREDNABIJANJE DIZELSKOG MOTORA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Komentor: prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Rijeka, srpanj 2024.

Iva Tomičić  
0069073535

Rijeka, 05.03.2024.

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku  
Predmet: Motori

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Iva Tomičić (0069073535)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (2100)  
Modul: Procesno i energetska strojarstvo (2117)  
Zadatak: **Sekvencijalno prednabijanje dizelskog motora / Sequential diesel engine turbocharging**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno odrediti osnovne karakteristike 6-cilindričnog automobilskog dizelskog motora ukupnog stapajnog volumena 2993 cm<sup>3</sup>. Motor je sličan motoru BMW N57D30. Za takav motor potrebno je predvidjeti sekvencijalno prednabijanje s dva turbopuhala i s hlađenjem zraka za prednabijanje, kako bi se postigla veća snaga motora. Kao kriterij za odabir turbopuhala potrebno je izabrati turbopuhalo koje je dostupno na tržištu. Rad treba sadržavati: 1. Uvod s tehničkim opisom zadanog automobilskog dizelskog motora u varijantama sa slobodnim usisom, s prednabijanjem jednim turbopuhalom i sekvencijalnim prednabijanjem; 2. Proračun snage i zakretnog momenta motora te specifične potrošnje goriva za zadane varijante motora; 3. Zaključak s analizom dobivenih rezultata za zadane varijante motora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.



Mentor:

izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Komentor:

prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem kako sam ovaj diplomski rad pod nazivom „Sekvencijalno prednabijanje dizelskog motora“ izradila samostalno uz mentorstvo izv. prof. dr. sc. Vedrana Mrzljaka i prof. dr. sc. Tomislava Mrakovčića i dane literature, te uz pomoć znanja stečenog tijekom studija.

Rijeka, srpanj 2024.

Iva Tomičić

---

## **Zahvala**

*Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Mrakovčiću i dr. sc. Vedranu Medici-Violi na ukazanom povjerenju, pomoći, strpljenju i vodstvu kroz ovaj diplomski rad.*

*Također zahvaljujem svojoj obitelji, te mom zaručniku Antoniju koji su bili uz mene i neizmijerna podrška tokom cijelog perioda studiranja.*

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. MOTOR S UNUTARNJIM IZGARANJEM.....	2
2.1. Konstrukcija motora .....	2
2.2. Ubrizgavanje goriva .....	3
2.3. Common Rail sustav ubrizgavanja goriva.....	4
2.4. Hlađenje zraka za prednabijanje.....	6
3. SEKVENCIJALNO PREDNABIJANJE DIZELSKOG MOTORA .....	8
3.1. Tehničke karakteristike motora N57D30 .....	8
4. SIMULACIJA DIZELSKOG MOTORA SA SLOBODNIM USISOM .....	11
4.1 Model motora sa slobodnim usisom.....	11
5. SIMULACIJA DIZELSKOG MOTORA S PREDNABIJANJEM TURBOPUHALOM..	19
5.1. Model motora s jednim turbopuhalom .....	20
5.2. Model motora s dva turbopuhala .....	27
6. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČAK.....	40
POPIS LITERATURE .....	43
POPIS SLIKA .....	44
POPIS TABLICA.....	45
SAŽETAK.....	46
SUMMARY .....	46

## 1. UVOD

Prednabijanje je proces koji podrazumijeva kompresiju ukupnog ili dijela svježeg zraka prije usisa u cilindar čime se povećava tlak zraka na ulazu u cilindar. Svrha procesa je povećanje snage motora. Proces se može izvesti na različite načine koji ovise o načinu dovoda energije za prednabijanje.

Mehaničko prednabijanje koristi energiju koja je oduzeta na koljenastom vratilu. Pri tome se stupanj djelovanja motora ne povećava, te se mehaničko prednabijanje rijetko koristi.

Prednabijanje primjenom valnih pojava se vrši pomoću rezonantnih pojava u usisnoj cijevi, pri čemu spušni plinovi vrše direktnu kompresiju zraka za prednabijanje. Pri tome treba obratiti pozornost na duljine usisne cijevi, te promjer i hod usisnog ventila. Ovaj tip prednabijanja koristi se samo kod brzohodnih automobilskih motora te tlak koji se postiže iznosi do 2 bara.

Prednabijanje turbopuhalom koristi energiju ispušnih plinova. Turbopuhalo se sastoji od turbine i puhala koji su međusobno povezani vratilom. Snagu za pogon puhala turbopuhala daje turbina na ispušne plinove. Puhalo komprimira zrak na usisu motora zbog čega se povećava gustoća, a time i masa zraka koji ispunjava cilindar motora. Zbog veće mase zraka u cilindru motora i višeg volumetrijskog stupnja djelovanja, moguće je provesti izgaranje veće količine goriva u istom radnom volumenu što dovodi do povećanja snage motora i njegova ukupnog stupnja djelovanja. Prednabijanje turbopuhalom se može izvesti na dva načina: impulsno i pomoću konstantnog tlaka.

U ovom diplomskom radu potrebno je predvidjeti sekvencijano prednabijanje s dva turbopuhala i s hlađenjem zraka za prednabijanje kako bi se postigla veća snaga motora.

Kao kriterij za odabir turbopuhala potrebno je izabrati turbopuhalo koje je dostupno na tržištu.

Simulacije karakteristika motora provedene su pomoću računalnog programa Lotus Engine Simulation, a dobiveni rezultati su analizirani kako bi se utvrdio utjecaj promjene pojedinih parametara na karakteristike motora. Simulacije su provedene na modelu motora koji je sličan motoru N57D30 proizvođača BMW.

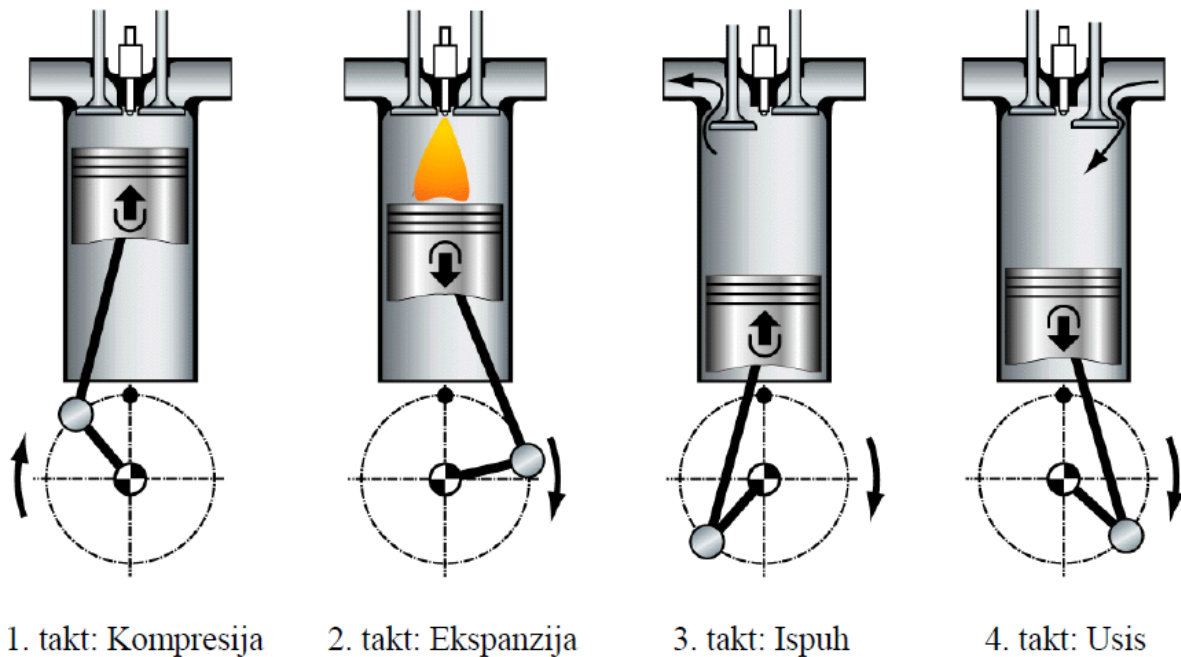


## 2. MOTOR S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s unutarnjim izgaranjem u današnje vrijeme predstavljaju jedne od glavnih pogonskih strojeva, kako na kopnu tako i za pogon plovila. Benzinski i dizelski motori se već godinama razvijaju kako bi se što bolje prilagodili potrebama ljudi i tržišta. Motor s unutarnjim izgaranjem predstavlja toplinski stroj kod kojeg se kemijska energija iz goriva izgaranjem pretvara u toplinu, te se pomoću pogonskog mehanizma pretvara u mehaničku energiju.

### 2.1. Konstrukcija motora

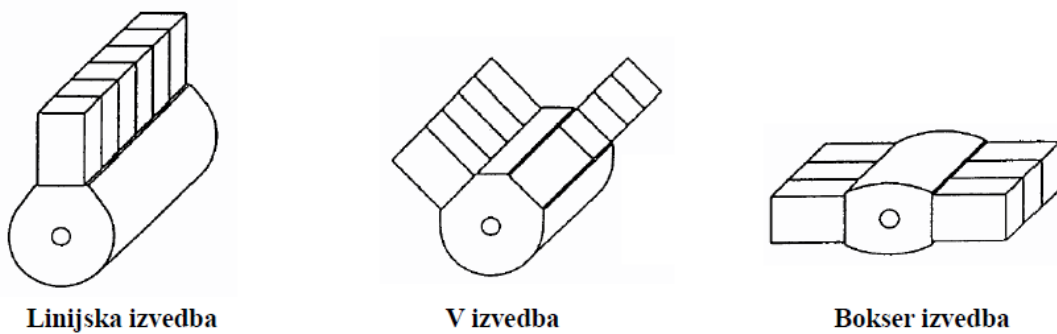
Prema taktosti procesa motori se dijele na dvotaktne (2T) i četverotaktne (4T) motore.



*Slika 2.1 Prikaz taktova 4T motora [1]*

Tijekom prvog takta dolazi do kompresije svježeg zraka ili smjese te se klip giba od donje mrtve točke (DMT) prema gornjoj (GMT), pri čemu raste tlak i temperatura. Pri kraju kompresije dolazi do paljenja smjese te nastupa izgaranje. U drugom taktu dolazi do ekspanzije plinova izgaranja, te se klip giba od gornje mrtve točke (GMT) prema donjoj mrtvoj točki (DMT). Plinovi ekspandiraju pod visokim tlakom i potiskuju klip. Nakon ekspanzije, ispušni se plinovi odvođe iz cilindra motor u ispušni sustav i atmosferu.

Četvrti takt predstavlja usis svježeg medija nakon čega se proces u motoru ponavlja. Prema broju cilindara motore se može podijeliti u dvije grupe: motor s jednim cilindrom i motor s više cilindara. Veći broj cilindara u motoru omogućuje bolje uravnoteženje inercijalnih sila i momenata te mirniji rad motora. Uz zadržavanje jednakih dijelova motora, promjenom cilindara direktno se utječe na različitu snagu motora te se na taj način mogu zadovoljiti potrebe tržišta za određenom izlaznom snagom motora. Najčešća izvedba motora je linijska izvedba. Kod ovakvih motora broj koljena na koljenastom vratilu jednak je broju cilindara te su osi svih cilindara paralelne i leže u jednoj ravnini. Osim motora sa 6 cilindara moguće su izvedbe motora sa 2, 3 ili 4 cilindra u ovakvoj izvedbi. Uz linijsku izvedbu postoje još i V izvedba kojom se skraćuje duljina motora, te bokser izvedba koja se rjeđe primjenjuje za osobna vozila. Ovakva izvedba moguća je samo kod parnog broja cilindara.

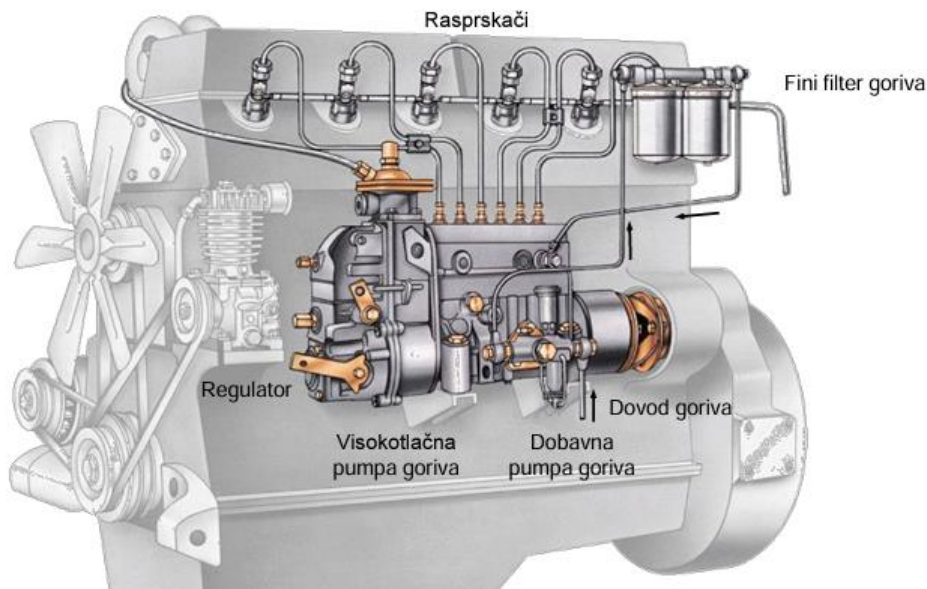


Slika 2.2 Izvedbe motora [1]

## 2.2. Ubrizgavanje goriva

Kod sustava ubrizgavanja goriva razlikuju se klasični sustavi s mehaničkim pogonom i suvremeniji sustavi koji koriste sabirnicu goriva pod visokim tlakom tzv. Common Rail sustavi. Ubrizgavanje goriva vrši se direktno u glavni prostor izgaranja iznad klipa ili u klip. Da bi se postigao visoki tlak ubrizgavanja goriva, zračnost između klipa i pumpe za ubrizgavanje goriva mora biti vrlo malena. Zračnost iznosi od 0,2 do 0,5  $\mu\text{m}$  ovisno o promjeru klipa. Gorivo se ubrizgava pomoću rasprskavača koji je smješten u glavi motora (kod manjih motora) ili u glavi cilindra (kod većih motora). Zbog visokog tlaka i većeg broja sapnica na vrhu rasprskavača omogućeno je brzo miješanje goriva i zraka.

Kod klasičnog sustava ubrizgavanja goriva s mehaničkim pogonom, osim navedenog rasprskaača goriva, opremu za ubrizgavanje goriva čine još regulator, visokotlačna pumpa goriva, dobavna pumpa goriva i filteri goriva. Cijevi za dovod goriva moraju biti jednake duljine. Primjer sustava za ubrizgavanje goriva prikazan je na slici 2.3.

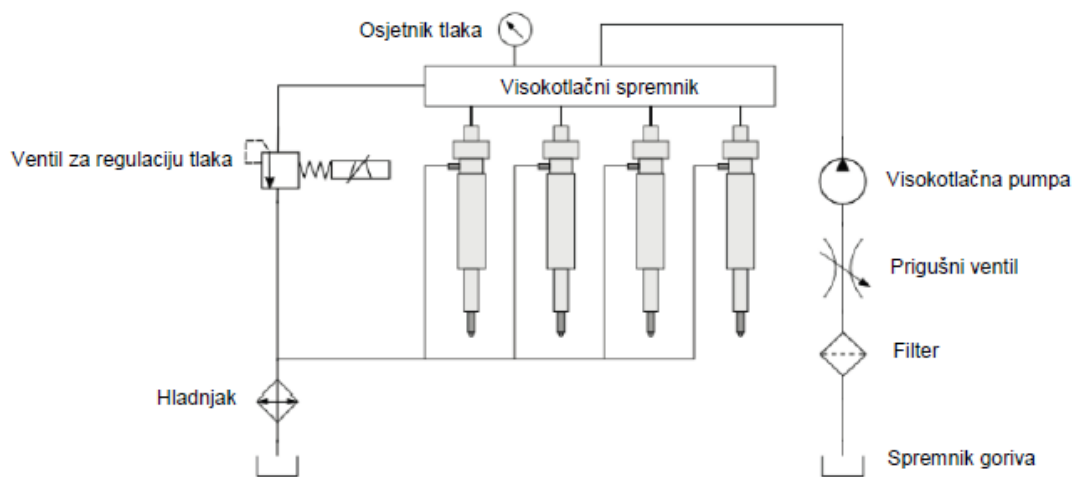


*Slika 2.3 Sustav ubrizgavanja goriva [1]*

### **2.3. Common Rail sustav ubrizgavanja goriva**

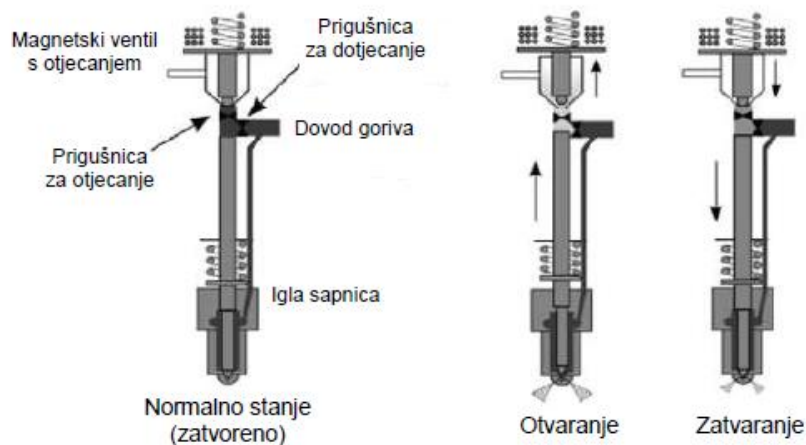
Za razliku od sustava s mehaničkim pogonom ubrizgavanja goriva gdje su procesi povećanja tlaka i doziranja količine goriva ograničeni geometrijskim značajkama dijelova i vezom s koljenastim mehanizmom, kod Common Rail sustava ti procesi su odvojeni i neovisni. Svaki takav sustav se sastoji iz više dijelova koji se zajednički nazivaju Common Rail sustav. Visokotlačna pumpa dovodi gorivo u zajedničku sabirnicu (common rail) koja predstavlja visokotlačni spremnik goriva. Prije te pumpe nalazi se prigušni ventil koji smanjuje dotok goriva kada je to potrebno. Pomoću elektronički upravljano rasprskaača gorivo iz visokotlačnoga spremnika se ubrizgava u prostor izgaranja unutar cilindra motora. Na taj način tlak ubrizgavanja goriva više ne ovisi o brzini vrtnje motora, a početak ubrizgavanja više ne ovisi o trenutnom položaju klipa, odnosno kutu koljenastog vratila. Zahvaljujući iznimno kratkom vremenu odziva rasprskaača goriva i s ciljem smanjenja potrošnje goriva i emisije štetnih plinova, ubrizgavanje goriva se u jednom radnom taktu može izvesti kao niz više

uzastopnih kratkih ubrizgavanja. Volumen zajedničke sabirnice goriva je dimenzioniran na način da sadrži količinu goriva koja je dovoljna da tijekom procesa ubrizgavanja goriva tlak u njoj (i ostatku sustava ubrizgavanja goriva) ne padne ispod granice koja garantira kvalitetno ubrizgavanje goriva tijekom rada motora. Na sabirnici goriva ugrađeni su osjetnik tlaka i ventil za regulaciju tlaka. Ventil za regulaciju tlaka propušta višak goriva kako ne bi došlo do prevelikog porasta tlaka unutar sabirnice goriva. Hladnjak služi kako bi se propušteno gorivo ohladilo prije povrata u spremnik.



*Slika 2.4 Common-rail sustav ubrizgavanja goriva [3]*

Najsloženiji dio Common Rail sustava predstavlja raspršač goriva jer njegovo djelovanje direktno utječe na tijek izgaranja. Raspršač se sastoji od elektromagnetskog ventila, prigušnice za dotjecanje i otjecanje te od igle sapnice. Način rada raspršača opisan je u nastavku.



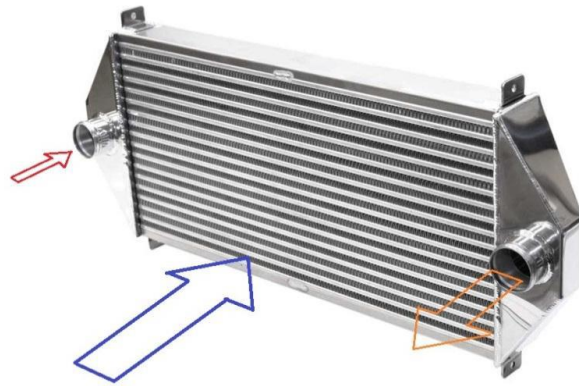
*Slika 2.5 Rasprskič goriva u common-rail sustavu ubrizgavanja goriva [3]*

U zatvorenom stanju igla rasprskaća je pritisnuta na svoje sjedište djelovanjem opruge te je ventil za propuštanje goriva potpuno zatvoren pri čemu je tlak iznad i ispod igle jednak. Elektromagnetski ventil se podiže sa svog sjedišta te se otvara prigušnica za otjecanje goriva pri čemu pada tlak goriva nad iglom. Za to vrijeme kroz prigušnicu dotječe gorivo. Kako je presjek prigušnice za otjecanje goriva veći od presjeka prigušnice za dotjecanje dolazi do smanjenja tlaka iznad igle što omogućava da tlak ispod igle bude dovoljno visok da savlada sile u opruzi i silu tlaka s gornje strane igle. Na taj način igla se počinje otvarati i istiskuje gorivo u prostor izgaranja. Ubrizgavanje traje sve dok se ne prekine dovod struje na elektromagnetski ventil pri čemu se ventil vraća u svoje sjedište i zatvara se dotok goriva.

## **2.4. Hlađenje zraka za prednabijanje**

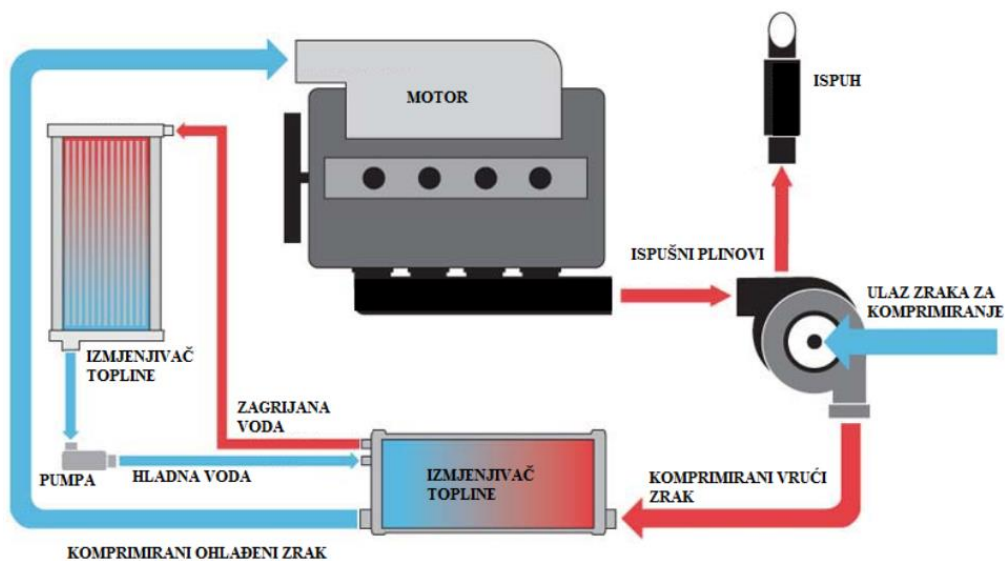
Za motor je potrebno predvidjeti hlađenje zraka za prednabijanje. Sustavi hlađenja su specifični za svako vozilo, ali skoro i da nema razlike između rashladnih sustava za dizelske i benzinske motore. Kod motora s prednabijanjem se zbog kompresije zraka povećava i njegova temperatura, a povećanjem temperature smanjuje se gustoća zraka. Zbog toga se koristi sustav hlađenja komprimiranog zraka kako bi se ponovno povećala njegova gustoća. Zbog veće gustoće ohlađenog zraka za isti volumen u cilindar će se usisati veća masa, a time je moguće provesti i izgaranje veće količine goriva. Dizelski motori rade sa siromašnijom smjesom zraka i goriva te im je zbog toga potrebno dovesti veću količinu zraka kako bi se ostvarilo potpuno izgaranje.

Najčešće izvedbe su hladnjak zrak-zrak te voda-zrak. Izvedba hladnjaka zrak-zrak je jednostavnija te se ona češće koristi. Za hlađenje se koristi vanjski zrak te efikasnost hlađenja direktno ovisi o okolišnim uvjetima.



Slika 2.6 Prikaz hladnjaka zrak-zrak

Kod izvedbe hladnjaka voda-zrak medij za hlađenje zraka je voda. Izvedba je nešto kompliciranija, ali je kod ove izvedbe, za istu veličinu hladnjaka efikasnost hlađenja zraka bolja zbog intenzivnijeg odvođenja topline i velikog specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Komprimiranom zraku se preko izmjenjivača topline odvodi toplina pomoću rashladne vode. Shema izvedbe prikazana je na slici 2.7.



Slika 2.7 Shema sustava hlađenja voda-zrak [7]

### 3. SEKVENCIJALNO PREDNABIJANJE DIZELSKOG MOTORA

Zadatak diplomskog rada je odrediti osnovne karakteristike 6-cilindričnog automobilskeg dizelskog motora. Za takav motor potrebno je predvidjeti sekvencijalno prednabijanje s dva turbopuhala i s hlađenjem zraka za prednabijanje. Sekvencijalno prednabijanje je prednabijanje motora u kojem se koristi turbopuhalo manjih dimenzija pri nižim brzinama motora, te drugo, veće turbopuhalo pri višim brzinama motora. Manje turbopuhalo je učinkovitije pri nižem broju okretaja motora, ali zbog svojih dimenzija ono ne može osigurati dovoljnu količinu komprimiranih ispušnih plinova potrebnu pri većem broju okretaja motora. Zbog toga se ugrađuje drugo, veće turbopuhalo kako bi se ostvarila potrebna snaga za prednabijanje motora.

Kako je u zadatku potrebno analizirati motor s takvim prednabijanjem, kao podloga za model izabran je sličan motor čije su karakteristike opisane niže u tekstu.

#### 3.1. Tehničke karakteristike motora N57D30

Motor BMW N57 D30 pripada grupi „BMW Group Development“ motora prema oznaci N, oznaka 5 predstavlja broj cilindara, a broj 7 označava direktno ubrizgavanje goriva. Oznaka D označava diesel motor dok broj 30 predstavlja stapajni volumen od 3.0 litre. Osnovne karakteristike motora koji će se analizirati dane su u tablici 3.1.

*Tablica 3.1 Tehničke karakteristike motora*

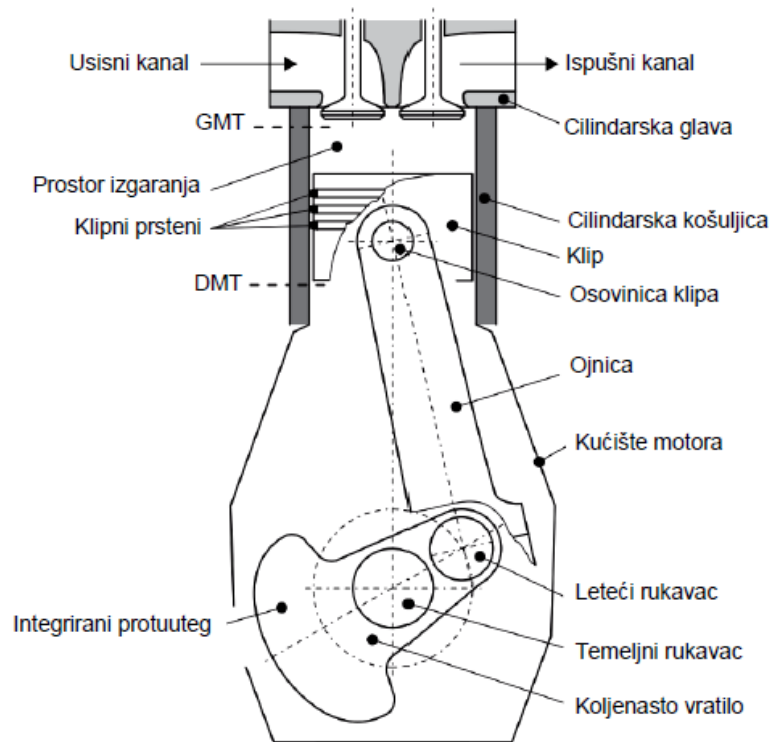
<b>Tip motora</b>	6 cilindara
<b>Stapajni volumen</b>	2993 cm <sup>3</sup>
<b>Redoslijed paljenja</b>	1-5-3-6-2-4
<b>Promjer cilindra</b>	84 mm
<b>Stapaj</b>	90 mm
<b>Kompresijski omjer</b>	16,5:1
<b>Maksimalni moment</b>	520 Nm
<b>Broj ventila po cilindru</b>	4
<b>Broj taktova</b>	4



*Slika 3.1 Prikaz motora N57 D30*

Sastavni dijelovi dizelskog motora su cilindarska glava, kućište i koljenasti mehanizam. U cilindarskoj glavi smješteni su bregasto vratilo, ventili za dovod zraka i odvod ispušnih plinova kao i rasprskачi goriva. U kućištu motora smješteni su klipovi i cilindri. Koljenasti mehanizam sastavljen je od ojnice, koljenastog vratila i zamašnjaka te se koristi za promjenu volumena cilindra pomoću rotacijskog gibanja koljenastog vratila. Drugim riječima koljenasti mehanizam pretvara translacijsko gibanje klipa u rotaciju koljenastog vratila. Na slici 3.2. su, uz dijelove motora, prikazane gornja GMT i donja mrtva točka DMT. One predstavljaju krajnje točke gibanja u kojima klip mijenja smjer gibanja [4].





*Slika 3.2 Dijelovi klipnog motora [3]*

## 4. SIMULACIJA DIZELSKOG MOTORA SA SLOBODNIM USISOM

U radu je potrebno odrediti osnovne karakteristike motora BMW N57D30 ukupnog stapajnog volumena 2993 cm<sup>3</sup>. Pomoću računalnog programa Lotus Engine Simulation izrađuju se tri varijante zadanog motora:

- Sa slobodnim usisom
- S prednabijanjem jednim turbopuhalom
- Sa sekvencijalnim prednabijanjem

Za te tri varijante motora potrebno je izraditi simulacije te izvršiti analizu dobivenih rezultata.

### 4.1 Model motora sa slobodnim usisom

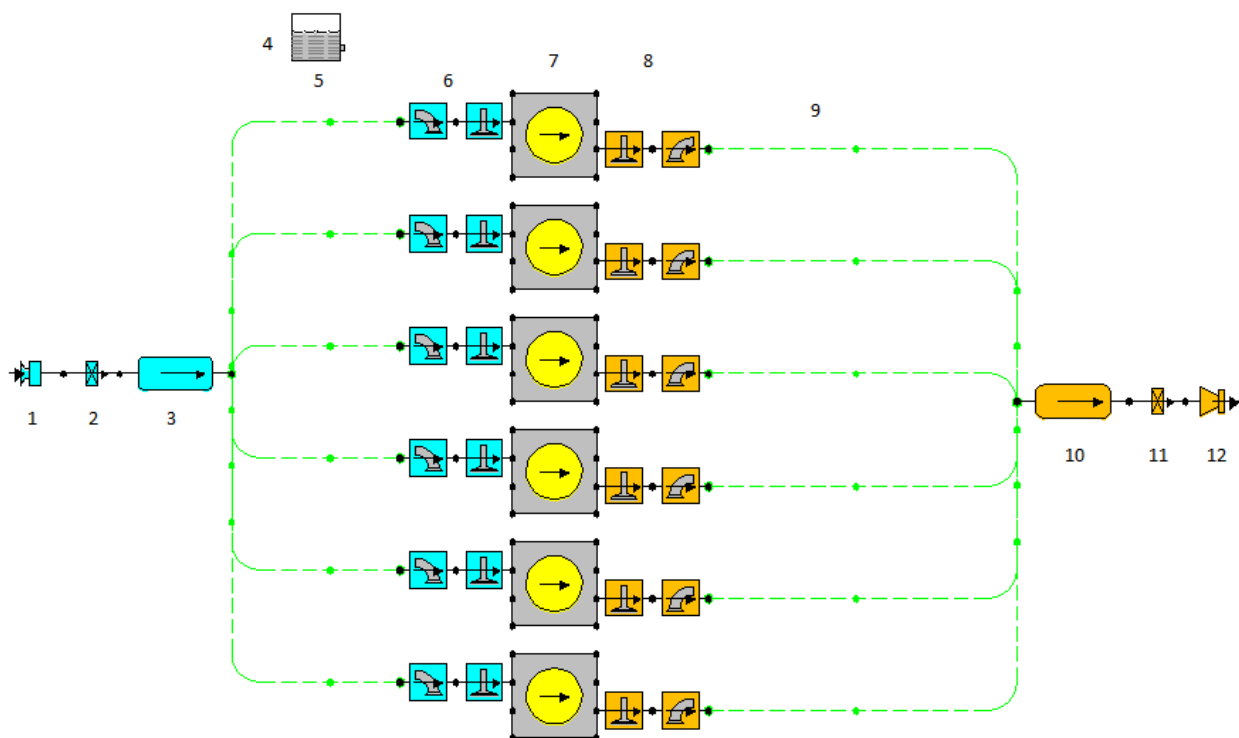
Pokretanjem računalnog programa Lotus otvara se početni zaslon u kojem se dodaju komponente motora. Najprije je potrebno odabrati broj cilindara te se na cilindre dodaju usisni i ispušni ventili i pripadajući otvori.

Potrebno je također odabrati vrstu dizelskog goriva i način direktnog ubrizgavanja.

Label	
Fuel System	Direct Injection
Fuel Type	Diesel

*Slika 4.1 Odabir goriva za motor*

Nakon odabira cilindara i pripadajućih ventila elementi se povezuju pomoću zelenih virtualnih cijevi te sve zajedno čini početni model motora. Model sa slobodnim usisom prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2 Model motora sa slobodnim usisom

Tablica 4.1 Model motora sa slobodnim usisom

Pozicija	Opis
1	Ulaz zraka
2	Suženje na usisu
3	Usisni kolektor
4	Gorivo
5	Usisna cijev
6	Usisni ventil
7	Cilindar
8	Ispušni ventil
9	Ispušna cijev
10	Ispušni kolektor
11	Suženje na ispuhu
12	Ispuh dimnih plinova

Nakon izrade samog modela potrebno je podesiti redosljed paljenja cilindara. Zadani redosljed paljenja cilindara je 1-5-3-6-2-4. Kut periode za 4T proces iznosi  $720^\circ$ . Ako je oznaka za taktnost procesa  $\tau = 2$  ili  $4$ , tada kut periode procesa iznosi  $\tau \pi$ .

Kut između dva uzastopna paljenja kod motora računa se prema sljedećoj formuli:

$$\alpha = \frac{\tau\pi}{z} \quad (4.1.)$$

gdje je:

$\tau$  – taktnost

$z$  – broj cilindara

$$\alpha = \frac{4\pi}{6} = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$$

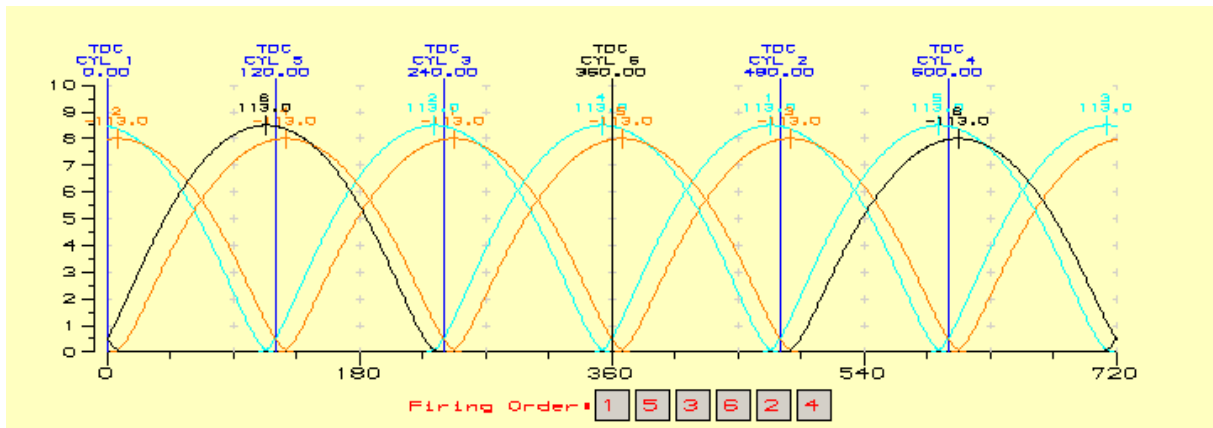
$$\alpha = 120^\circ$$

Za svaki cilindar osim kuteva paljenja, potrebno je definirati promjer, stapaj, stapajni volumen, te se postavlja odgovarajući kompresijski omjer koji iznosi 16,5 : 1. Kutevi paljenja u odnosu na prvi cilindar i s obzirom na redoslijed paljenja 1-5-3-6-2-4 odabrani su kao što je prikazano u Tablici 4.2.

*Tablica 4.2 Odabrani kutevi paljenja*



<b>Broj cilindra:</b>	<b>Kut paljenja:</b>
<b>1</b>	0°
<b>2</b>	480°
<b>3</b>	240°
<b>4</b>	600°
<b>5</b>	120°
<b>6</b>	360°

Nastoji se postići da se svaki cilindar ne pali jedan za drugim kako bi se uravnotežile inercijalne sile i momenti te ostvario što ravnomjerniji okretni moment i mirniji rad motora.



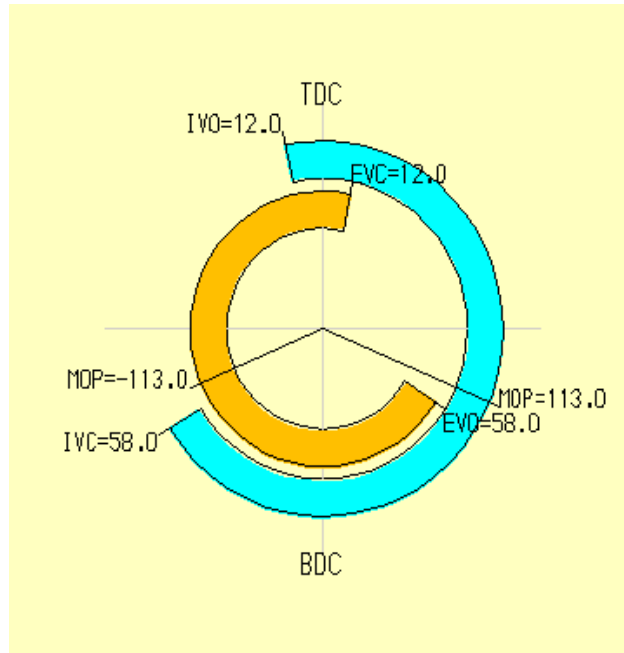
Slika 4. 3 Redoslijed paljenja cilindara

Glavne karakteristike cilindra prikazane su na slici 4.4.

Label	default cylinder
Bore (mm)	84,0000
Stroke (mm)	90,0000
Cyl Swept Volume (l)	0,49876
Total Swept Volume (l)	2,99256
Con-rod Length (mm)	135,00
Pin Off-Set (mm)	0,00
Compression Ratio	16,50
Clearance Volume (l)	0,032178
Phase (ATDC)	360,00
Combustion Model	
Open Cycle HT	

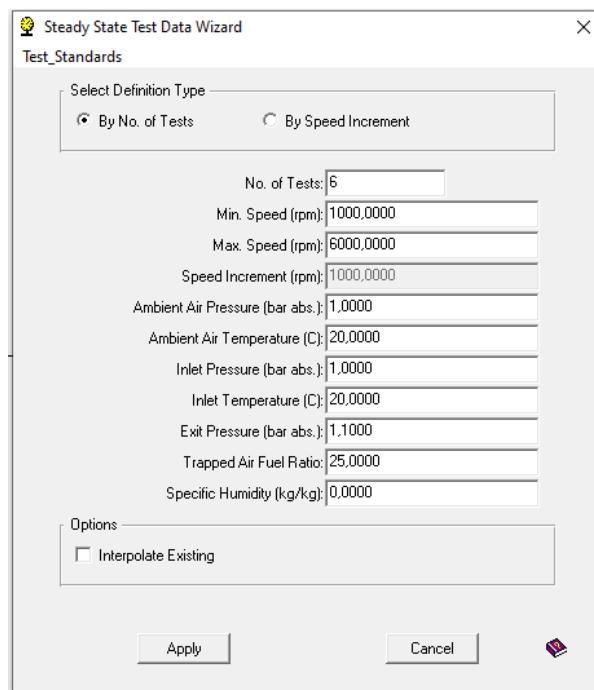
Slika 4. 4 Karakteristike cilindra

Osim cilindara, potrebno je podesiti kuteve paljenja za usisne i ispušne ventile. Kut otvaranja usisnog ventila iznosi  $12^\circ$  prije GMT dok je kut zatvaranja  $58^\circ$  nakon DMT. Iste vrijednosti se postavljaju i za ispušne ventile. Prikaz kuteva prikazan je pomoću Valve Timing Display opcije. MOP ( maximum opening point) vrijednost prestavlja trenutak kada je usisni ventil najviše otvoren i ona iznosi  $113^\circ$ .



Slika 4.5 Prikaz otvaranja i zatvaranja ventila

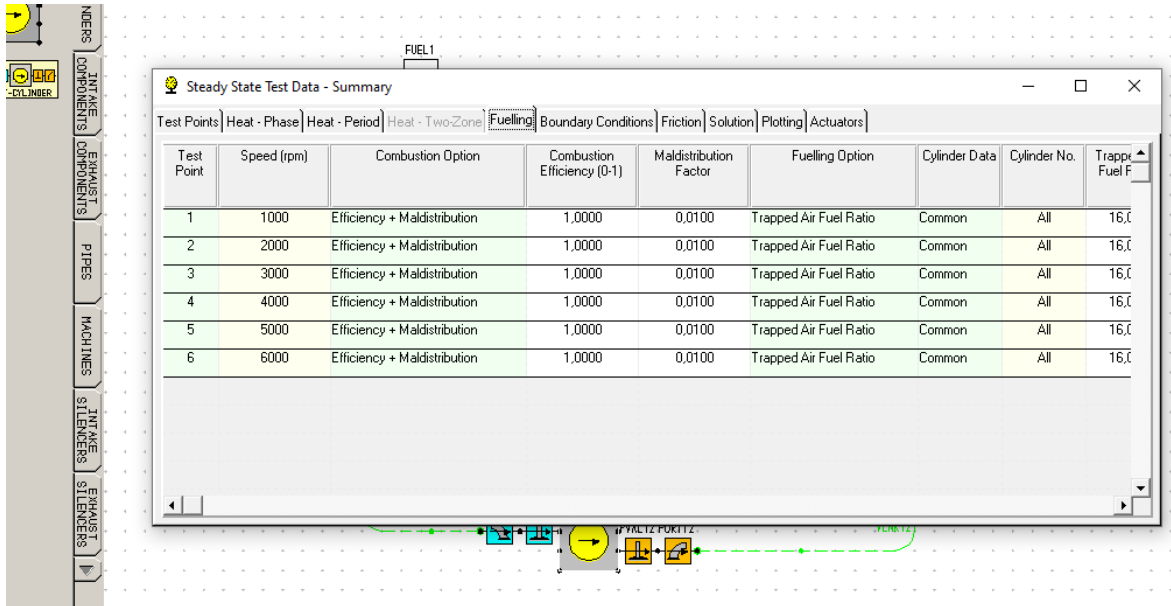
Nadalje, kako bi se mogla pokrenuti simulacija, potrebno je definirati testove pomoću *Steady State Data Wizard* opcije u programu. Odabrano je 5 testova između 1000 i 5000 okr/min za svakih 1000 okretaja. Također je odabrana relativna vlažnost od 0,005 kg/kg.



Slika 4.6 Definiranje testa

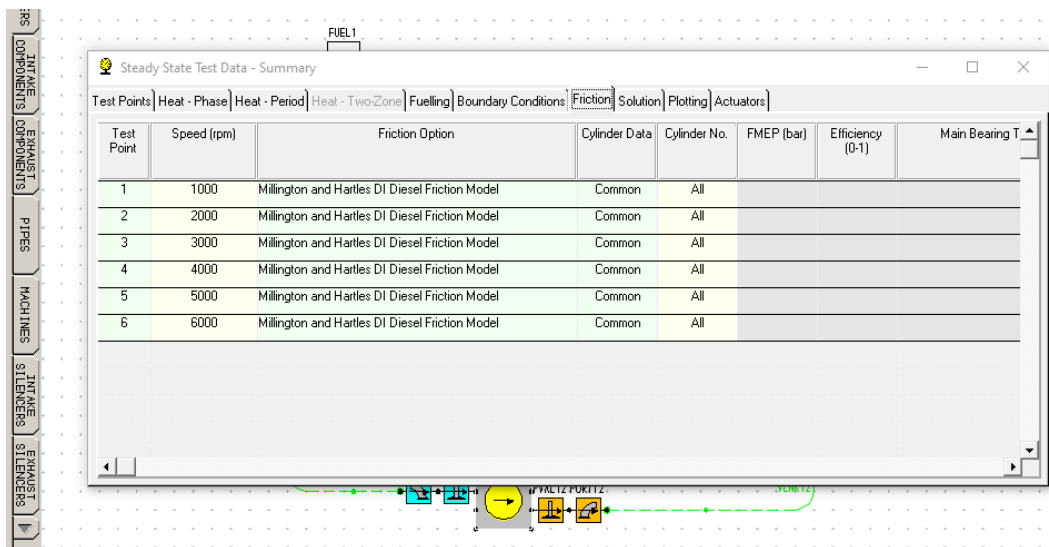
U idućem koraku možemo pogledati rezultate testova u alatu *Steady State Data-Summary*.

U tablici je potrebno podesiti dodatne uvjete. U izborniku *Fueling* postavlja se opcija *Trapped Air Fuel Ratio* te ona iznosi 16. Sve podatke potrebno je podesiti za sve cilindre.



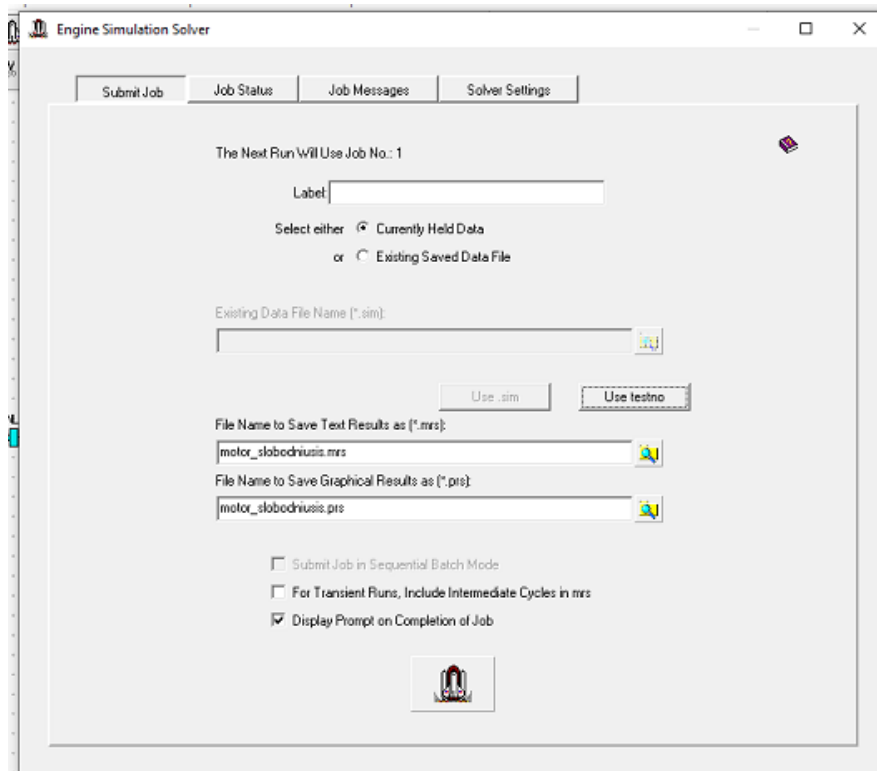
Slika 4.7 Podešavanje opcije *Fueling*

Osim *Fueling* opcije potrebno je podesiti i opciju *Friction* koja se odnosi na vrstu trenja kod motora. Potrebno je podesiti model za dizelski motor sa direktnim ubrizgavanjem.



Slika 4.8 Podešavanje modela trenja

Nakon što smo postavili sve potrebne podatke unutar testa, sada je moguće pokrenuti simulaciju pomoću alata *Engine Simulation Solver*. Pokretanjem simulacije dobiveni su rezultati koji će se kasnije analizirati.

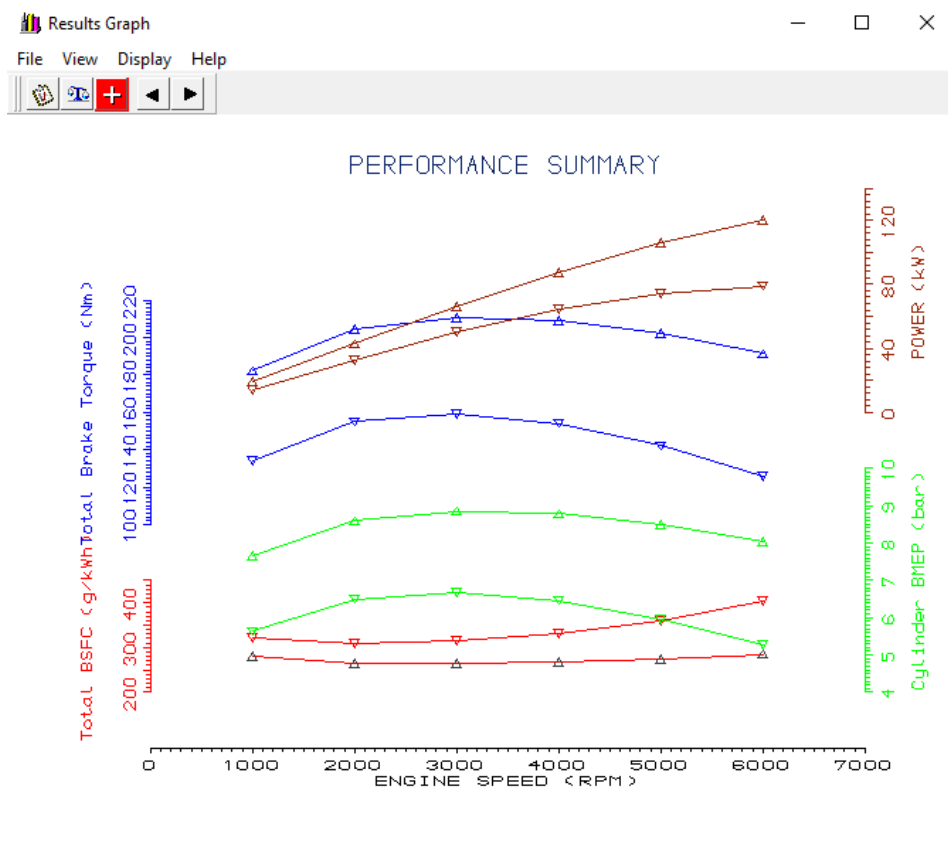


*Slika 4.9 Pokretanje simulacije*

Na kraju ovog poglavlja provedena je usporedba dobivenih rezultata s realnim, sličnim motorom te veličine kako bi se dokazalo da je odabrani model dao dobre rezultate. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima motora Mercedes W140 S300 Turbo Diesel. Motor proizvođača Mercedes je 6-cilindrični dizelski motor stapajnog volumena  $2996 \text{ cm}^3$ .

Usporedba rezultata prikazana je na slici 4.10. Nakon potvrde da zadani model daje realne rezultate, moguće je prijeći na izradu složenijeg modela, odnosno modela s turbopuhalom.

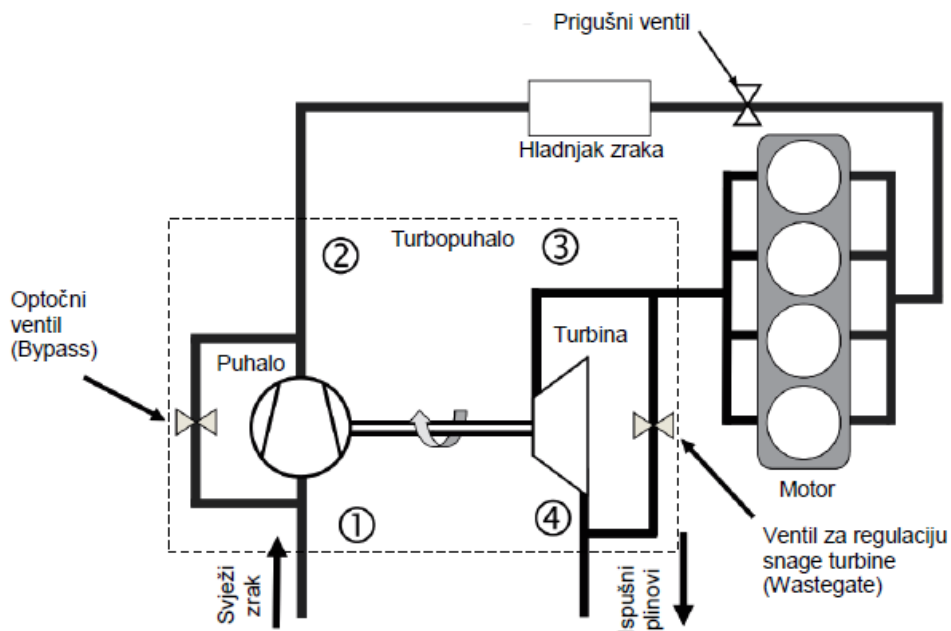




Slika 4.10 Usporedba rezultata s realnim modelom motora

## 5. SIMULACIJA DIZELSKOG MOTORA S PREDNABIJANJEM TURBOPUHALOM

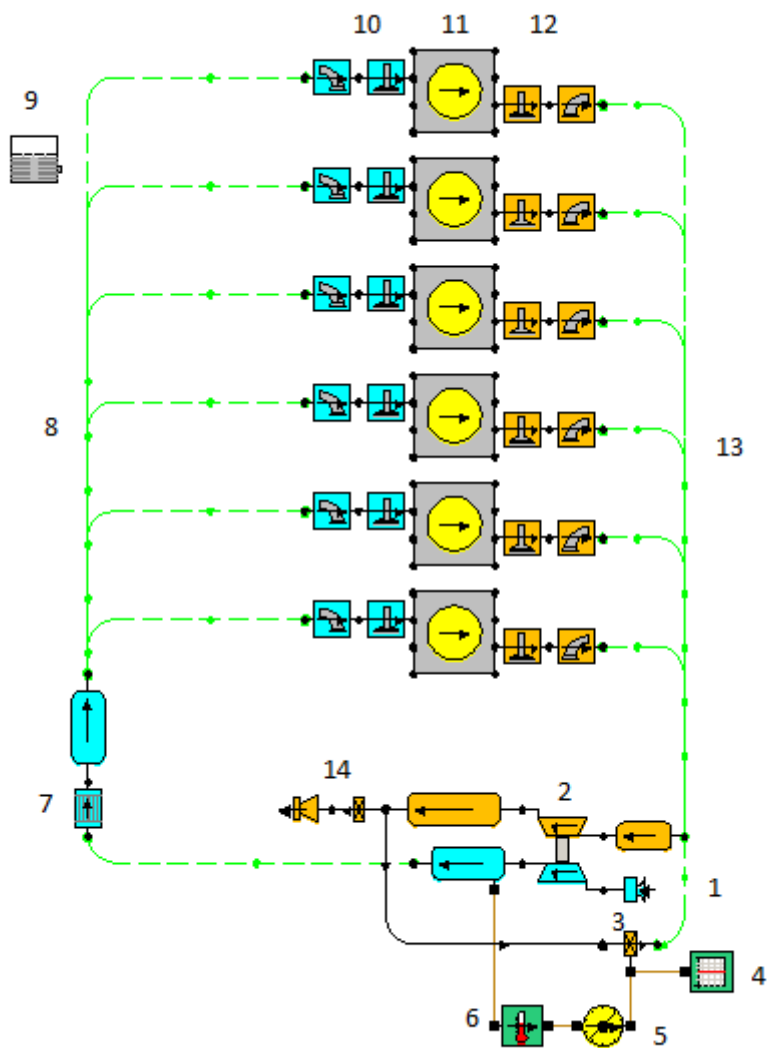
Osim motora sa slobodnim usisom potrebno je predvidjeti varijantu motora s prednabijanjem. Namjena prednabijanja je da se zraku prije usisa poveća gustoća kako bi se u cilindar dovela što veća masa zraka za izgaranje goriva. Izgaranjem veće mase goriva povećava se dovedena toplina, a sukladno s time i snaga motora. Snaga motora je proporcionalna količini zraka i goriva koji ulaze u cilindar. Ako pretpostavimo jednake uvjete za manje i veće motore, veći motori mogu usisati više zraka i pritom ostvariti veću snagu. Ako taj učinak želimo postići na manjem motoru krajnji cilj je dovesti više zraka u cilindar što je moguće ostvariti pomoću turbopuhala. Ugradnjom turbopuhala, snaga i performanse motora se mogu uvelike povećati. Prednabijanje turbopuhalom je danas najčešća izvedba kod Ottovih i dizelskih motora. Turbopuhalo se sastoji od dva osnovna dijela, pogonske turbine na ispuhu te kompresora na usisu zraka. Princip rada turbopuhala temelji se na korištenju dijela energije ispušnih plinova koji pokreću turbinu. Turbina putem vratila pogoni puhalo koje komprimira dovedeni zrak prije usisa u cilindre motora. Ako se u struji zraka koristi samo jedno puhalo i jedna turbina radi se o prednabijanju u jednom stupnju [6].



Slika 5.1 Klipni motor s prednabijanjem turbopuhalom i hlađenjem zraka [3]

## 5.1. Model motora s jednim turbopuhalom

Na početni model motora sa slobodnim usisom potrebno je nadograditi turbopuhalo te povećati snagu zadanog motora.



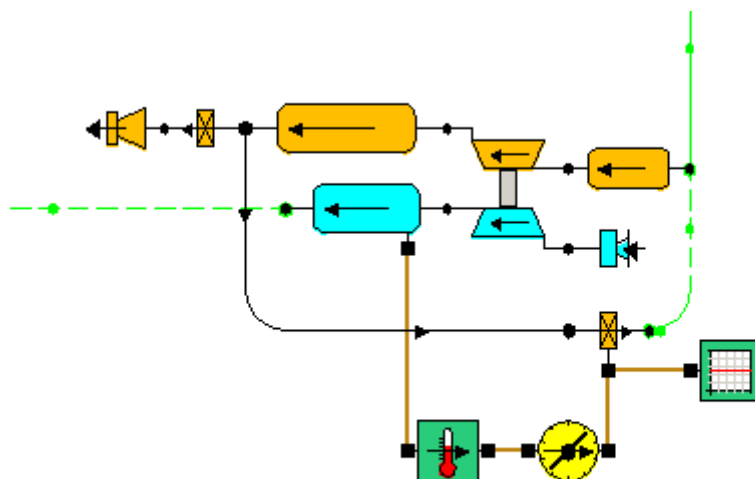
Slika 5.2 Model motora u varijanti prednabijanja s jednim turbopuhalom

Objašnjenje pojedinih elemenata motora dano je u tablici 5.1. Kod ovog modela korištene su virtualne cijevi zbog brzine izvođenja simulacije. Kod normalnih cijevi s povećanjem duljine cijevi povećava se i broj ćelija te dolazi do produljenja vremena izvođenja simulacije.

Tablica 5. 1 Model motora s jednim turbopuhalom

Pozicija	Opis
1	Usis u kompresor
2	Turbopuhalo
3	Waste-gate ventil
4	Pokazivač
5	Aktuator
6	Senzor tlaka
7	Hladnjak zraka
8	Usisne cijevi
9	Gorivo
10	Usisni ventil
11	Cilindar
12	Ispušni ventil
13	Ispušne cijevi

Zbog složenosti modela i uvođenja turbopuhala u model , u rezultatima je potrebno podesiti više ciklusa do konvergencije. Unutar opcije *Cycle limits* postavlja se „*user defined cycle limits*“ na 10. Osim samog turbopuhala, kako bi se mogao regulirati tlak prednabijanja, na ispuh se postavlja west-gate ventil. West-gate ventil omogućava da dio ispušnih plinova zaobiđe lopatice turbine kako ne bi došlo do prebrze vrtnje turbine pri visokim brzinama vrtnje, te se pomoću optočnog ili rasteretnog ventila regulira tlak prednabijanja. Sustav optočnog ventila prikazan je na slici 5.3. [5]



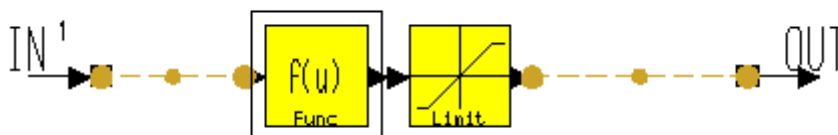
Slika 5.3 Optočni ventil

Unutar senzora definira se veličina koja se mjeri, a to je tlak. Ventil se otvara onda kada je tlak prednabijanja iza puhala dovoljno visok i tada dio ispušnih plinova zaobilazi turbinu. Ovim se postupkom usporava turbina tj. smanjuje se njezina snaga. Aktuator služi za pogon ventila te je potrebno definirati funkciju unutar aktuatora koja određuje kolika će biti protočna površina west-gate ventila s obzirom na senzor tlaka. Dakle, kao mjerodavna veličina definira se minimalna protočna površina u  $\text{mm}^2$  ( min CSA).

Actuator Label	default actuator
Actuator Variable	Minimum C.S.A (mm2)
Actuator Group Type	Single
Actuator Apply Type	By Value
Actuator Solve Type	Per Time Step
Actuated Element(s)	Throttle 2 (exhaust)

Slika 5.4 Definiranje mjerodavne veličine unutar aktuatora

Funkcija unutar aktuatora preračunava vrijednost tlaka očitnog na senzoru u minimalnu protočnu površinu west-gate ventila koja je potrebna.



Slika 5.5 Definiranje funkcije unutar aktuatora u varijanti sa jednim turbopuhalom

Minimalna protočna površina se računa prema sljedećem izrazu:

$$\min. CSA = \frac{p_{\text{tlačni spremnik}} \cdot A_{\text{dijafragma}} - F_{\text{opruga}}}{k_{\text{opruga}}} \cdot x \quad (5.1.)$$

Pri čemu je:

$p_{\text{tlačni spremnik}}$  - ulazna vrijednost funkcije F1, tlak

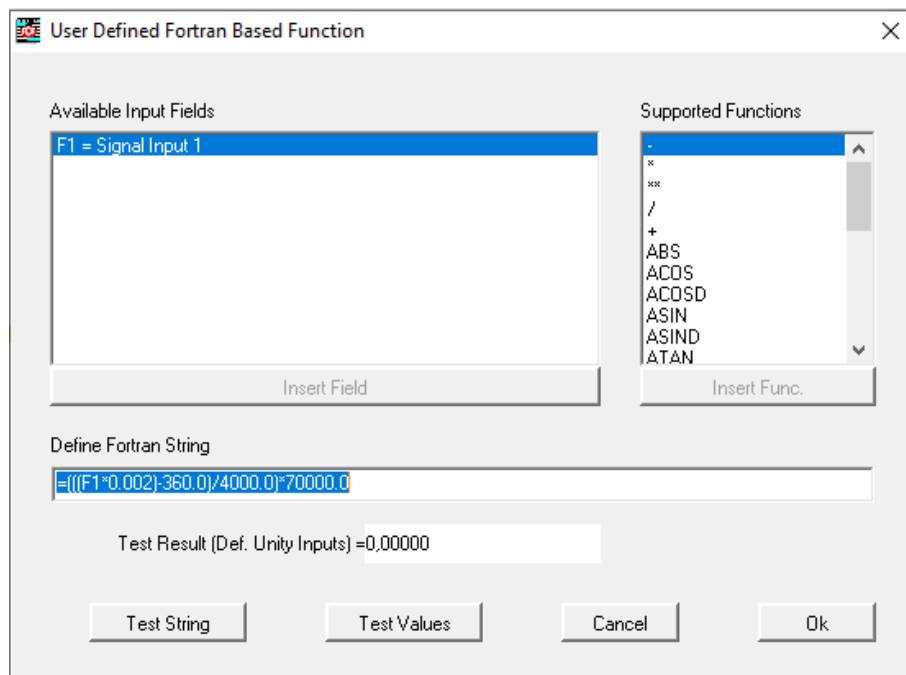
$A_{\text{dijafragma}}$  - površina poprečnog presjeka dijafragme

$F_{\text{opruga}}$  - sila opruge

$k_{\text{opruga}}$  – krutost opruge

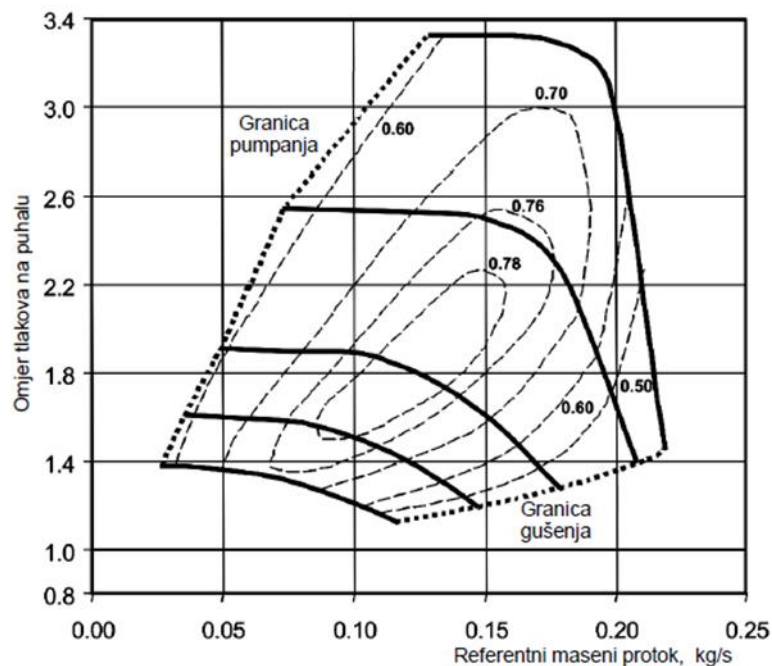
$x$  - koeficijent

Vrijednost F1 opisuje razliku tlakova od početka otvaranja ventila do maksimalne otvorenosti ventila kada protočna površina poprimi svoju maksimalnu vrijednost. Nakon izračunatih vrijednosti površine poprečnog presjeka, sile u opruzi te krutosti opruge na ventilu moguće je upisati funkciju unutar programa prema danoj formuli.



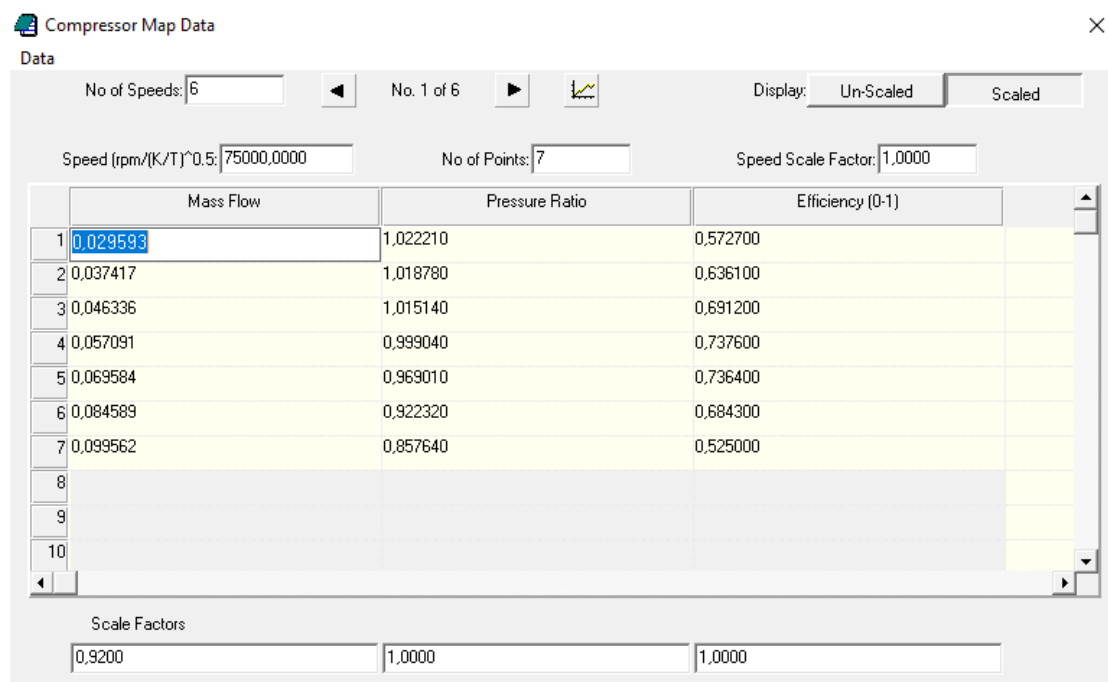
Slika 5.6 Funkcija unutar aktuatora

Za definiranje karakteristika turbopuhala u računalnom programu Lotus potrebno je prilagoditi mapu kompresora i mapu turbine prema veličini motora i ciljanim karakteristikama motora. Mapa kompresora predstavlja dijagram ovisnosti omjera tlakova na puhalu i stupnja djelovanja puhalu u ovisnosti o masenom protoku kroz puhalo. Omjer tlakova definiran je kao apsolutni izlazni tlak podijeljen s apsolutnim ulaznim tlakom. U polju su prikazane linije konstantne brzine vrtnje i konstantnog izentropskog stupnja djelovanja puhalu. Porastom brzine vrtnje raste maseni protok i omjer tlakova. Izentropski stupanj djelovanja puhalu najviši je u središnjem dijelu dijagrama, a njegova vrijednost opada pd središta prema rubnim dijelovima radnog područja puhalu. Granica pumpanja predstavlja graničnu liniju unutar koje je ostvaren stabilan rad puhalu. Granica gušenja određuje granicu ispod koje pada najveći ostvarivi maseni protok kroz puhalo. Prelaskom ove granice potrebno je odabrati veće puhalo [9].



Slika 5.7 Prikaz polja karakteristike kompresora [3]

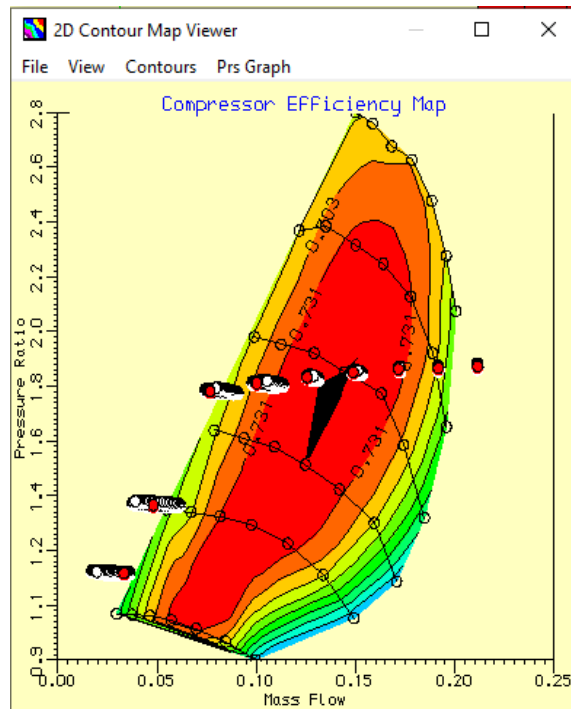
Pomoću alata *Compressor Map Data* podešavaju se faktori (scale factors) za maseni protok i za omjer tlakova te se dobiva tražena karakteristika puhalu. Tablica prikazuje vrijednosti za svih 7 točaka za svaki od 5 testova koji se provode te čine krivulje na dijagramu karakteristike kompresora.



*Slika 5.8 Podešavanje scale faktora za karakteristiku kompresora*

Nakon definiranja tablice dobiva se konačna karakteristika kompresora u obliku dijagrama. Crvenom bojom prikazano je polje najveće iskoristivosti kompresora pri njegovom radu, te je većina radnih točaka smještena unutar tog polja. Iz dijagrama je vidljivo da za radne točke pri nižim brzinama vrtnje motora rasteretni ventil niti nema utjecaja jer se turbopuhalo još nije doseglo dovoljno veliku brzinu vrtnje. Karakteristika kompresora prikazana je na slici 5.9.



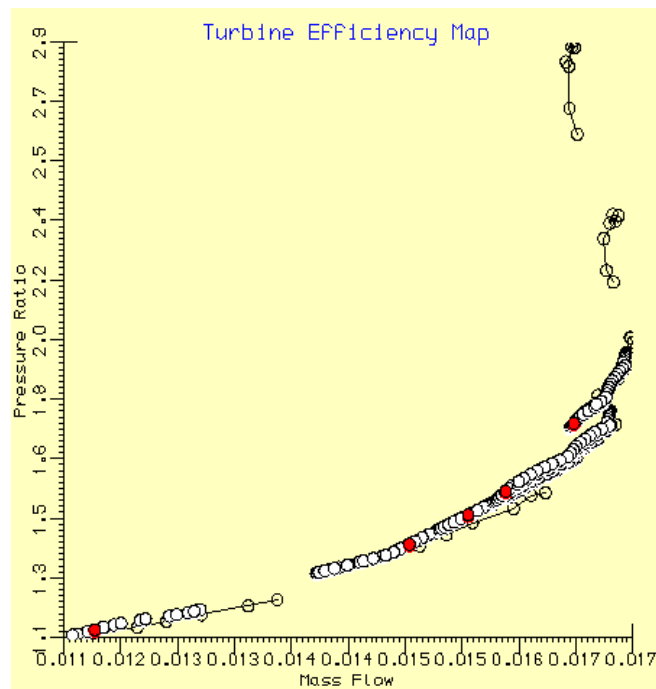


Slika 5.9 Karakteristika kompresora modela motora s jednim turbopuhalom

Na isti je način potrebno definirati i karakteristike turbine za pogon puhalo. Pomoću *alata Turbine Map* definiraju se faktori za maseni protok i omjer tlakova. Nakon definiranja radnih točaka za svih 5 testova u tablici dobiva se odgovarajuća karakteristika turbine (Slika 5.10.).

	Mass Flow	Pressure Ratio	Efficiency (0-1)
1	0.011336	1.099170	0.677800
2	0.011640	1.113660	0.674000
3	0.012090	1.129950	0.679900
4	0.012390	1.147500	0.681900
5	0.012750	1.167210	0.679400
6	0.013230	1.194030	0.672900
7	0.013530	1.212930	0.667600
8			
9			
10			

Slika 5.10 Podešavanje scale faktora za karakteristiku turbine



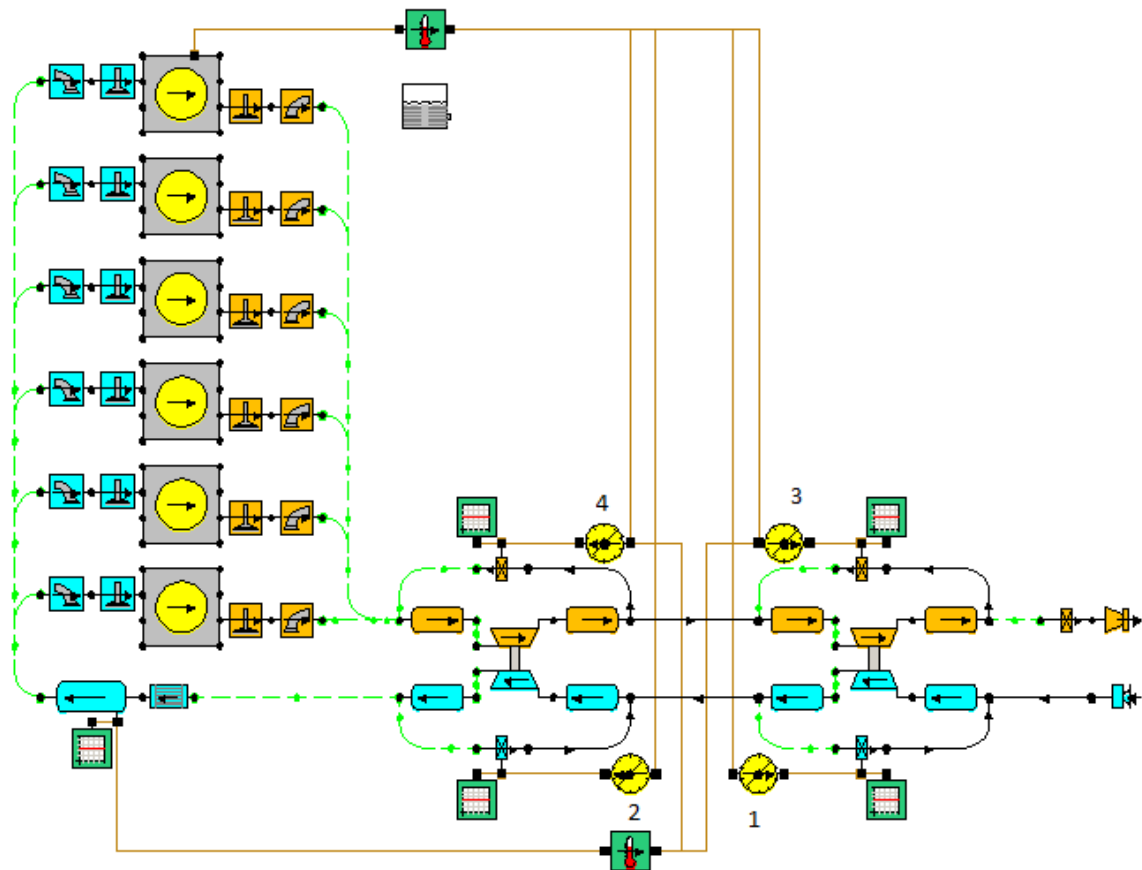
*Slika 5.11 Karakteristika turbine za model motora s jednim turbopuhalom*

Dijagram prikazuje ovisnost masenog protoka i omjera tlakova. Povećanjem brzine vrtnje motora raste maseni protok ispušnih plinova kroz turbinu.

## **5.2. Model motora s dva turbopuhala**

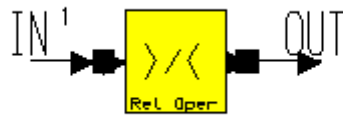
Pored modela motora s jednim turbopuhalom potrebno je izraditi i varijantu motora s dva turbopuhala. Sekvencijalno prednabijanje se koristi kod motora koji moraju raditi u širokom rasponu brzina vrtnje motora i opterećenja. Sekvencijalni turbo sustavi obično spadaju u dvije grupe, sustave u kojoj manja turbina prednabija motor dok se druga, veća turbina ne zavrti (dok ne postigne vrijednost tlaka) i preuzme posao prednabijanja, i sustave u kojima je prednabijanje višestupanjsko, gdje veća turbina tlači zrak koji je prethodno stlačila manja. Kod jednostupanjskog prednabijanja turbopuhalo je dimenzionirano za očekivani ili predviđeni režim rada motora, ali pri niskim brzinama vrtnje ono nije u stanju dovoljno podignuti tlak prednabijanja. Manje turbopuhalo reagira brzo i omogućuje ostvarivanje višeg oketnog momenta pri niskim brzinama vrtnje motora. Međutim, njegov kapacitet je ograničen jer brzo dostiže granicu gušenja. Veće turbopuhalo može osigurati dovoljnu količinu zraka za rad pri

visokim brzinama vrtnje motora, ali nije u mogućnosti ostvariti dovoljno visoki tlak zraka pri niskim brzinama vrtnje motora. Zbog navedenih razloga kvalitetnije rješenje je kombinacija većeg i manjeg turbopuhala pri čemu se manje turbopuhalo koristi pri nižim brzinama vrtnje motora, a veće turbopuhalo pri višim brzinama vrtnje motora te za postizanje maksimalne snage motora. Model motora izrađen je slično izvedbi motora BMW N57D30 sa sekvencijalnim prednabijanjem [8].



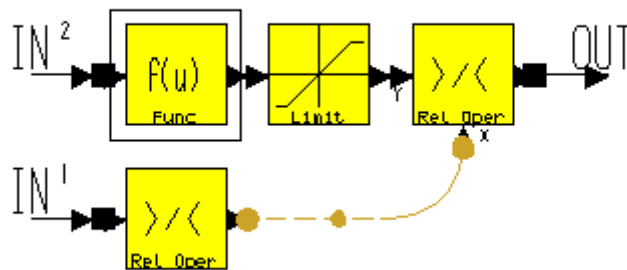
*Slika 5.12 Model motora u varijanti sekvencijalnog prednabijanja*

Svi elementi zadanog motora opisani su u tablicama 4.1. i 5.1. Model motora sadrži dva turbopuhala, niskotlačno nakon usisa zraka, te visokotlačno turbopuhalo koje preuzima opterećenje na nižim brzinama vrtnje motora. Aktuatori koji upravljaju radom rasteretnih ventila turbina podešeni su na način da se do brzine vrtnje motora od 0 do 2500 o/min ispušni plinovi usmjeravaju na turbinu manjeg turbopuhala, a iznad 2500 o/min se ispušni plinovi obilaznim vodom usmjeravaju na turbinu većeg turbopuhala.



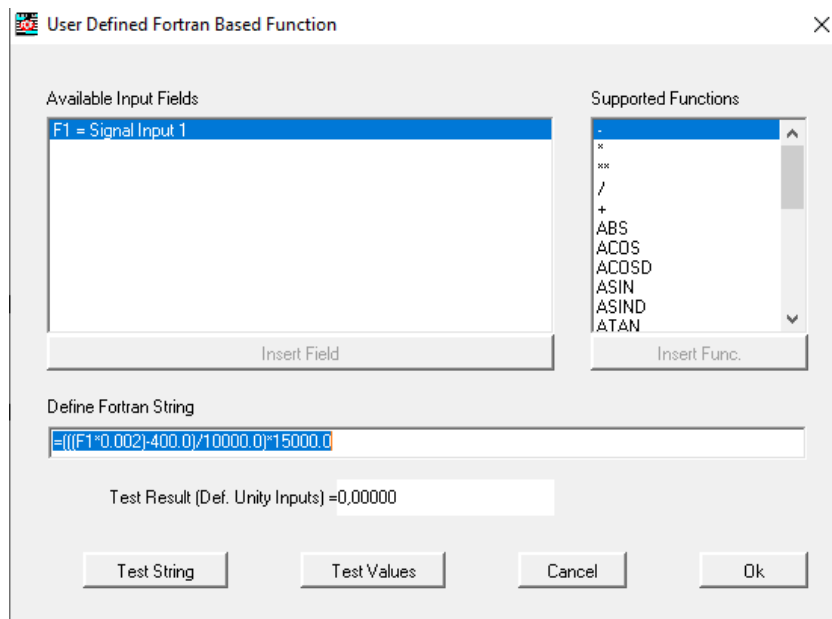
Slika 5.13 Funkcija aktuatora 1 u varijanti s dva turbopuhala

Nakon izlaska iz cilindra, ispušni plinovi dolaze do visokotlačne turbine i rasteretnog ventila. Unutar aktuatora 4 potrebno je definirati funkciju koja opisuje prolaz ispušnih plinova kroz taj ventil ovisno o tlaku koji je postignut i očitana pomoću senzora tlaka, te o brzini vrtnje motora koja je očitana pomoću senzora na zamašnjaku motora.



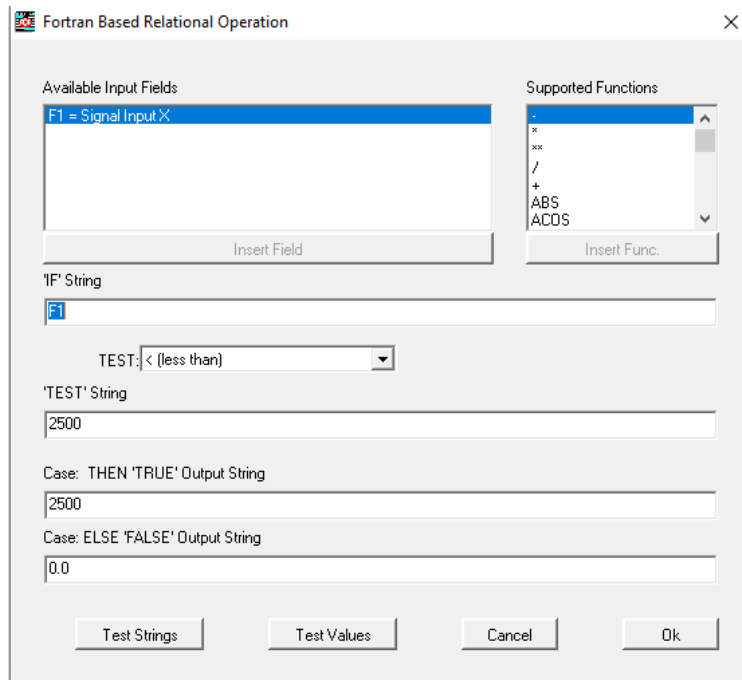
Slika 5.14 Definiranje funkcije unutar aktuatora 4

Funkcija je određena pomoću dvije ulazne varijable, a to su tlak i brzina vrtnje. Ulaz funkcije 1 definiran je brzinom vrtnje motora dok je ulaz funkcije 2 definiran tlakom nakon puhala.



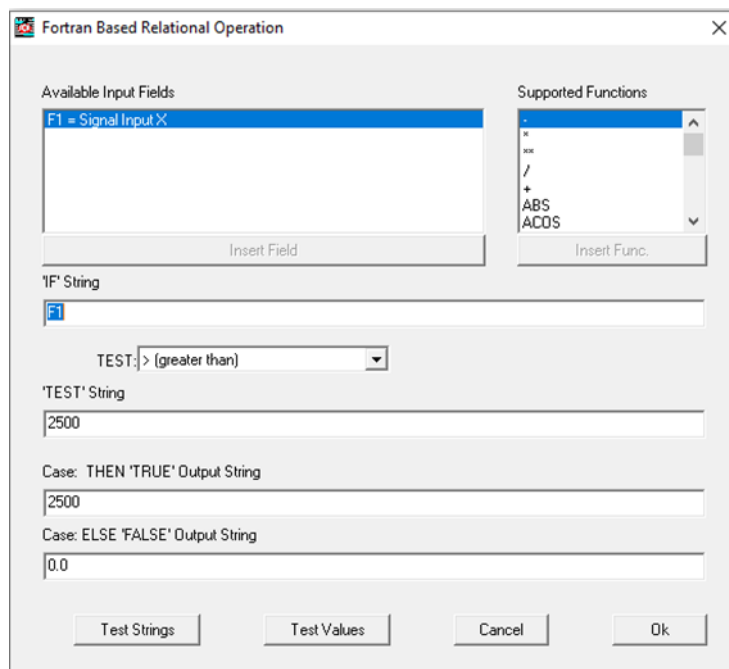
*Slika 5.15 Funkcija ulazne varijable 2 unutar aktuatora 3*

Ako je brzina vrtnje manja od 2500 o/min tada ispušni plinovi prolaze kroz manje turbopuhalo, tj. visokotlačnu turbinu. Kada se postigne brzina vrtnje veća od 2500 o/min tada se otvara optočni ventil te ispušni plinovi zaobilaze manje turbopuhalo i odlaze prema većem turbopuhalu, tj. niskotlačnoj turbini kako bi se mogla ostvariti puna snaga prednabijanja na izlazu.



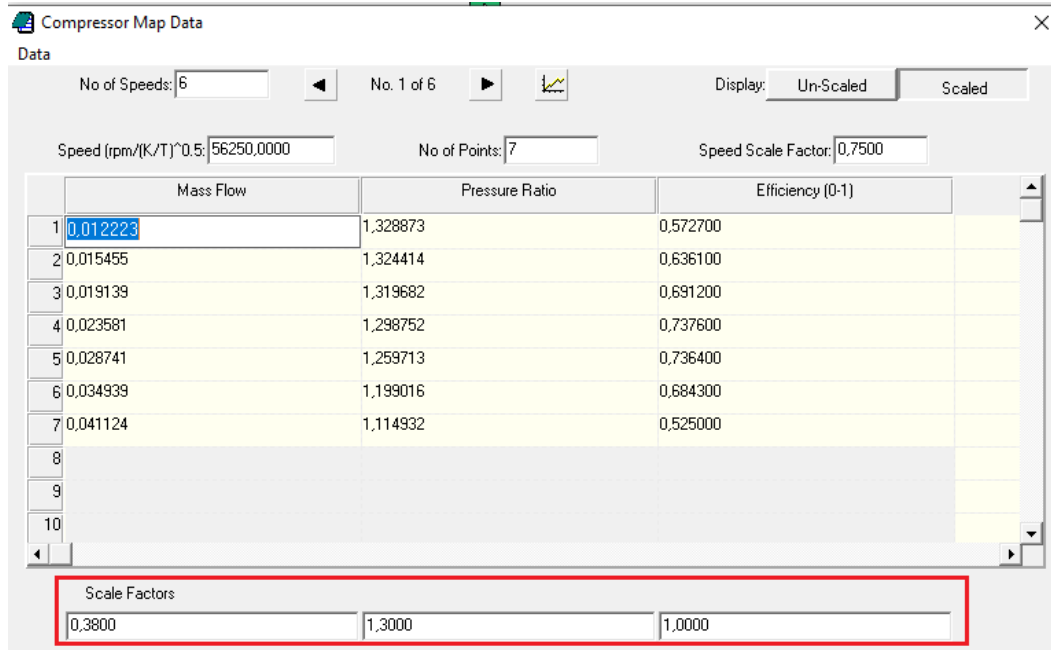
*Slika 5.16 Funkcija ulazne varijable 1 unutar aktuatora 3*

Prema istom principu definira se funkcija unutar aktuatora 4 na visokotlačnom turbopuhalu koje preuzima opterećenje na višim brzinama vtnje motora.

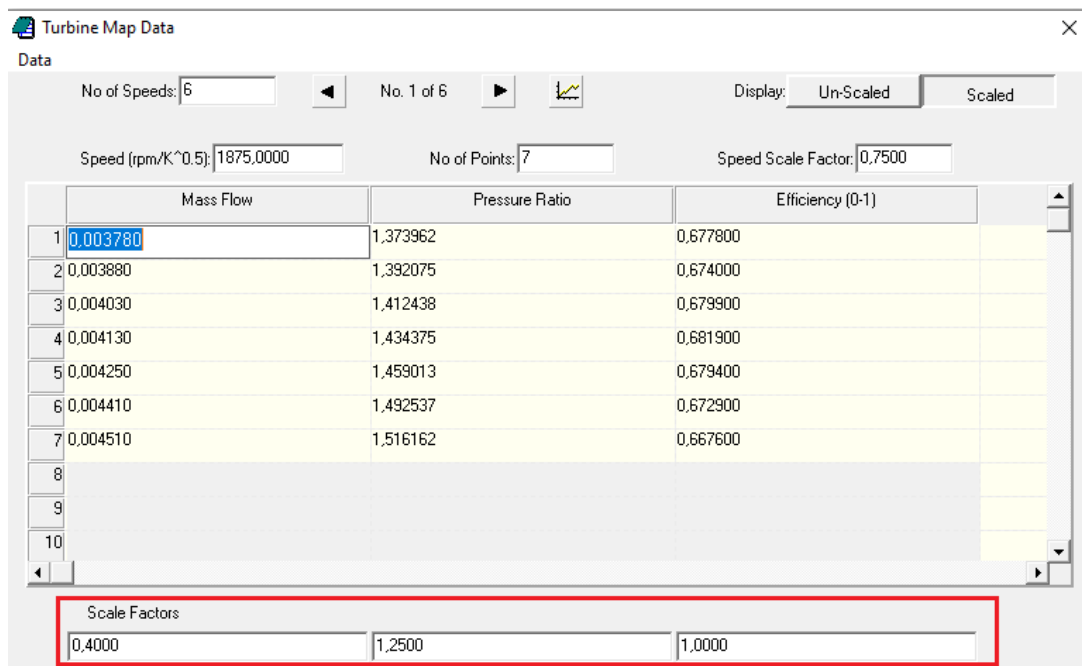


*Slika 5.17 Funkcija ulazne varijable 1 unutar aktuatora 4*

Nakon podešavanja svih aktuatora, potrebno je definirati karakteristike puhalo i turbine za svako pojedino turbopuhalo. Krajnji cilj je da radne točke budu unutar polja najveće iskoristivosti na dijagramu. Analiza se vrši promjenom faktora za maseni protok i za omjer tlakova, od manje prema većoj vrijednosti te se na taj način dolazi do finalnih rezultata.



Slika 5.18 Podešavanje faktora za karakteristiku kompresora

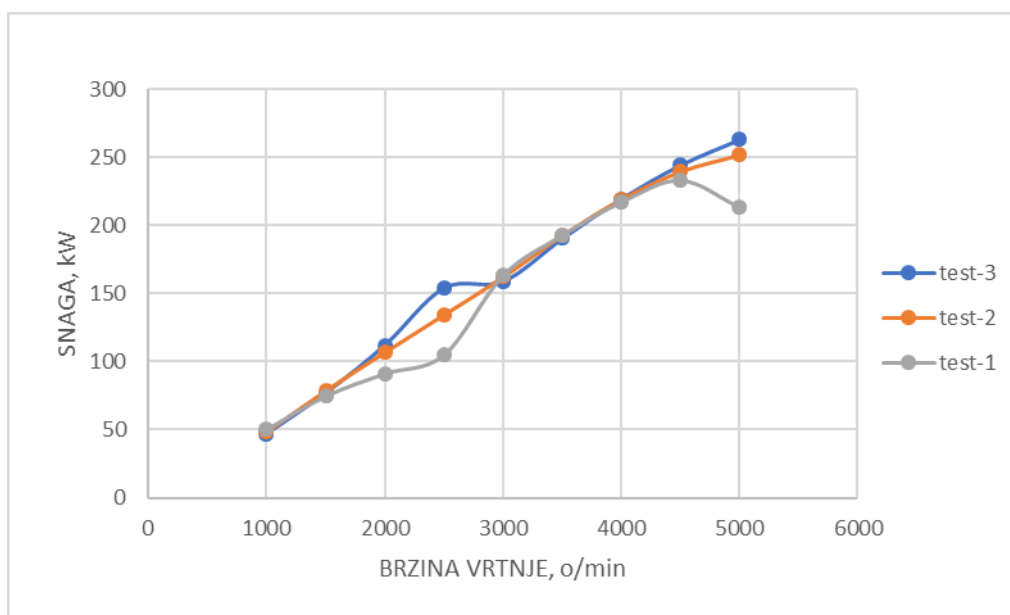


Slika 5.19 Podešavanje faktora za karakteristiku turbine

Kod prve varijante (test 1) za niskotlačno turbopuhalo odabrani faktori za maseni protok iznose 0,38 na strani puhala, te 0,4 na strani turbine. Za visokotlačno turbopuhalo faktori za maseni protok iznose 1,2 na strani puhala te 1,3 na strani turbine.

Za drugu varijantu (test 2) odabrani faktori za niskotlačno turbopuhalo iznose 0,55 na strani puhala te 0,5 na strani turbine. Za visokotlačno turbopuhalo odabrani faktori za maseni protok iznose 1,3 na strani puhala te 1,4 na strani turbine.

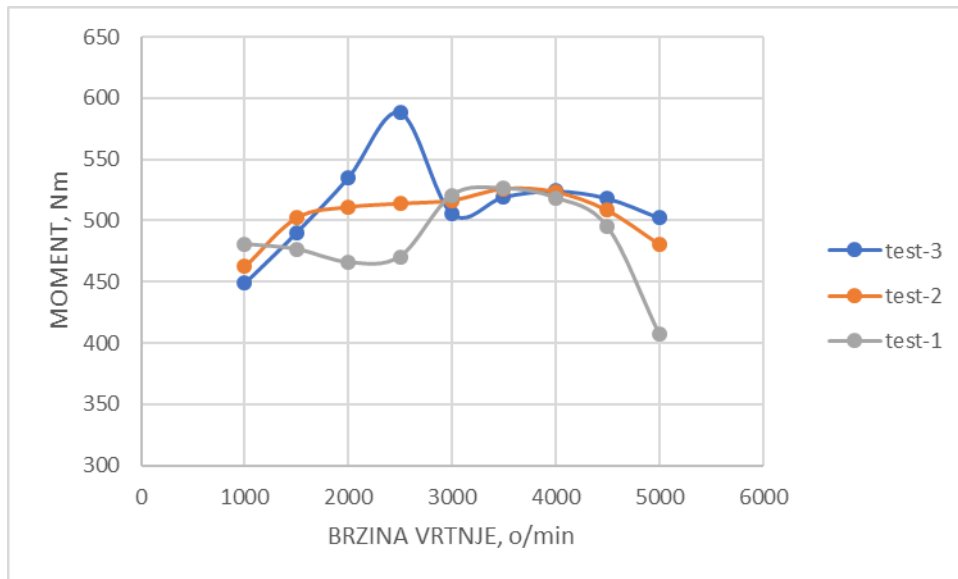
Za treću, finalnu varijantu (test 3) na strani niskotlačnog puhala usvaja se vrijednost 0,66 za maseni protok i 1,3 za omjer tlakova na strani puhala te 0,6 i 1,25 za turbinu. Za visokotlačno puhalo vrijednosti faktora iznose 1,5 za maseni protok i 1,3 za omjer tlakova na strani puhala. Na strani turbine usvojene su vrijednosti 1,6 za maseni protok i 1,25 za omjer tlakova. Rezultati za različite varijante prikazani su dijagramima za snagu, okretni moment, specifičnu potrošnju goriva i srednji efektivni tlak.



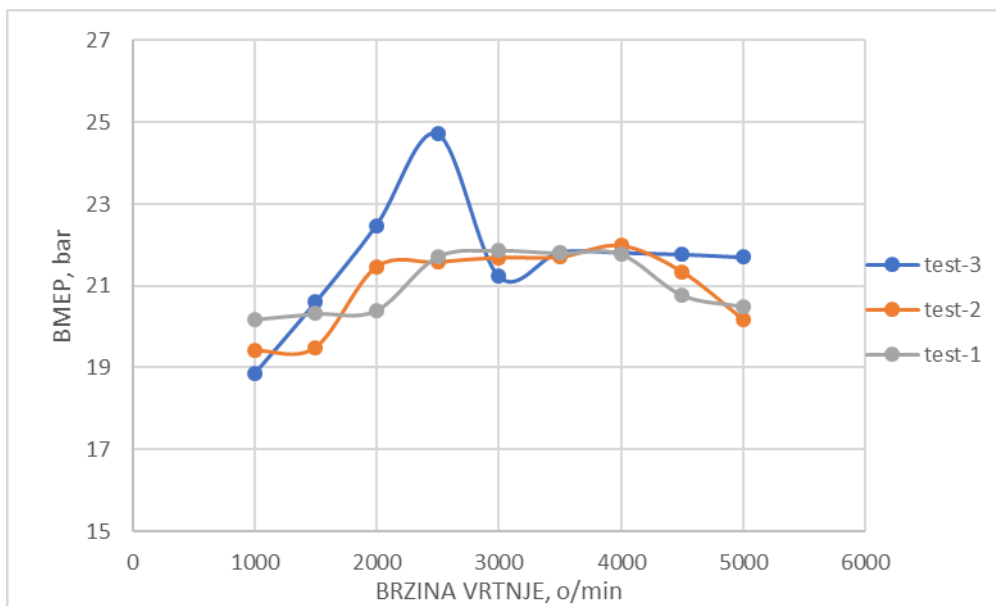
Slika 5.20 Usporedba snaga motora

Iz rezultata je vidljivo da povećanjem faktora za određenu karakteristiku puhala i turbine, dolazi do povećanja snage motora što je i cilj procesa prednabijanja motora. Okretni moment motora pri nižim brzinama vrtnje raste, dok pri višim brzinama vrtnje lagano pada. Specifična potrošnja goriva je manja pri nižim brzinama vrtnje, dok pri višim brzinama raste što je i očekivano.

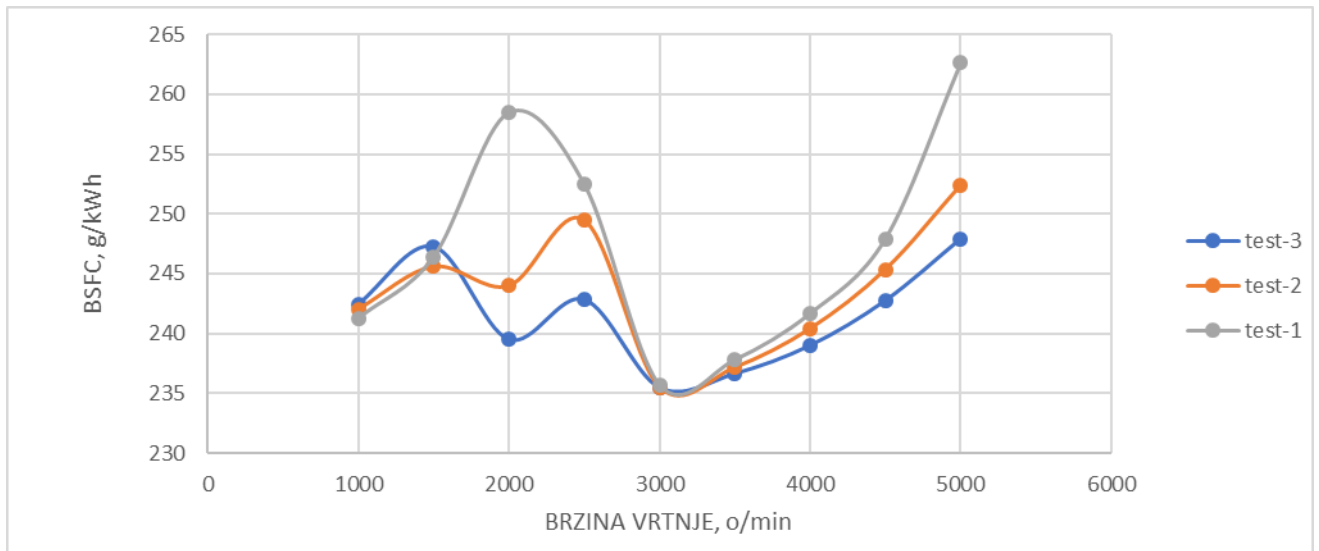




Slika 5.21 Usporedba okretnih momenata motora

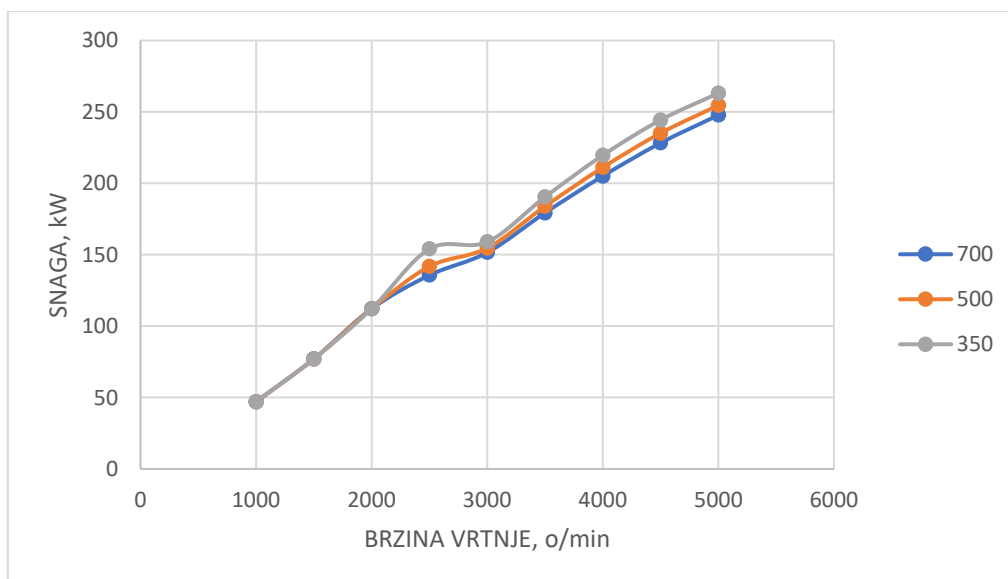


Slika 5.22 Usporedba srednjih efektivnih tlakova

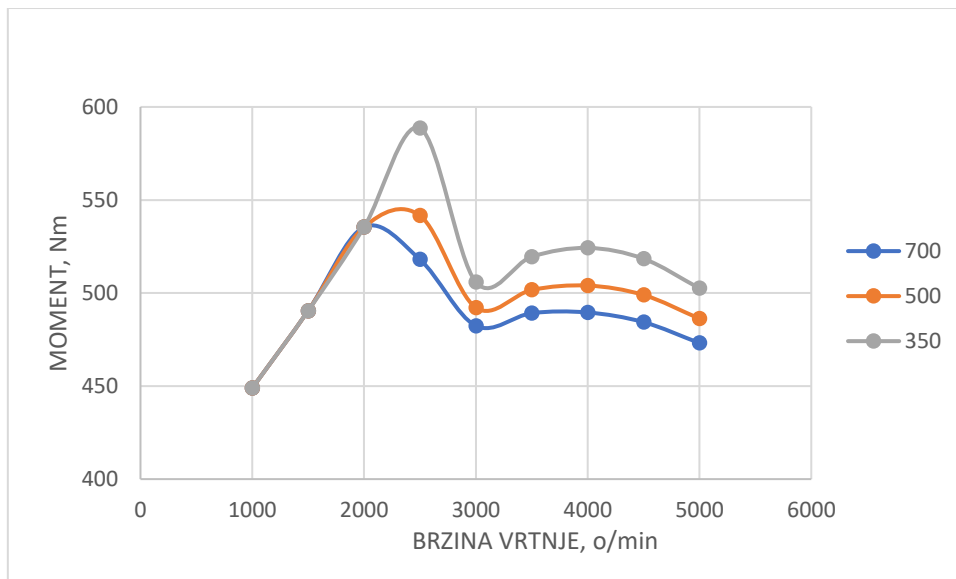


*Slika 5.23 Usporedba specifične potrošnje goriva*

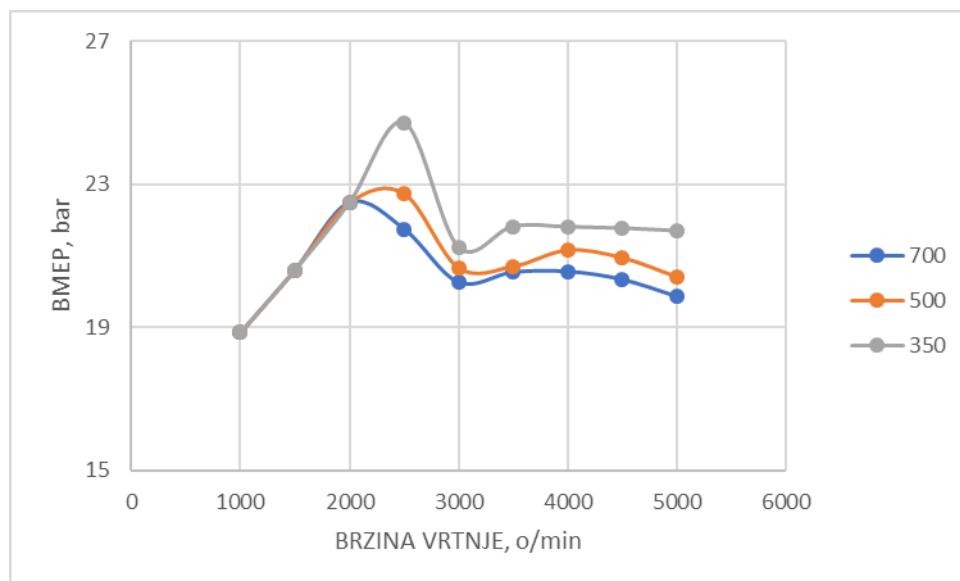
U sklopu ovog diplomskog rada provedena je i analiza utjecaja promjene protočne površine obilaznog voda i rasteretnog ventila turbina na karakteristike motora. Analiza se vršila za visokotlačno turbopuhalo za vrijednosti minimalne protočne površine od 350, 500 te 700 mm<sup>2</sup>. Rezultati dobiveni za različite vrijednosti protočnih površina prikazani su dijagramima za snagu, okretni moment, srednji efektivni tlak i specifičnu potrošnju goriva. Što je protočna površina na ventilu manja dobivaju se veća snaga i veći okretni moment motora.



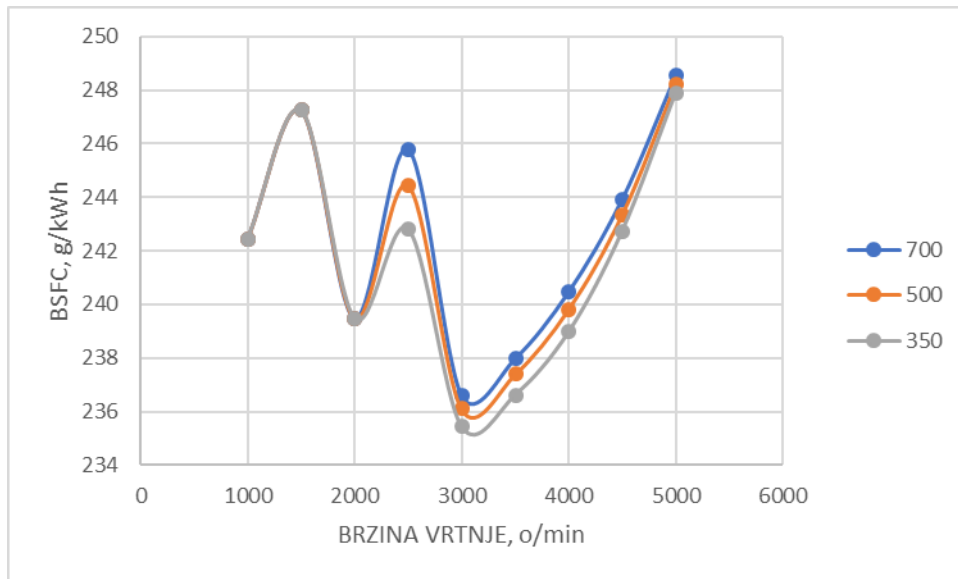
*Slika 5.24 Usporedba snaga za različite protočne površine ventila*



Slika 5.25 Usporedba momenata za različite protočne površine na ventilu

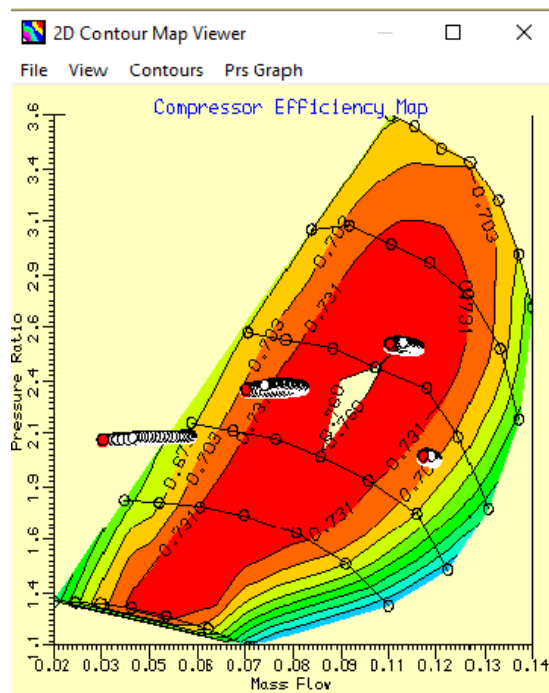


Slika 5.26 Usporedba srednjih efektivnih tlakova za različite protočne površine

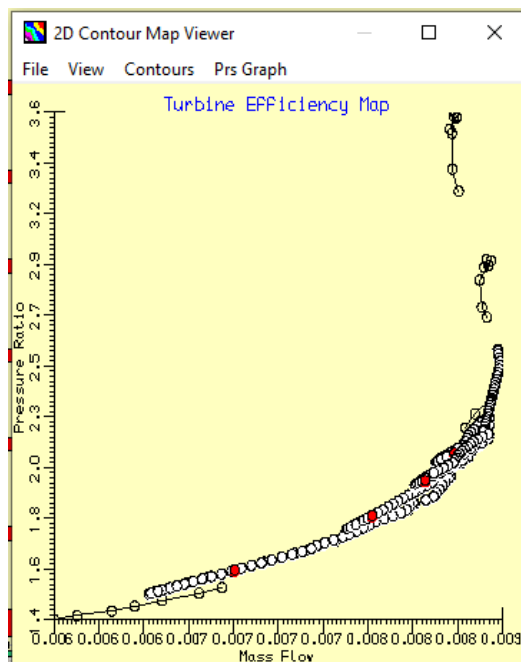


Slika 5.27 Usporedba specifične potrošnje goriva za različite protočne površine

U nastavku su prikazane karakteristike kompresora i turbine u varijanti prednabijanja s dva turbopuhala koje su dobivene za usvojene faktore. Kod karakteristike kompresora i turbine niskotlačnog turbopuhala prikazane su radne točke do 2500 o/min jer se tada optočni ventil potpuno otvara kod kompresora kao i rasteretni ventil kod turbine.

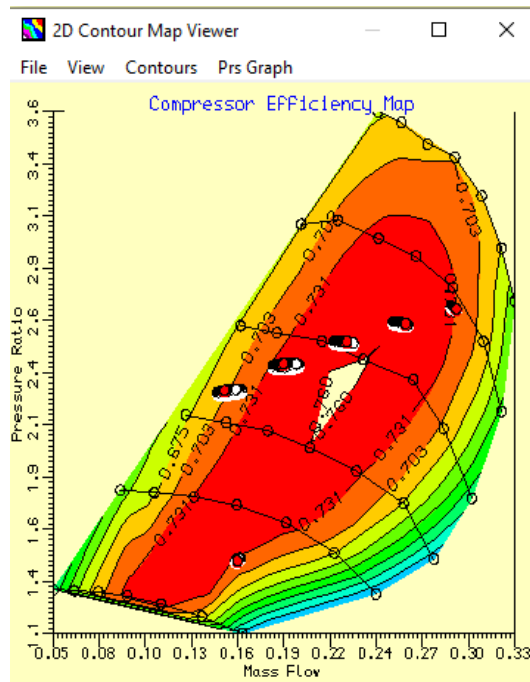


Slika 5.28 Karakteristika kompresora za niskotlačno turbopuhalo

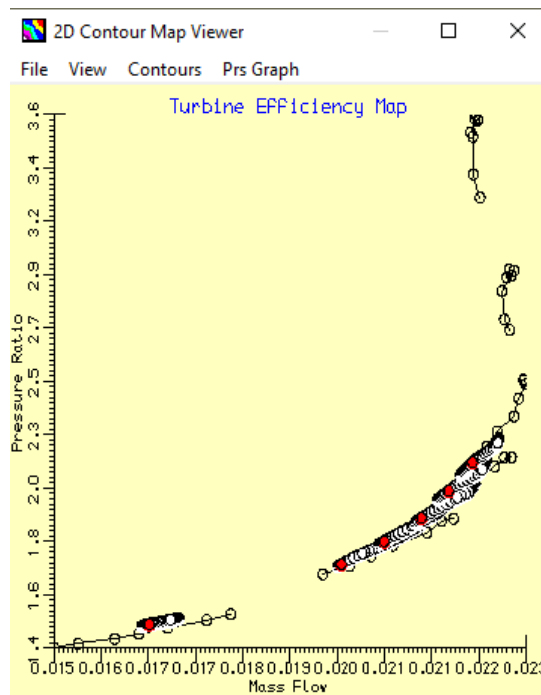


*Slika 5.29 Karakteristika turbine za niskotlačno turbopuhalo*

Kod karakteristike kompresora i turbine za visokotlačno turbopuhalo prikazane su radne točke pri višim brzinama vrtnje. Iznad 2500 o/min je otvoren optočni ventil na strani kompresora kao i rasteretni ventil na strani turbine.



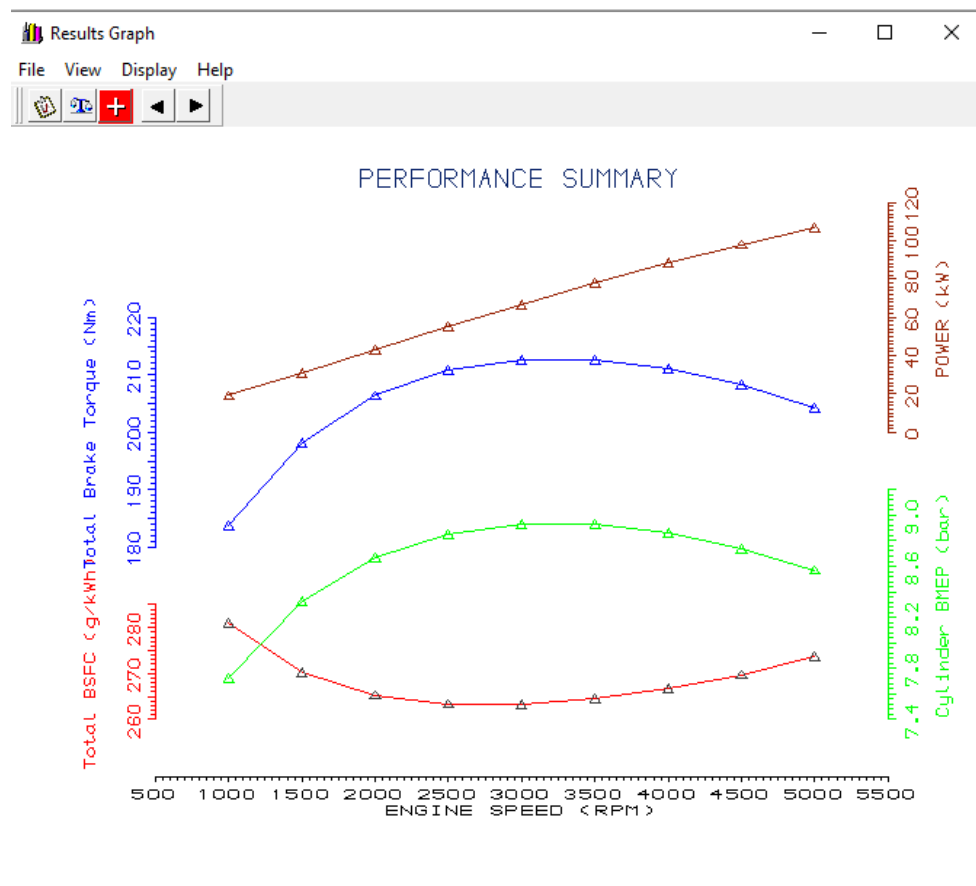
Slika 5.30 Karakteristika kompresora za visokotlačno turbopuhalo



Slika 5.31 Karakteristika turbine za visokotlačno turbopuhalo

## 6. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Rezultati simulacija prikazani su dijagramima. Prikazani su rezultati za model motora sa slobodnim usisom, te za modele motora s jednim, te s dva turbopuhala. Na svakom dijagramu prikazana je snaga motora, okretni moment, specifična potrošnja goriva i srednji efektivni tlak u ovisnosti o brzini vrtnje motora.

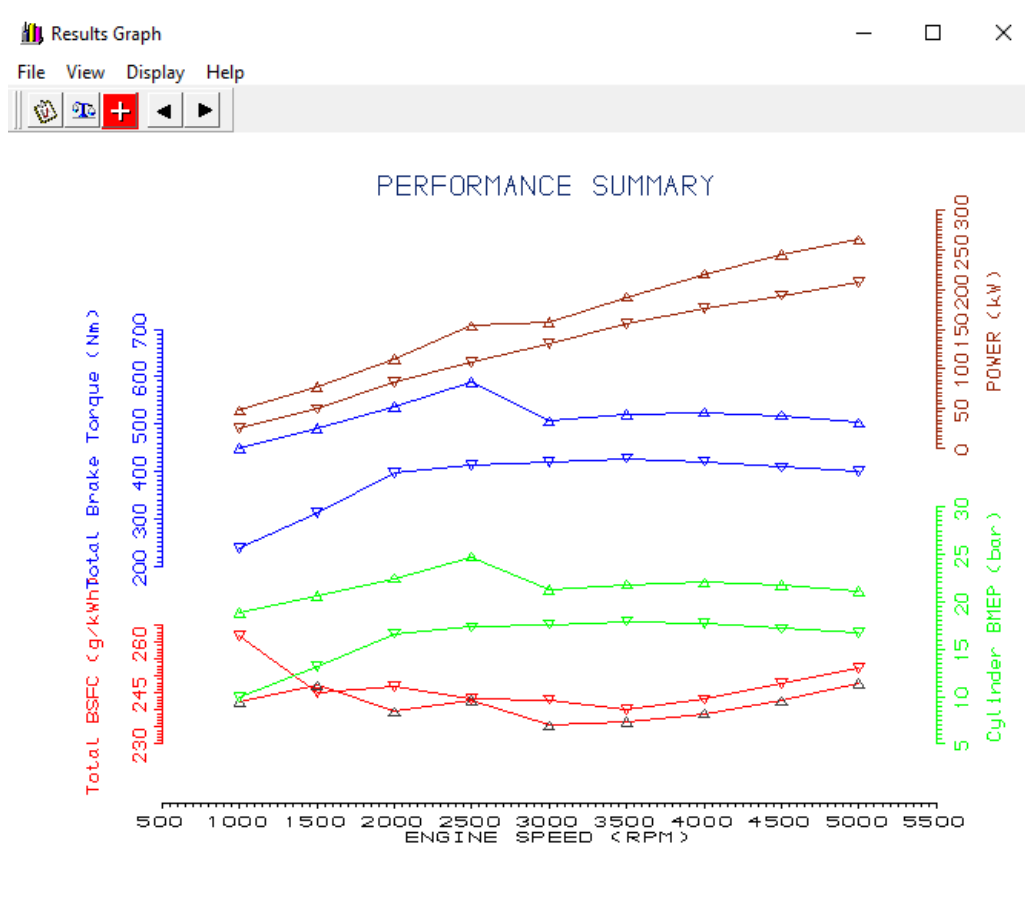


Slika 6.1 Prikaz rezultata modela motora sa slobodnim usisom

U varijanti motora sa slobodnim usisom najveći okretni moment ostvaruje se pri 2500 o/min kao i srednji efektivni tlak. Snaga iznosi 120 kW za ovaj model motora. Najmanja potrošnja goriva ostvaruje se oko 3000 o/min, te raste nakon 4000 o/min.

Rezultati u varijanti prednabijanja motora prikazani su na istom dijagramu radi lakše usporedbe i analize rezultata. Varijanta sa jednim turbopuhalom prikazana je oznakom obrnutog trokuta na dijagramu. Kod ovog modela motora snaga konstantno raste, te se najveći moment ostvaruje pri brzini vrtnje od 2000 o/min tj. pri nižim brzinama vrtnje. Krivulja srednjeg efektivnog tlaka blago pada s porastom brzine vrtnje.

Kod modela motora sa dva turbopuhala vidljivo je da snaga motora još više raste upravo zbog utjecaja drugog puhala. Najveći moment se ostvaruje pri brzini od 2500 o/min te iznosi oko 500 Nm. Iz danih rezultata može se zaključiti da se sekvencijalnim prednabijanjem ostvaruje veća snaga motora i veći okretni moment u cijelom rasponu brzina vrtnje motora.



Slika 6.2 Usporedba rezultata prednabijanja s jednim i sa dva turbopuhala



Zadatak ovog diplomskog rada je analiza sekvencijalnog prednabijanja 6-cilindričnog motora u varijanti sa slobodnim usisom, s jednim turbopuhalom i s dva turbopuhala. Svrha provođenja simulacija je analiza karakteristika zadanog motora u ovisnosti o promjenama parametara sustava prednabijanja pri različitim brzinama vrtnje. Snaga motora se može povećati ugradnjom turbopuhala pomoću kojeg se u cilindre dobavlja veća količina zraka potrebna za izgaranje goriva, te se na taj način omogućava izgaranje veće količine goriva. S jednim turbopuhalom nije bilo moguće ostvariti ciljanu izlaznu snagu motora, te se uvodi sekvencijalno prednabijanje. Drugo turbopuhalo je veće od prvoga, te preuzima prednabijanje motora pri višim brzinama vrtnje motora.

Kod modela motora sa slobodnim usisom vidljivo je da je specifična potrošnja goriva najveća, dok su u varijanti motora s prednabijanjem krivulje potrošnje goriva međusobno slične, ali i niže u usporedbi s motorom sa slobodnim usisom. Iako su linije slične, za sekvencijalno prednabijanje potrebna je veća specifična potrošnja goriva.

## POPIS LITERATURE

- [1] Mrakovčić, T.: podloge s predavanja „Motori“, Tehnički fakultet Rijeka, 2020.
- [2] Medica, V.: podloga za studente „Motori“ , Tehnički fakultet Rijeka, 2018.
- [3] Mahalec, I.; Lulić, Z.; Kozarac, D.: „Konstrukcije motora“, skripta, FSB Zagreb, 2015.
- [4] Princip rada dizel motora, s Interneta, <https://ciak-auto.hr/novosti/princip-rada-dizel-motora/>
- [5] Waste-gate ventil kod turbopunjača, s Interneta, <https://tabudic.wordpress.com/2009/06/10/waste-gate-ventil-kod-turbopunjaca/>
- [6] Princip rada turbopuhala, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Turbopuhalo>
- [7] Balikić V.: „Povećanje snage dizelskog motora primjenom turbopuhala“, Tehnički fakultet Rijeka, 2017.
- [8] Turbo Tech 101, Basic: Understanding the Parts of the Turbocharger, s Interneta, <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/oem/basic/>
- [9] Turbo Tech 103, Expert: Compressor Mapping, s Interneta, <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/oem/expert/>

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Prikaz taktova 4T motora [1] .....	2
Slika 2.2 Izvedbe motora [1] .....	3
Slika 2.3 Sustav ubrizgavanja goriva [1] .....	4
Slika 2.4 Common-rail sustav ubrizgavanja goriva [3].....	5
Slika 2.5 Rasprskач goriva u common-rail sustavu ubrizgavanja goriva [3].....	6
Slika 2.6 Prikaz hladnjaka zrak-zrak .....	7
Slika 2.7 Shema sustava hlađenja voda-zrak [7].....	7
Slika 3.1 Prikaz motora N57 D30 .....	9
Slika 3.2 Dijelovi klipnog motora [3] .....	10
Slika 4.1 Odabir goriva za motor .....	11
Slika 4.2 Model motora sa slobodnim usisom .....	12
Slika 4.3 Redoslijed paljenja cilindra .....	14
Slika 4.4 Karakteristike cilindra.....	14
Slika 4.5 Prikaz otvaranja i zatvaranja ventila .....	15
Slika 4.6 Definiranje testa .....	15
Slika 4.7 Podešavanje opcije Fueling.....	16
Slika 4.8 Podešavanje modela trenja.....	16
Slika 4.9 Pokretanje simulacije .....	17
Slika 4.10 Usporedba rezultata s realnim modelom motora .....	18
Slika 5.1 Klipni motor s prednabijanjem turbopuhalom i hlađenjem zraka [3].....	19
Slika 5.2 Model motora u varijanti prednabijanja s jednim turbopuhalom.....	20
Slika 5.3 Optočni ventil.....	21
Slika 5.4 Definiranje mjerodavne veličine unutar aktuatora .....	22
Slika 5.5 Definiranje funkcije unutar aktuatora u varijanti sa jednim turbopuhalom .....	22
Slika 5.6 Funkcija unutar aktuatora.....	23
Slika 5.7 Prikaz polja karakteristike kompresora.....	24
Slika 5.8 Podešavanje scale faktora za karakteristiku kompresora .....	25
Slika 5.9 Karakteristika kompresora modela motora s jednim turbopuhalom.....	26
Slika 5.10 Podešavanje scale faktora za karakteristiku turbine.....	26
Slika 5.11 Karakteristika turbine za model motora s jednim turbopuhalom.....	27
Slika 5.12 Model motora u varijanti sekvencijalnog prednabijanja.....	28
Slika 5.13 Funkcija aktuatora 1 u varijanti s dva turbopuhala .....	29

Slika 5.14 Definiranje funkcije unutar akuatora 4 .....	29
Slika 5.15 Funkcija ulazne varijable 2 unutar akuatora 3 .....	30
Slika 5.16 Funkcija ulazne varijable 1 unutar akuatora 3 .....	31
Slika 5.17 Funkcija ulazne varijable 1 unutar akuatora 4 .....	31
Slika 5.18 Podešavanje faktora za karakteristiku kompresora .....	32
Slika 5.19 Podešavanje faktora za karakteristiku turbine.....	32
Slika 5.20 Usporedba snaga motora .....	33
Slika 5.21 Usporedba okretnih momenata motora .....	34
Slika 5.22 Usporedba srednjih efektivnih tlakova.....	34
Slika 5.23 Usporedba specifične potrošnje goriva .....	35
Slika 5.24 Usporedba snaga za različite protočne površine ventila .....	35
Slika 5.25 Usporedba momenata za različite protočne površine na ventilu.....	36
Slika 5.26 Usporedba srednjih efektivnih tlakova za različite protočne površine .....	36
Slika 5.27 Usporedba specifične potrošnje goriva za različite protočne površine.....	37
Slika 5.28 Karakteristika kompresora za niskotlačno turbopuhalo .....	37
Slika 5.29 Karakteristika turbine za niskotlačno turbopuhalo .....	38
Slika 5.30 Karakteristika kompresora za visokotlačno turbopuhalo .....	39
Slika 5.31 Karakteristika turbine za visokotlačno turbopuhalo .....	39
Slika 6.1 Prikaz rezultata modela motora sa slobodnim usisom .....	40
Slika 6.2 Usporedba rezultata prednabijanja s jednim i sa dva turbopuhala .....	41

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Tehničke karakteristike motora .....	8
Tablica 4.1 Model motora sa slobodnim usisom.....	12
Tablica 4.2 Odabrani kutevi paljenja .....	13
Tablica 5.1 Model motora s jednim turbopuhalom .....	21

## SAŽETAK

Prednabijanje je proces koji podrazumijeva kompresiju ukupnog ili dijela svježeg zraka prije usisa u cilindar čime se povećava tlak zraka na ulazu u cilindar. Svrha procesa je povećanje snage motora. U sklopu diplomskog rada bilo je potrebno provesti simulacije za tri varijante zadanog motora u računalnom programu Lotus Engine Simulation. Motor je sličan motoru BMW N57D30. Izrađeni su modeli motora te su prilagođene karakteristike puhala i turbine kako bi one odgovarale turbopuhalu koje je dostupno na tržištu te kako bi se postigle ciljane karakteristike motora. U četvrtom poglavlju opisana je varijanta motora sa slobodnim usisom, a kroz peto poglavlje su opisane simulacije s jednim i s dva turbopuhala. Ugradnjom turbopuhala, snaga i performanse motora se mogu uvelike povećati što je bio i zadatak ovog diplomskog rada. U šestom poglavlju su prikazani rezultati dobiveni provođenjem simulacija zadanog motora te je najveća dobivena snaga ostvarena pomoću dva turbopuhala.

Ključne riječi: motor s unutarnjim izgaranjem, turbopuhalo, sekvencijalno prednabijanje

## **SUMMARY**

Turbocharging is a process that involves the compression of all or part of the fresh air before it is delivered to the cylinder, which increases the air pressure at the cylinder inlet. The purpose of the process is to increase engine power. As part of the thesis, it was necessary to carry out simulations for three variants of the given engine in the Lotus program. The engine is similar to the BMW N57D30 engine. Engine models were made and the characteristics of the compressor and turbine were adjusted to match the turbocharger available on the market and to achieve the target characteristics of the engine. The variant of the engine with atmospheric intake is described in the fourth chapter, while simulations with one and two turbochargers are described in the fifth chapter. By installing a turbocharger, the power and performance of the engine can be greatly increased, which was the task of this thesis. In the sixth chapter, the results obtained by conducting simulations of the given engine are presented, and the highest obtained power was achieved using two turbochargers.

Key words: internal combustion engine, turbocharger, sequential turbocharging