

# Utjecaj ubrizgavanja metanola na značajke rada Ottovog motora

---

**Krajc, Lorena**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:482265>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lorena Krajc**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Lorena Krajc

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Momiru Sjeriću na danim znanjima, savjetima i strpljenju prilikom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se asistentu Josipu Krajnoviću, mag.ing.mech., koji mi je također uvelike pomogao u izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se i svim ostalim profesorima i asistentima sa fakulteta od kojih sam tijekom dosadašnjeg studiranja stekla znanje.

Još bih se zahvalila obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja, a posebno svojim roditeljima koji su mi uvijek bili oslonac i vjerovali u mene, kako u studiranju tako i kroz cijeli život.

Lorena Krajc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarSKI

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lorena Krajc** JMBAG: **0035221969**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj ubrizgavanja metanola na značajke rada Ottovog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of methanol injection on spark ignition engine performance**

Opis zadatka:

Zbog sve izraženijih posljedica globalnog onečišćenja i zatopljenja, nameće se potreba za primjenom tehnoloških rješenja koja će u što većoj mjeri smanjiti negativni utjecaj transportnog sektora na okoliš. Proizvodnja i primjena sintetskih goriva pokazuje se kao smjer kojim se može doprinjeti dekarbonizaciji transporta. Sintetski metanol je alternativno gorivo u kapljevitom agregatnom stanju pri standardnim uvjetima okoline te ima najveći potencijal za pogon brodova, gospodarskih vozila, lokomotiva, zrakoplova i osobnih vozila. Zbog specifične topline isparivanja koja je 3,5 puta veća od specifične topline isparivanja benzina i istraživačkog oktanskog broja od 110, metanol omogućuje primjenu većih kompresijskih omjera i postizanje veće učinkovitosti. U radu je potrebno primjenom simulacijskog programa AVL Boost™ analizirati promjene značajki rada konvencionalnog Ottovog motora kod promjene goriva iz benzina u metanol.

U radu je potrebno:

- Odabrati konvencionalni Ottov motor pogonjen benzinom i izraditi simulacijski model motora.
- Provesti kalibraciju simulacijskog modela tako da daje značajke rada onima koje su dostupne za taj motor od strane proizvođača.
- Izračunati promjene značajki rada motora kod primjene metanola.
- Usporediti rezultate u obliku (topografskih) dijagrama za slučaj pogona motora benzinom i metanolom.
- Izvesti zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

*M. Sjerić*  
Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

*V. Soldo*  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM.....	2
2.1. Četverotaktni Ottov motor .....	2
2.2. Motor s unutarnjom pripremom gorive smjese .....	3
2.2.1. Faktor pretička zraka $\lambda$ .....	3
2.2.2. Homogena goriva smjesa unutarnje pripreme .....	3
2.2.3. Heterogena goriva smjesa unutarnje pripreme.....	4
2.3. Upaljivanje i izgaranje .....	5
2.4. Nabijanje .....	7
2.4.1. Pogon kompresora turbinom na ispušne plinove .....	8
3. METANOL.....	11
4. SIMULACIJA OTTOVOG MOTORA PRI POGONU NA BENZIN .....	13
4.1. Ottov motor .....	13
4.2. Simulacijski prikaz odabranog Ottovog motora .....	15
4.3. Kalibracija simulacijskog modela .....	17
4.4. Djelomična opterećenja kalibriranog modela .....	19
5. SIMULACIJA OTTOVOG MOTORA PRI POGONU NA METANOL.....	21
5.1. Simulacija motora pri pogonu metanolom i bez promjene radnih parametara .....	21
5.2. Simulacija motora pri pogonu metanolom i uz promjenu radnih parametara.....	22
5.3. Djelomična opterećenja modela s promjenom parametara .....	24
6. PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA SIMULACIJA .....	25
6.1. Specifična efektivna potrošnja goriva.....	25
6.2. Vršna temperatura i tlak u cilindru .....	27
6.3. Efektivni stupanj djelovanja.....	28
6.4. Temperatura i tlak na početku kompresije .....	30
6.5. Stupanj punjenja.....	32
7. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Četiri takta u Ottovom motoru: usis, kompresija, ekspanzija, ispuh [2].....	3
Slika 2.	Faktor zraka $\lambda$ u radnom području Ottovog motora s homogenom smjesom [2]....	4
Slika 3.	Faktor zraka $\lambda$ u radnom području Ottovog motora s heterogenom smjesom [2]...	5
Slika 4.	Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora [2].....	6
Slika 5.	Detonacija u cilindru Ottovog motora [2] .....	6
Slika 6.	Shema sustava za dovod zraka i nabijanja turbopunjačem [3].....	9
Slika 7.	Prikaz sustava za cirkulaciju zraka za motor s turbopunjačem [3] .....	10
Slika 8.	EA888 TFSI 1.8 gen1 [5] .....	14
Slika 9.	Audi A4 (B8 8K) [4] .....	14
Slika 10.	Krivulje momenta i snage [6].....	15
Slika 11.	Simulacijski model motora.....	16
Slika 12.	Krivulje podizaja ventila [8].....	17
Slika 13.	Dijagram usporedbe kalibrirane i tvornički zadane krivulje momenta .....	18
Slika 14.	Dijagram promjene oktanskog broja .....	19
Slika 15.	Srednji efektivni tlak motora za puno opterećenje .....	19
Slika 16.	Srednji efektivni tlak motora za djelomična opterećenja .....	20
Slika 17.	Usporedni dijagram oktanskog broja benzinskog motora i motora s pogonom na metanol bez promjene radnih parametara .....	21
Slika 18.	Usporedni dijagram momenta benzinskog motora i motora s pogonom na metanol bez promjene radnih parametara .....	22
Slika 19.	Usporedni dijagram momenta benzinskog motora i motora s pogonom na metanol sa i bez promjene parametara .....	23
Slika 20.	Usporedni dijagram oktanskog broja benzinskog motora i motora s pogonom na metanol sa i bez promjene parametara .....	23
Slika 21.	Srednji efektivni tlak motora za djelomična opterećenja modela s promjenom parametara za pogon metanolom.....	24
Slika 22.	Specifična efektivna potrošnja goriva za benzin .....	25
Slika 23.	Specifična efektivna potrošnja goriva za metanol.....	26
Slika 24.	Vršni tlak u cilindru za benzin .....	27
Slika 25.	Vršni tlak u cilindru za metanol .....	27
Slika 26.	Vršna temperatura u cilindru za benzin.....	28
Slika 27.	Vršna temperatura u cilindru za metanol .....	28
Slika 28.	Efektivni stupanj djelovanja za benzin.....	29
Slika 29.	Efektivni stupanj djelovanja za metanol .....	29
Slika 30.	Temperatura na početku kompresije za benzin .....	30
Slika 31.	Temperatura na početku kompresije za metanol.....	30
Slika 32.	Tlak na početku kompresije za benzin .....	31
Slika 33.	Tlak na početku kompresije za metanol .....	31
Slika 34.	Stupanj punjenja za metanol.....	32
Slika 35.	Stupanj punjenja za metanol.....	32

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Svojstva metanola i benzina [1] .....	12
Tablica 2. Specifikacije motora EA888 TFSI 1.8 gen1 [3,4].....	13
Tablica 3. Parametri za standardni sustav izgaranja benzinskog motora s 4 ventila [7].....	17
Tablica 4. Parametri izgaranja za simulacijski model motora s pogonom na metanol s promjenom parametara.....	24
Tablica 5. Usporedba vršnih temperatura i tlakova u cilindru .....	28
Tablica 6. Usporedba temperatura i tlakova na kraju kompresije.....	31



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\dot{m}_{G,h}$	kg/h	satna masena potrošnja goriva
$m_{z,izg}$	kg/proces	masa svježeg zraka u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila
$m_{ref}$	kg/proces	referentna masa zraka koja bi stala u radni volumen za stanje standardne okolne atmosfere
$\eta_e$	-	efektivni stupanj djelovanja
$\lambda_{pu}$	-	stupanj punjenja
$a$	-	parametar potpunosti izgaranja
$D$	mm	promjer cilindra
$d_{v,i}$	mm	promjer ispušnog ventila
$d_{v,u}$	mm	promjer usisnog ventila
$g_e$	g/kWh	specifična efektivna potrošnja goriva
$H$	mm	hod klipa
$H_d$	MJ/kg	donja ogrjevna vrijednost goriva
$l$	mm	duljina klipnjače
$m$	-	Vibeova značajka izgaranja
$M_e$	Nm	efektivni moment
$n$	min <sup>-1</sup>	brzina vrtnje motora
$n_v$	-	broj ventila po cilindru
$P_e$	kW	efektivna snaga
$V_H$	m <sup>3</sup>	radni volumen cilindra
$Z$	kg <sub>z</sub> / kg <sub>G</sub>	stvarna količina zraka za izgaranje 1 kg goriva
$z$	-	broj cilindara
$Z_0$	kg <sub>z</sub> / kg <sub>G</sub>	stehiometrijska količina zraka za izgaranje
$\alpha$	°	kut zakreta koljenastog vratila
$\varepsilon$	-	kompresijski omjer
$\lambda$	-	faktor pretička zraka

---

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
CH <sub>3</sub> OH	Metanol
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
DMT	Donja mrtva točka
GMT	Gornja mrtva točka
H <sub>2</sub> O	Voda
IK	Izgaranje kraj
IO	Ispuh otvara
IP	Izgaranje početak
IZ	Ispuh zatvara
KV	Koljenasto vratilo
TFSI	Turbonabijanje i ubrizgavanje sa slojevitim punjenjem cilindra (engl. <i>Turbo Fuel Stratified Injection</i> )

---

**SAŽETAK**

U svrhu smanjenja štetne emisije u ispuhu motora s unutarnjim izgaranjem, nameće se potreba za odabirom alternativnog goriva. Između ostalih zamjenskih goriva za goriva na bazi nafte, metanol se smatra jednim od najpovoljnijih za motore s unutarnjim izgaranjem. U ovom završnom radu analizirane su promjene značajki rada konvencionalnog Ottovog motora za slučaj kada bi se benzinsko gorivo promijenilo na metanol.

Prednost metanola naspram benzina je viši oktanski broj i veća specifična toplina isparavanja što ga čini prikladnim za primjenu kod motora s visokim kompresijskim omjerom i velikom izlaznom snagom.

Korištenjem programskog paketa AVL Boost<sup>TM</sup> napravljena je simulacija pojednostavljenog Ottovog motora podešena da daje vrijednosti momenta deklarirane od proizvođača. Promjenom na metanol napravljene su dvije simulacijske konfiguracije. Prva konfiguracija napravljena je zamjenom benzina na metanol bez promjene radnih parametara, dok su u drugoj konfiguraciji radni parametri motora promijenjeni kako bi se postigla najveća učinkovitost. Značajke rada dobivene promjenom na metanol prikazane su dijagramima. Na temelju provedenih simulacijskih kalibracija napravljeni su usporedni topografski dijagrami za značajke rada benzinskog motora i motora s promjenom goriva na metanol za kojega su postignute najbolje moguće performanse motora.

Ključne riječi: AVL Boost<sup>TM</sup>, Ottov motor, metanol, značajke rada

---

**SUMMARY**

In order to reduce harmful emissions in the exhaust of internal combustion engines, there is a need to choose an alternative fuel. Among other substitute fuels for fuels based on petroleum, methanol is considered one of the most favorable for internal combustion engines. This bachelor thesis analyzes the changes in the operation characteristics of the conventional Otto engine for the case when gasoline fuel would be changed to methanol.

The advantage of methanol over gasoline is a higher octane number and higher specific heat of vaporization, as compared to gasoline, which makes it suitable for applications in engines with a high compression ratio and large output power.

By using the AVL Boost<sup>TM</sup> program package, a simulation of a simplified Otto engine was made, adjusted to give the torque values declared by the manufacturer. While converting fuel to methanol, two simulation configurations were made. The first configuration was made by replacing gasoline with methanol without changing the operating parameters, while in the second configuration, the operating parameters of the engine have been changed to achieve the highest efficiency. The performance characteristics obtained by switching to methanol are shown in diagrams. Based on the completed simulation calibrations, comparative topographic diagrams were made for the performance characteristics of the gasoline engine and the engine with a change of fuel to methanol, for which the best possible engine performance was achieved.

Ključne riječi: AVL Boost<sup>TM</sup>, Otto engine, methanol, performance characteristics

## 1. UVOD

Budući da je globalno zatopljenje dominantan ekološki problem, čini se da je korištenje alternativnih goriva u budućnosti neizbježno. Metanol sadrži potencijal da postane jedno od najboljih goriva za motore s unutarnjim izgaranjem. Prednost metanola u ekološkom smislu nalazi se u CO<sub>2</sub> neutralnosti korištenja. Ako se metanol dobiva procesom obrnutim od izgaranja, odnosno spajanjem CO<sub>2</sub> iz zraka s vodikom, tada je ponovnim izgaranjem metanola zatvoren ciklus. To znači da se, za razliku od goriva na bazi nafte, primjenom metanola ugljikov dioksid ne zadržava u atmosferi te time ne djeluje negativno na globalno zatopljenje. Potrebno je naglasiti kako ovo vrijedi samo za e-metanol odnosno sintetski metanol. Za proizvodnju takvog metanola potrebna je čista energija iz sunca ili vjetra koja se koristi za ekstrakciju CO<sub>2</sub> iz zraka, a vodik se dobiva elektrolizom iz vode pomoću električne energije kojom razdvajamo molekulu H<sub>2</sub>O na vodik i kisik. Za vodik dobiven iz prirodnog plina nebi vrijedilo napisano. Pored ekološkog značaja, velika prednost metanola naspram benzina je viši oktanski broj i veća specifična toplina isparavanja. Viši oktanski broj omogućuje značajno povećanje kompresijskih omjera, a veća specifična toplina isparavanja može ohladiti ulazno punjenje goriva i zraka čime se povećava volumetrijska učinkovitost i izlazna snaga. Osim toga, temperature samozapaljenja alkohola su više nego kod benzina što ih čini sigurnijima za transport i skladištenje. [1] Iz perspektive inženjerske primjene, metanol je obnovljiva, ekološka i ekonomski atraktivna zamjena za naftno gorivo. Zbog toga je ovo gorivo odabrano za analizu u ovom radu. Cilj je primjenom simulacijskog programa AVL Boost<sup>TM</sup> provesti simulaciju za odabrani Ottov motor s benzinskim gorivom, a zatim zamjenom na metanol ustanoviti promjene značajki rada te ukoliko se pokaže mogućnost promijeniti određene parametre kako bi se postigla najveća moguća učinkovitost. Kada se dobiju rezultati koji će pokazati najveću učinkovitost motora dobivenu iz razlika u svojstvima za promjenu goriva u metanol, provesti će se analize i usporedbe kako bi se moglo zaključiti koliki potencijal predstavlja metanol za primjenu u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

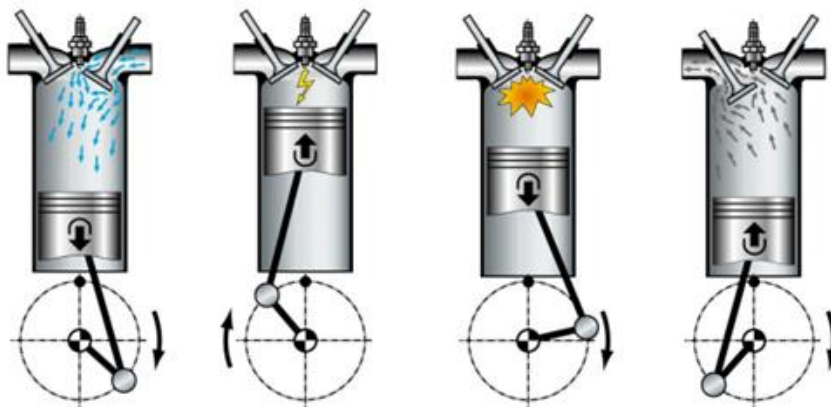
## 2. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s unutarnjim izgaranjem su motori kod kojih gorivo izgara u radnom prostoru koji služi za pretvaranje kemijske energije goriva u toplinsku energiju, a potom iz toplinske energije u mehanički rad. Taj mehanički rad dalje služi za pogon različitih prijevoznih sredstava u cestovnom, zračnom, brodskom i željezničkom prometu. Glavne karakteristike prema kojima razlikujemo motore s unutarnjim izgaranjem su način zapaljenja gorive smjese, mjesto pripreme gorive smjese, vrsta procesa u cilindru i broj taktova. U nastavku će biti opisana važna obilježja Ottovog četverotaktnog motora s unutarnjom pripremom gorive smjese nabijanog pomoću turbopunjača, iz razloga što će takav motor biti izabran za izradu simulacije.

### 2.1. Četverotaktni Ottov motor

Svi klipni motori s unutarnjim izgaranjem imaju radni proces koji se sastoji od četiri dijela: usis, kompresija, ekspanzija i ispuh. Ukupno trajanje procesa izražava se pomoću zakreta glavnog vratila motora odnosno koljenastog vratila ili radilice. Rotacija glavnog vratila motora, poznatog još kao koljenasto vratilo ili radilica, služi kao pokazatelj ukupne duljine procesa. Kod četverotaktnih motora jedan radni proces izvrši se u 4 takta pri čemu se koljenasto vratilo okrene dva puta. U taktu usisa, u cilindar ulaze svježi radni plinovi na način da se gibanjem klipa od GMT do DMT stvara podtlak. Klip se zatim počne vraćati natrag prema GMT čime dolazi do kompresije plinova kako bi im se povećalo tlak i temperaturu. Nešto prije završetka kompresije započinje izgaranje, koje izaziva takt ekspanzije na način da oslobođena toplina povećava tlak i temperaturu plinovima u cilindru čime plinovi ekspandiraju i klip se pomiče prema DMT. Zatim slijedi takt ispuha u kojem se gibanjem klipa prema GMT plinovi istiskuju iz cilindra kroz otvoreni ispušni ventil. Ovakvim procesom se kemijska energija nastala izgaranjem goriva najprije pretvara u toplinsku energiju koja uzrokuje ekspanziju radnih plinova zbog čega se posredno pomoću klipa okreće koljenasto vratilo čime dobivamo mehanički rad.

Slika 1. prikazuje taktove u četverotaktnom motoru.



Slika 1. Četiri takta u Ottovom motoru: usis, kompresija, ekspanzija, ispuh [2]

## 2.2. Motor s unutarnjom pripremom gorive smjese

### 2.2.1. Faktor pretička zraka $\lambda$

Omjer goriva i zraka prikazuje se pomoću faktora pretička zraka  $\lambda$ :

$$\lambda = Z/Z_0 \quad (1)$$

gdje je:

$Z$  – stvarna količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva [kgz/kg<sub>G</sub>];

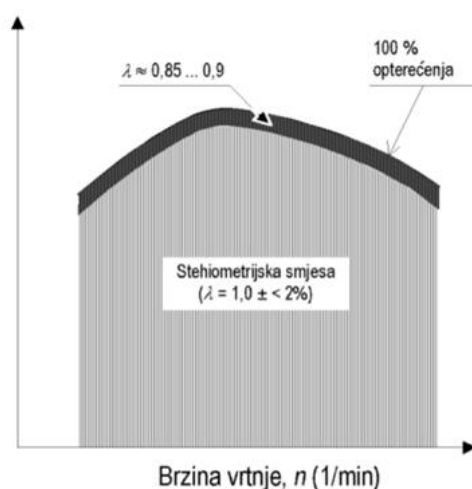
$Z_0$  – stehiometrijska količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva, tj. ona količina zraka s kojom bi 1 kg goriva u idealnim uvjetima potpuno izgorio, ali tako da u produktima izgaranja ne bi bilo slobodnog kisika [kgz/kg<sub>G</sub>].

Omjer stvarne i stehiometrijske količine zraka manji od jedan  $\lambda < 1$  definira bogatu gorivu smjesu odnosno smjesu s viškom goriva i manjkom zraka, omjer veći od jedan  $\lambda > 1$  definira siromašnu gorivu smjesu odnosno smjesu s manjkom goriva i viškom zraka, a ukoliko je omjer  $\lambda = 1$  radi se o stehiometrijskoj smjesi.

### 2.2.2. Homogena goriva smjesa unutarnje pripreme

Bogatstvo smjese ima presudan utjecaj na pogonske karakteristike motora. Homogena smjesa upaljiva je samo za vrlo uski omjer goriva i zraka. Taj omjer je dodatno ograničen brzinom izgaranja te, kod motora s trokomponentnim katalizatorom, radom katalizatora i niskim štetnim emisijama. Zbog toga je područje vrijednosti faktora zraka ograničeno na  $\lambda = 0,98 \dots 1,02$ . Za gotovo cijelo područje rada koristi se stehiometrijska smjesa ( $\lambda = 1 \pm 2\%$ ) upravo zbog ispravnog rada katalizatora i manjih štetnih emisija. Ako se želi postići veća snaga i moment, potrebno je dodati više goriva odnosno osigurati lagano gorivu smjesu  $\lambda \approx 0,9$ . Na

slici 2. je prikazan faktor  $\lambda$  u radnom području uobičajenog Ottovog motora s ubrizgavanjem benzina u usisnu cijev ili izravnim ubrizgavanjem u cilindar i homogenom smjesom.

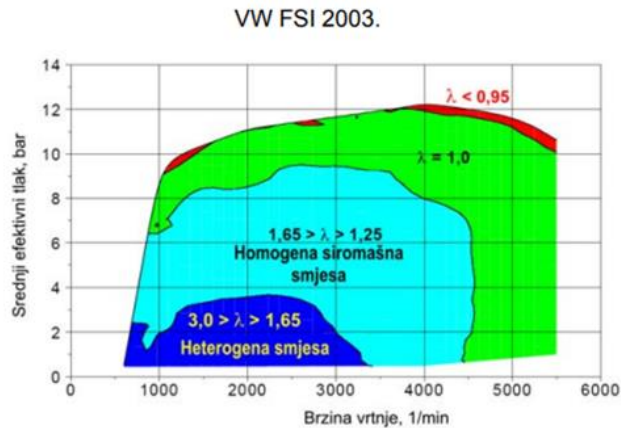


Slika 2. Faktor zraka  $\lambda$  u radnom području Ottovog motora s homogenom smjesom [2]

### 2.2.3. Heterogena goriva smjesa unutarnje pripreme

Motori s izravnim ubrizgavanjem goriva u cilindar, odnosno s unutarnjom pripremom gorive smjese nude veće potencijalne mogućnosti smanjenja potrošnje goriva te imaju bolje izgleda za budućnost od motora s vanjskom pripremom gorive smjese. Razlog za mogućnost postizanja visoke ekonomičnosti je u tome što u području niskog opterećenja i niske brzine vrtnje mogu raditi s izrazito siromašnom smjesom ( $\lambda > 2,5$ ). To je posljedica same heterogenosti smjese, nazivanom još i slojevitim punjenjem, zbog čega je moguće postići da dio smjese u neposrednoj okolini iskre bude bogat zbog čega se lako upali, dok je u udaljenijim dijelovima prostora izgaranja smjesa izrazito siromašna. Na slici 3. prikazan je faktor  $\lambda$  u radnom području Ottovog motora s ubrizgavanjem benzina izravno u cilindar s heterogenom smjesom odnosno sa slojevitim punjenjem motora.





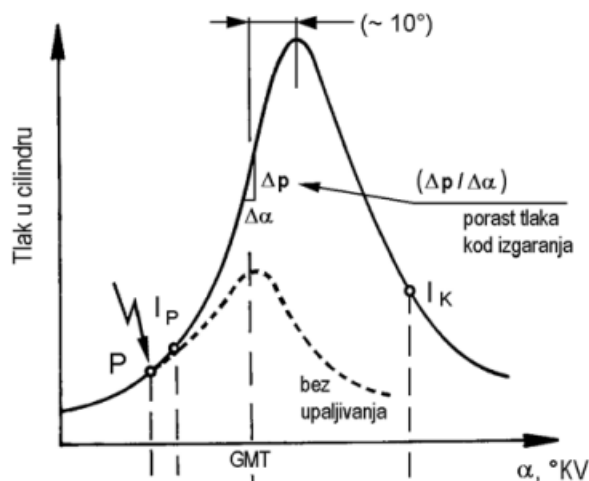
Slika 3. Faktor zraka  $\lambda$  u radnom području Ottovog motora s heterogenom smjesom [2]

### 2.3. Upaljivanje i izgaranje

U Ottovom motoru, tijekom takta kompresije, smjesa se komprimira na približno 20-30 bar te se pritom zagrije na približno 400-500°C. Kako takva temperatura nije dovoljno visoka da prijeđe granicu samozapaljenja, upaljivanje se događa tek kada preskoči iskra na elektrodama svjećice.

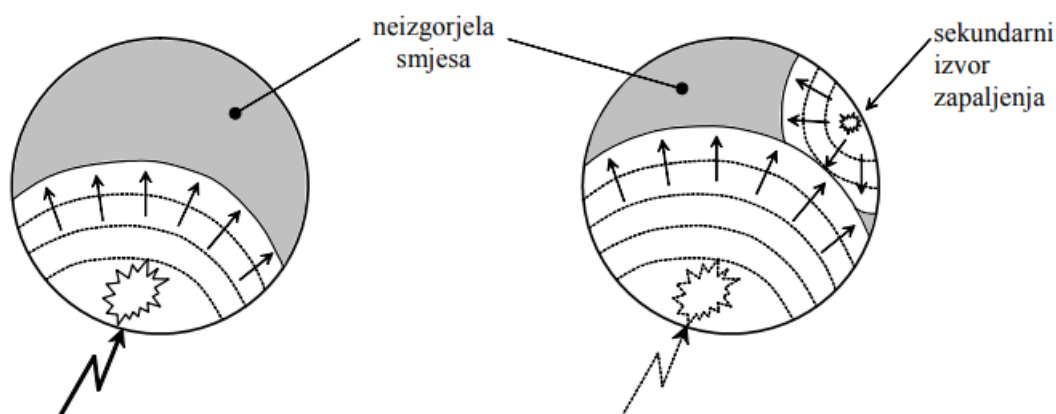
Trenutak preskakanja iskre na svjećici označava početak izgaranja. Odmah nakon pojave iskre slijedi faza zakašnjenja paljenja koja se događa jer se najprije upali smjesa u neposrednoj blizini iskre, a zatim plamen dalje putuje kroz prostor izgaranja. Kako je postupno zagrijavanje i paljenje smjese nužno za smanjenje mogućnosti pojave samozapaljenja i detonacije, poželjno je da vrijeme zakašnjenja paljenja bude što veće.

Paljenje smjese u idealnom slučaju započinje malo prije GMT odnosno između 20 i 50°KV. Na taj će način težište izgaranja biti oko 10°KV iza GMT. Za takve uvjete dobiva se veći indicirani rad. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora prikazan je na slici 4. Upaljivanje je označeno točkom P, početak izgaranja oznakom IP, a kraj izgaranja oznakom IK.



**Slika 4. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora [2]**

Detonacija je oblik nekontroliranog izgaranja koji je za Ottov motor od velikog značaja jer njegovom pojavom može doći do velikih oštećenja motora. Nakon upaljivanja smjese u cilindru se nalaze dva bitno različita medija. Ispred fronte plamena nalazi se neizgorjela smjesa koja je na niskoj temperaturi, a iza fronte plamena se nalaze produkti izgaranja koji su na visokoj temperaturi. Pri izgaranju vrući produkti izgaranja ekspandiraju uslijed čega se komprimira neizgorjela smjesa. Neizgorjeljoj smjesi stoga rastu tlak i temperatura, a ukoliko temperatura naraste toliko da premaši granicu samozapaljenja, u cilindru dolazi do sekundarnog izvora paljenja ispred fronte plamena. Brzina izgaranja posljedično naglo poraste pa dolazi do naglog porasta tlaka i visokofrekventne oscilacije tlaka. Time nastaju velike brzine strujanja u cilindru te raste prijelaz topline s vrućih plinova na okolne stjenke. Stjenke se zagrijavanjem mogu rastaliti čime dolazi do oštećenja motora. Na slici 5. nalazi se ilustrativni prikaz detonacije u cilindru Ottovog motora.



**Slika 5. Detonacija u cilindru Ottovog motora [2]**

Kako bi se izbjegla pojava detonantnog izgaranja smjese u cilindru, uz postizanje što veće učinkovitosti motora, ugrađuje se osjetnik koji detektira oscilacije tlaka, mjeri ih te šalje

signal upravljačkoj jedinici. Signal se tijekom izgaranja stalno uspoređuje s onim kod normalnog izgaranja. Ako detonatno izgaranje ipak počne, računalo pomiče točku pretpaljenja bliže prema GMT, a ako to nije dovoljno može iskopčati paljenje i obustaviti dovod goriva.

Tijekom zadavanja radnih parametara motora poželjno je da motor radi što bliže granici detonacije kako bi mogao raditi sa što višim kompresijskim omjerom, odnosno kod danog kompresijskog omjera sa što ranijom točkom paljenja. Za sprječavanje pojave detonacije gorivo treba imati što viši oktanski broj. On pokazuje granicu otpornosti goriva prema detonantnom izgaranju, a dobiva se eksperimentalnim određivanjem na ispitnom motoru.

## 2.4. Nabijanje

Nabijanje se koristi za povećanje snage motora bez povećanja radnog volumena i brzine vrtnje. Kako pri konstantnoj brzini vrtnje snaga ovisi samo o srednjem efektivnom tlaku, a srednji efektivni tlak ovisi samo o stupnju punjenja, cilj nabijanja je povećati stupanj punjenja. Stupanj punjenja definiran je kao:

$$\lambda_{pu} = \frac{m_{z,izg}}{m_{ref}} \quad (2)$$

Gdje je:

$m_{z,izg}$ - masa svježeg zraka u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila (kg po procesu)

$m_{ref}$ - referentna masa zraka koja bi stala u radni volumen  $V_H$  za stanje standardne okolne atmosfere (kg po procesu)

Iz termodinamičke jednadžbe stanja za zatvoreni usisni ventil dobiva se formula:

$$m_{z,izg} = \frac{p_{UVZ} \cdot V_{UVZ}}{R_Z \cdot T_{UVZ}} \quad (3)$$

koja pokazuje da se povećanjem tlaka na usisu može ostvariti povećanje snage bez povećanja radnoga volumena i brzine vrtnje.

### **2.4.1. Pogon kompresora turbinom na ispušne plinove**

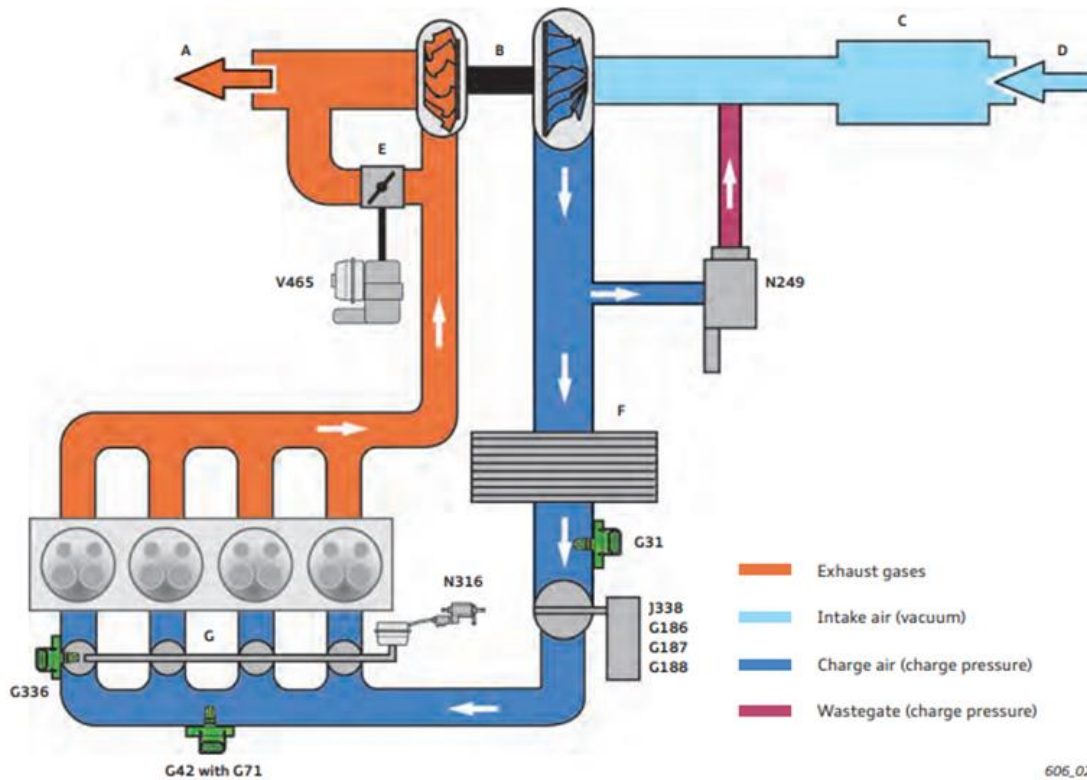
Ovaj način nabijanja naziva se još i turbonabijanje, a sustav u motoru kojim se vrši nabijanje naziva se turbopunjač.

Turbonabijanje pomaže motoru da proizvede veće snage i momente kroz prisilnu indukciju. Turbopunjač se sastoji od kompresora i turbine koji su mehanički povezani vratilom. Priključen je na ispuh iz motora i na usis zraka u motor. To omogućava turbopunjaču da se, koristeći ispušne plinove iz ispuha motora, zavrti i time prisili više zraka u motor na usisu. Turbopunjač usisava zrak, hladi ga, a zatim prisilno napaja motor s više zraka nego što bi ga motor dobio standardnim usisom. Odvođenjem komprimiranog zraka nakon kompresora kroz hladnjak, kako bi mu se snizila temperatura, povećava se punjenje cilindra uz smanjenje toplinskog opterećenja motora.

Izlazni ventil turbopunjača pronalazi, kontrolira i upravlja tlakom prednabijanja u turbopunjaču tako što dozira količinu ispušnih plinova koji ulaze u turbopunjač, a ukoliko ima viška ispušnih plinova on se zatvara i ostatak ispušnih plinova prolazi kroz zaobilaznu cijev i ostatak ispušnog sustava van iz automobila.

Ukratko, primjenom turbonabijanja stupanj punjenja se povećava na dva načina: kompresor povećava tlak, a ohlađivanjem komprimiranog zraka u hladnjaku smanjuje mu se temperatura.

Usisni sustava s turbopunjačem prikazan shematski i u 3D pogledu u samom motoru može se vidjeti na slikama 6. i 7., a prikazan je na primjeru motora koji je kasnije odabran za izradu simulacije.

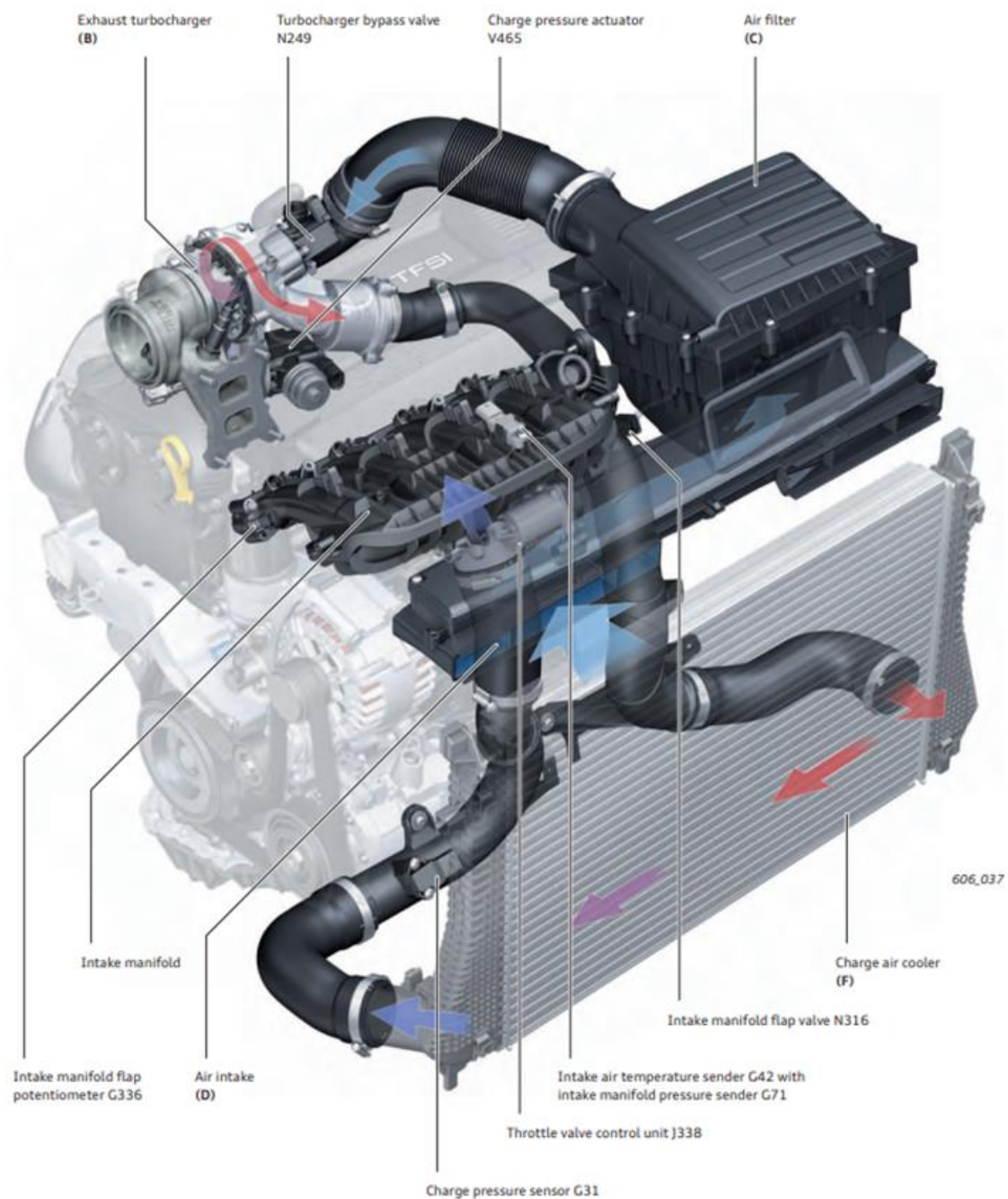


## Key:

- A Exhaust flow
- B Exhaust turbocharger
- C Air filter
- D Fresh air flow
- E Wastegate valve
- F Charge air cooler
- G Intake manifold flaps

- G31 Charge pressure sensor
- G42 Intake air temperature sensor
- G71 Intake manifold pressure sensor
- G186 Throttle valve drive (electronic power control)
- G187 Throttle valve drive angle sender 1 with electronic power control
- G188 Throttle valve drive angle sender 2 with electronic power control
- G336 Intake manifold flap potentiometer
- J338 Throttle valve control unit
- N249 Turbocharger bypass valve
- N316 Intake manifold flap valve
- V465 Charge pressure actuator

Slika 6. Shema sustava za dovoz zraka i nabijanja turbopunjačem [3]



Slika 7. Prikaz sustava za cirkulaciju zraka za motor s turbopunjačem [3]

### 3. METANOL

Metanol je najjednostavniji alkohol molekulske formule  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Pri sobnoj temperaturi je bezbojna, polarna, zapaljiva i dosta hlapljiva tekućina neugodna mirisa.

Sadržaj kisika, koji iznosi polovicu molekularne mase metanola, ima važne posljedice za svojstva metanola kao goriva za motore. Visoki sadržaj kisika dovodi do niske (temeljene na masi) stehiometrijske potrebe za zrakom. To također znači da je udio metanola u stehiometrijskoj smjesi visok.

Visok sadržaj kisika smanjuje sadržaj energije. Volumetrijski sadržaj energije važan je za konstrukciju sustava ubrizgavanja i skladištenje goriva. Veća gustoća metanola je više nego nadoknađena ogrjevnom vrijednošću manjom od polovine benzina, stoga je volumetrijski sadržaj energije upola manji od benzina pa posljedično trajanje ubrizgavanja mora biti dvostruko dulje kako bi se ista energija unijela u motor. Ova činjenica podrazumijeva i veće spremnike goriva vozila za prevaljenje jednakih udaljenosti ili ako spremnik ostane isti kao za benzinsko gorivo, spremnik će se morati puniti češće. Volumetrijski sadržaj energije metanola se, međutim, može dobiti kao puno veći jer viši oktanski broj omogućuje značajno povećanje omjera kompresije i veće isparavanje topline čime se može ohladiti ulazno punjenje goriva i zraka, povećavajući volumetrijsku učinkovitost i izlaznu snagu.

Polarnost molekule metanola uzrokuje veću gustoću unatoč manjoj molekularnoj masi i nizak tlak para. Ova niža isparljivost, u kombinaciji s višom donjom granicom zapaljivosti u zraku (tako da je potrebno postići veću koncentraciju prije nego se dobije zapaljiva smjesa), dovodi do težeg hladnog pokretanja motora. Još jedna od mana metanola je njegova korozivnost prema metalima kao što su aluminij, cink i mangan, zbog čega je prilikom korištenja stopostotnog metanola kao goriva ili za miješavinu benzinskog goriva s visokim udjelom metanola potrebno napraviti preinake u konstrukcijskoj izvedbi motora.

Visoki oktanski broj i snažan učinak hlađenja od topline isparivanja čine metanol manje sklon detonaciji motora i prepaljenju, te stoga dobro odgovara za Ottov motor kod kojeg se smjesa upaljuje stranim izvorom (električnom iskrom). Smanjene tendencije detonacije može se iskoristiti povećanjem omjera kompresije što dovodi do veće učinkovitost i veće izlazne snaga u usporedbi s radom na benzin.

Usporebe svojstava metanola i benzina opisivanih u prethodnom tekstu mogu se kvalitativno vidjeti u Tablica 1.

Tablica 1. Svojstva metanola i benzina [1]

Svojstvo goriva	Metanol	Benzin
Formula	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>5-12</sub>
Molekularna težina	32	95-120
Sadržaj kisika	50%	0
Donja ogrjevna vrijednost (MJ/kg)	19,66	44,5
Gornja ogrjevna vrijednost (MJ/kg)	22,3	46,6
Točka ledišta (°C)	-98	-57
Točka vrelišta (°C)	64,8	30-220
Plamište (°C)	11	-45
Temperatura samozapaljenja (°C)	465	228-470
Istraživački oktanski broj (IOB)	108,7	80-98
Motorni oktanski broj (MOB)	88,6	81-84
Cetanski broj	3	0-10
Granica zapaljivosti (%)	6,7-36	1,47-7,6
Specifična toplina (kJ/kg·K)	2,55	2,3
Latentna toplina (kJ/kg)	1109	310
Viskoznost (Pas)	0,6	0,29



## 4. SIMULACIJA OTTOVOG MOTORA PRI POGONU NA BENZIN

Računalna simulacija je danas neizostavna metoda u razvoju modernog motora s unutarnjim izgaranjem jer može zamijeniti dugotrajna prototipna ispitivanja. Međutim, definiranjem simulacijskog modela unose se određene pretpostavke koje mogu rezultirati odstupanjem od realnog procesa, stoga je potrebno pratiti fizikalnu točnost dobivenih rješenja te zatim, ukoliko je moguće, provesti usporedbu parametara motora s eksperimentalnim rezultatima. U ovome radu simulacija je provedena pomoću softverskog paketa AVL BOOST™ za odabrani konvencionalni Ottov motor. AVL BOOST™ je softverski paket koji omogućava modeliranje radnog ciklusa motora s unutarnjim izgaranjem, obuhvaćajući simulaciju različitih načina opterećenja, dobivanja maksimalnih performansa, izgaranja, analize ispušnih plinova, te akustike. Razvila ga je austrijska tvrtka AVL i samo je jedan u nizu njihovih proizvoda koji nalazi primjenu u autoindustriji.

### 4.1. Ottov motor

Simulacijski model napravljen je po uzoru na motor EA888 TFSI 1.8 gen1 prikazan na slici 8. automobila Audi A4 (B8 8K) prikazanog na slici 9. koji se proizvodio od 2007. do 2011. godine. Motor Volkswagen EA888 izveden je u dvije veličine 1.8 i 2.0 litara. 1.8 TSI/TFSI motor razvio je AUDI AG te ga predstavio 2007. godine. To je 1.8-litreni četverocilindrični turbobenzinski motor s izravnim ubrizgavanjem goriva. Motor se kontinuirano unaprjeđuje te je do sad proizveden u 3 generacije. U tablici 2. nalaze se specifikacije navedenog motora koje vrijede za prvu generaciju za koju je provedena simulacija.

Tablica 2. Specifikacije motora EA888 TFSI 1.8 gen1 [3,4]

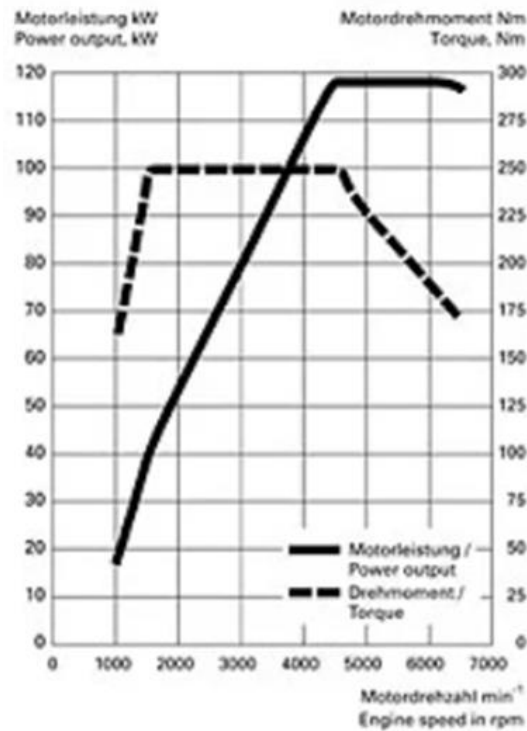
Veličina	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
Maksimalna efektivna snaga	$P_e$	118	kW
Maksimalni efektivni moment	$M_e$	250	Nm
Broj cilindara	$z$	4	-
Promjer klipa	$D$	82.5	mm
Hod klipa	$H$	84.1	mm
Duljina klipnjače	$l$	140	mm
Kompresijski omjer	$\varepsilon$	9.6	-
Broj ventila po cilindru	$n_v$	4	-
Promjer usisnog ventila	$d_{v,u}$	34	mm
Promjer ispušnog ventila	$d_{v,i}$	28	mm



**Slika 8. EA888 TFSI 1.8 gen1 [5]**



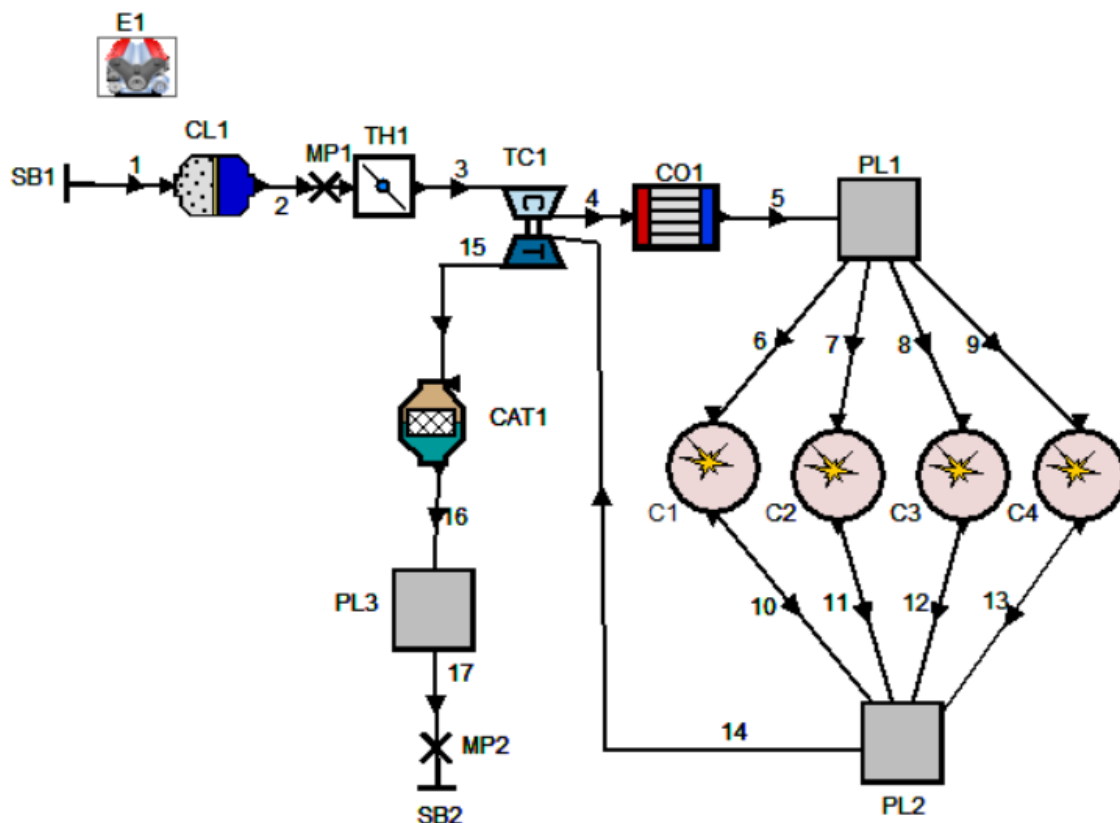
**Slika 9. Audi A4 (B8 8K) [4]**



Slika 10. Krivulje momenta i snage [6]

#### 4.2. Simulacijski prikaz odabranog Ottovog motora

Prvi korak u analizi promjena značajki motora pomoću simulacijskog paketa je izrada simulacijskog modela. Za potrebe ovog rada te zbog nemogućnosti pronalaska detaljnih podataka o motoru model je pojednostavljen te je takav simulacijski model prikazan na slici 11. Sastoji se od motora (E1), četiri cilindra (C1-4), filtera zraka (CL1), zaklopke za snagu (TH1), turbopunjača (TC1), hladnjaka (CO1), katalizatora (CAT1), tri spremnika (PL1-3), sedamnaest cijevi (1-17), dvije mjerne točke (MP1-2) i dva rubna uvjeta (SB1-2).



Slika 11. Simulacijski model motora

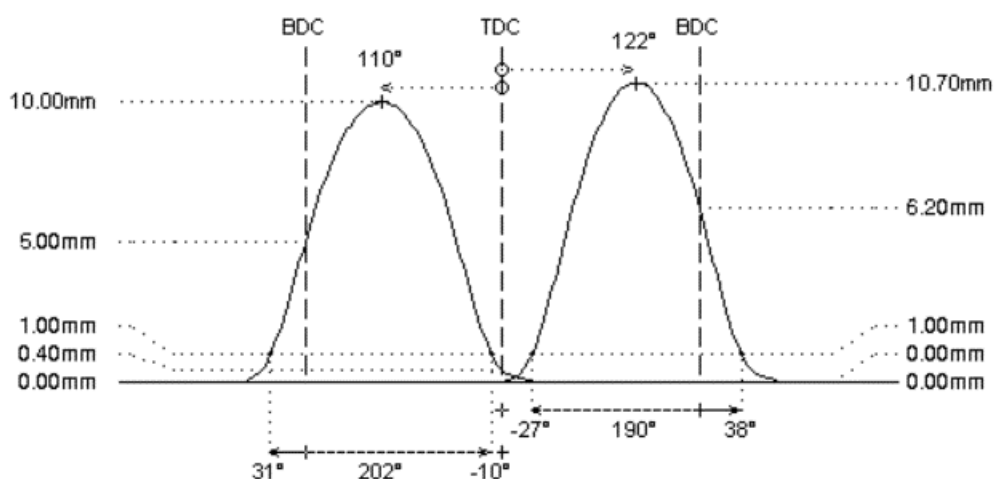
Najvažnija komponenta kod simulacije je cilindar jer se u njemu događa izgaranje. Sva četiri cilindra su simulirana jednako. Za model izgaranja u cilindru odabran je dvozonski Vibeov model koji se temelji na pretpostavci da je tijekom izgaranja radna tvar u cilindru podijeljena na izgorjelu i neizgorjelu zonu između koje je tanka fronta plamena. Za svaku zonu radne tvari postavljaju se relacije prvog glavnog stavka termodinamike, jednadžbe stanja idealnog plina i zakona očuvanja energije u svrhu računanja oslobođene topline i povećanja tlaka i temperature tijekom izgaranja. Ovaj zakon izgaranja opisuju četiri proračunska parametra; početak izgaranja  $\alpha_{početak}$ , trajanje izgaranja  $\alpha_{trajanje}$ , Vibeova značajka izgaranja  $m$  i parametar potpunosti izgaranja  $a$ . Ove vrijednosti mogu biti konstantne veličine ili se mijenjati s obzirom na vrijednost brzine vrtnje motora i/ili srednjeg efektivnog tlaka. Kako izmjereni podaci o oslobađanju topline nisu dostupni, odabiru se vrijednosti iz tablice 3. koje su zadane u priručniku za upotrebu simulacijskog paketa za benzinski motor s 4 ventila. [7]

Tablica 3. Parametri za standardni sustav izgaranja benzinskog motora s 4 ventila [7]

Veličina	Oznaka	Vrijednost	
Brzina vrtnje motora	$n$	1000 min <sup>-1</sup>	6500 min <sup>-1</sup>
Početak izgaranja	$\alpha_{po\check{c}etak}$	5°KV	-10°KV
Trajanje izgaranja	$\alpha_{trajanje}$	50°KV	55°KV
Vibeova značajka izgaranja	$m$	2.5	2.1
Parametar potpunosti izgaranja	$a$	6.9	6.9

Ubrizgavanje goriva je direktno u cilindar zbog čega u modelu nema brizgaljki već se kod simulacije cilindra zadaje isparavanje u cilindru opcijom *In Cylinder Evaporation* za što se definira potrebna tablica.

Za navedeni motor pronađene su krivulje podizaja ventila prikazane na slici 12. te su kao takve unesene za krivulje podizaja usisnog i ispušnog ventila u simulacijski model cilindra.

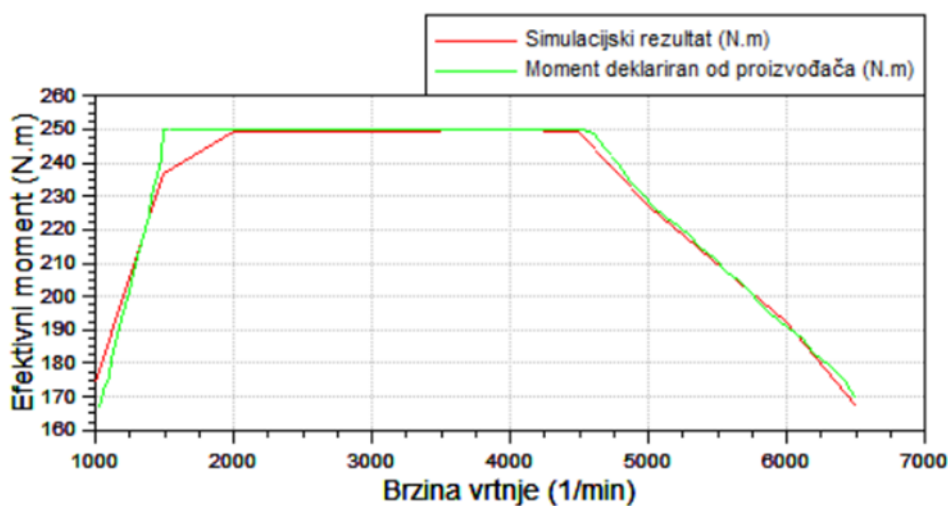


Slika 12. Krivulje podizaja ventila [8]

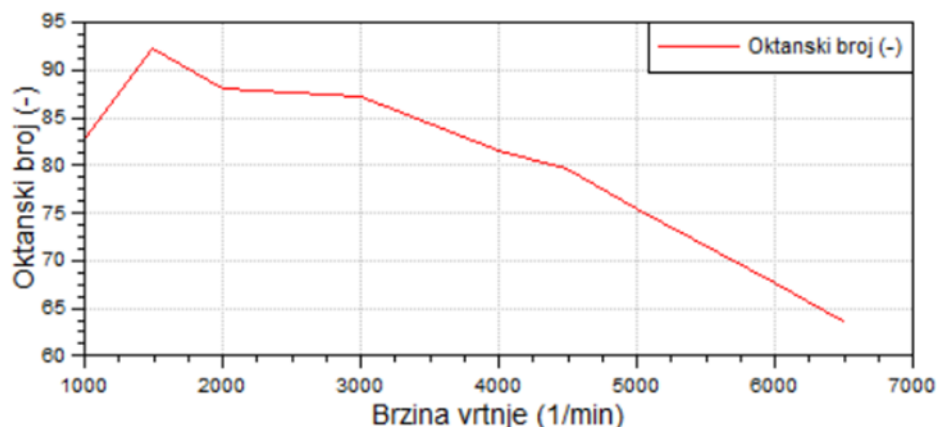
#### 4.3. Kalibracija simulacijskog modela

Kalibracija modela punog opterećenja provedena je usporedbom kalibriranih vrijednosti momenta s tvorničkim vrijednostima odnosno u usporedbi s krivuljom momenta sa slike 10. te uz provjeru oktanskog broja goriva. Na slici 10. tvornička krivulja momenta pokazuje da motor već na 1000 min<sup>-1</sup> stvara moment od 165 Nm te se zatim moment povećava do maksimalne vrijednosti od 250 Nm koja je držana konstantnom od 1500 min<sup>-1</sup> do 4500 min<sup>-1</sup>. Kalibracija je izvršena pomoću opcije *Turbine Layout Calculation* kojom se potrebna veličina turbine izračunava iz ciljanog omjera tlaka kompresora i učinkovitosti

turbopunjača promjenom množitelja veličine turbine. [7] To bi značilo da kalibriramo model pomoću zadavanja omjera tlaka kompresora turbopunjača za različite brzine vrtnje sve dok se ne dobiju željeni rezultati, dok se geometrija turbine izračunava iz vrijednosti unesenih tlakova. Taj omjer tlaka turbopunjača predstavlja omjer apsolutnog izlaznog i apsolutnog ulaznog tlaka odnosno atmosferskog tlaka. Za turbopunjač nije pronađena mapa kompresora iz koje bi se očitale ove vrijednosti, ali je poznato da je maksimalni tlak koji turbobunjač daje 1,6 bar. [5] Tijekom kalibracije je ustanovljeno da se oko te vrijednosti kreće omjer tlaka za brzine vrtnje na maksimalnim vrijednostima momenta, dok je na ostalim brzinama vrtnje taj omjer tlaka manji. Takvom kalibracijom dobiveno je gotovo savršeno poklapanje krivulja, kao što se može vidjeti sa slike 13, jedino veće odstupanje vidljivo je na  $1500 \text{ min}^{-1}$ . No, pronađeno je da motor ima usisnu granu promjenjive duljine te je pretpostavljeno da je to razlog zbog kojega bi se tlak mogao dodatno povećati na tom mjestu bez potrebe većeg tlaka u turbopunjaču. [5] Osim za tlak turbopunjača smislene vrijednosti tijekom kalibracije moralo se dobiti i za oktanski broj. Kako je oktanski broj za benzinsko gorivo 95, u dijagramu na slici 14. krivulja nije smjela preći tu vrijednost, a isto tako se nije smio dogoditi drastičan pad na većim brzinama vrtnje jer bi to značilo i drastičnu promjenu značajki goriva što ne želimo. Ovakav dijagram oktanskog broja predstavlja zadovoljavajuće vrijednosti, a kalibriran je pomoću kuta početka izgaranja  $\alpha_{\text{početak}}$  čije su dobivene vrijednosti definirane u tablici 3.



Slika 13. Dijagram usporedbe kalibrirane i tvornički zadane krivulje momenta

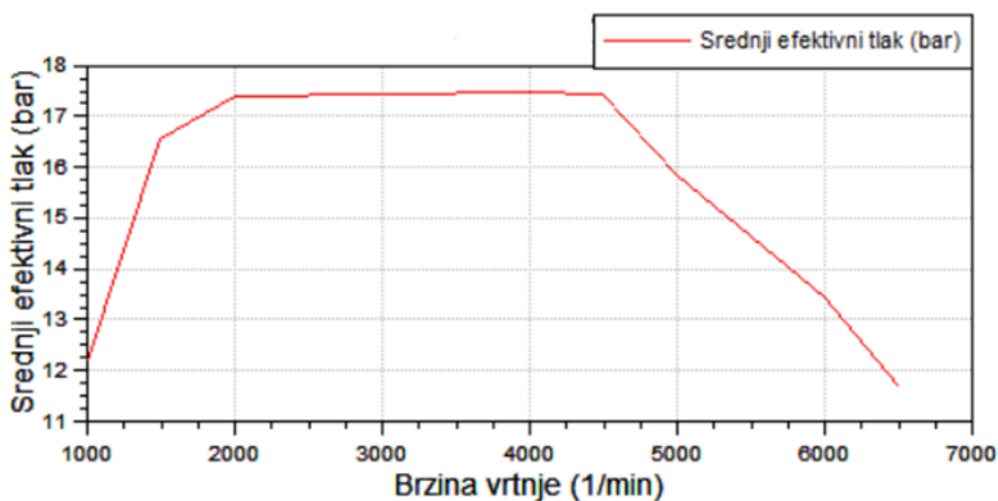


Slika 14. Dijagram promjene oktanskog broja

#### 4.4. Djelomična opterećenja kalibriranog modela

Pomoću dobivenog kalibriranog modela moguće je izračunati značajke rada motora za djelomična opterećenja. Djelomična opterećenja biti će izvedena za cijeli raspon vrtnje motora te za postotak opterećena motora od 80%, 60%, 40%, 20% i 0.5%.

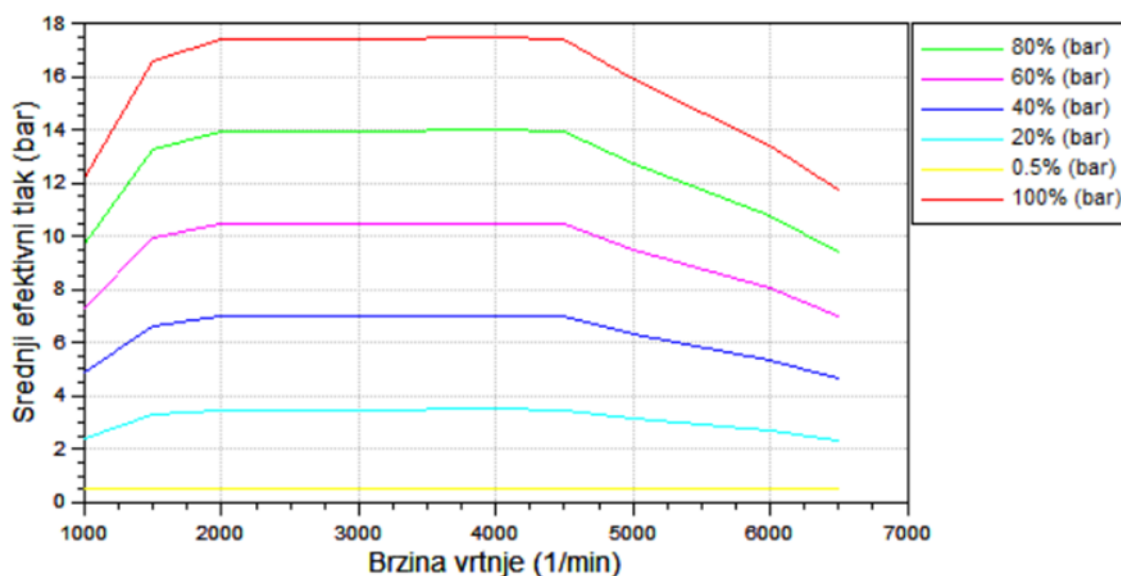
Najprije je potrebno dobiti srednji efektivni tlak za puno opterećenje prikazan slikom 15. Za 100%-tno opterećenje zaklopka je u potpunosti otvorena odnosno kut na zaklopci je  $90^\circ$ . Stvarna količina zraka za izgaranje za puno opterećenje iznosi  $Z = 13$  [ $\text{kg}_z/\text{kg}_g$ ] odnosno smjesa je blago bogata sa faktorom pretička zraka  $\lambda = 0.9$  kako i zahtjeva Ottov motor s direktnim ubrizgavanjem.



Slika 15. Srednji efektivni tlak motora za puno opterećenje

Za djelomična opterećenja zaklopka se zatvara ovisno o samom opterećenju. Količina zraka sada iznosi  $Z_0 = 14,5$  [ $\text{kg}_z/\text{kg}_g$ ] odnosno smjesa je stehiometrijska sa faktorom pretička zraka

$\lambda = 1$ . Srednji efektivni tlak za djelomična opterećenja može se dobiti pomicanjem dobivene krivulje za puno opterećenje pomoću množenja s koeficijentima udjela opterećenja. S tih dobivenih krivulja za djelomična opterećenja očitavaju se, za pojedine brzine vrtnje, iznosi srednjeg efektivnog tlaka. Potrebno je očitati i koeficijente pražnjenja turbine na različitim brzinama vrtnje za rezultatnu krivulju dobivenu za puno opterećenje. U modelu turbopunjača je potrebno uključiti opciju *Boost Pressure Calculation* koja radi tako da izračunava tlak prednabijanja iz specificirane veličine turbine i učinkovitosti turbopunjača [7]. Zatim se iteracijskim postupkom promjene kuta zaklopke pomoću opcije *Engine – BMEP Control* kalibriraju nove krivulje tlaka za djelomična opterećenja koje se moraju u potpunosti poklopiti s krivuljama dobivenim pomicanjem krivulje punog opterećenja. Ukoliko se ne poklapaju u potpunosti potrebno je povećati broj simulacijskih ciklusa. Takve krivulje pokazane su dijagramom na slici 16.



Slika 16. Srednji efektivni tlak motora za djelomična opterećenja

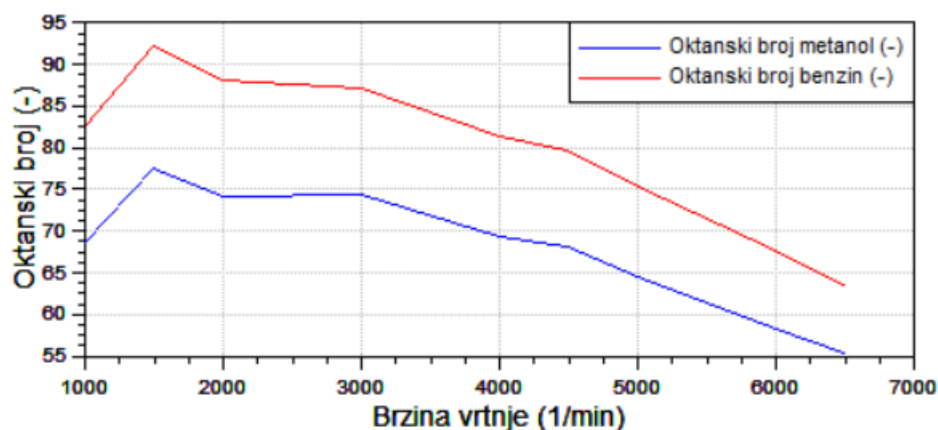


## 5. SIMULACIJA OTTOVOG MOTORA PRI POGONU NA METANOL

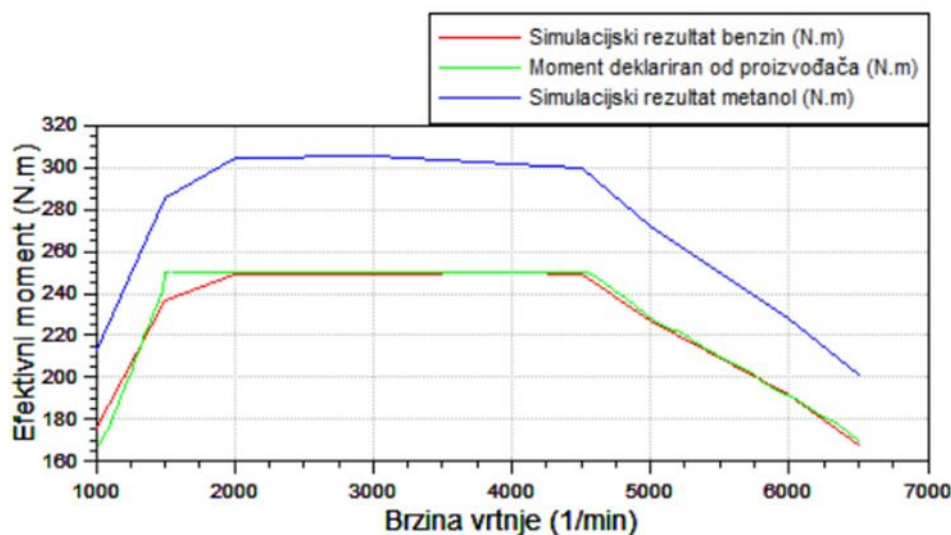
U sklopu analize rada Ottovog motora pogonjenog metanolom analizirat će se dva simulacijska modela; simulacija Ottovog motora kod kojeg je samo zamijenjeno gorivo, te simulacija Ottovog motora kod kojeg je zamijenjeno gorivo, ali s takvom izvedbom parametara koja daje maksimalne efektivne značajke.

### 5.1. Simulacija motora pri pogonu metanolom i bez promjene radnih parametara

Simulacijski model je jednak onom korištenom za benzinski motor sa slike 11. Jedina preinaka je promjena vrste goriva u *Simulation Control/Classic Species Setup* čime je automatski postavljena donja ogrijevna vrijednost goriva i stehiometrijski omjer zraka i goriva za metanol koji iznosi 6,4. Za izraganje u cilindru je zatim potrebno unijeti omjer goriva i zraka za blago bogatu smjesu koji iznosi 5,7 i za toplinu isparavanja unijeti vrijednost 1100 kJ/kg. S tim podacima ulazimo u simulaciju motora s pogonom na metanol. Simulacija je provedena pomoću opcije *Boost Pressure Calculation* sa fiksiranim zadanim vrijednostima tlaka koji su jednaki kao i za benzinski motor. Kalibrirani rezultati simulacije s metanolom, uz isključivo samo zamjenu goriva, u usporedbi s rezultatima simulacije dobivenima u 4. poglavlju prikazani su na slikama 17. i 18.



Slika 17. Usporedni dijagram oktanskog broja benzinskog motora i motora s pogonom na metanol bez promjene radnih parametara

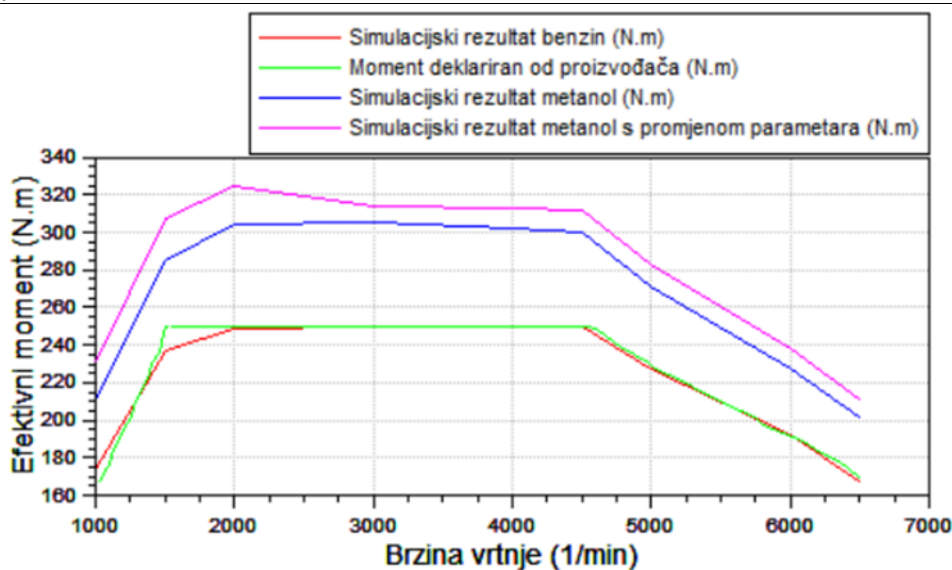


**Slika 18. Usporedni dijagram momenta benzinskog motora i motora s pogonom na metanol bez promjene radnih parametara**

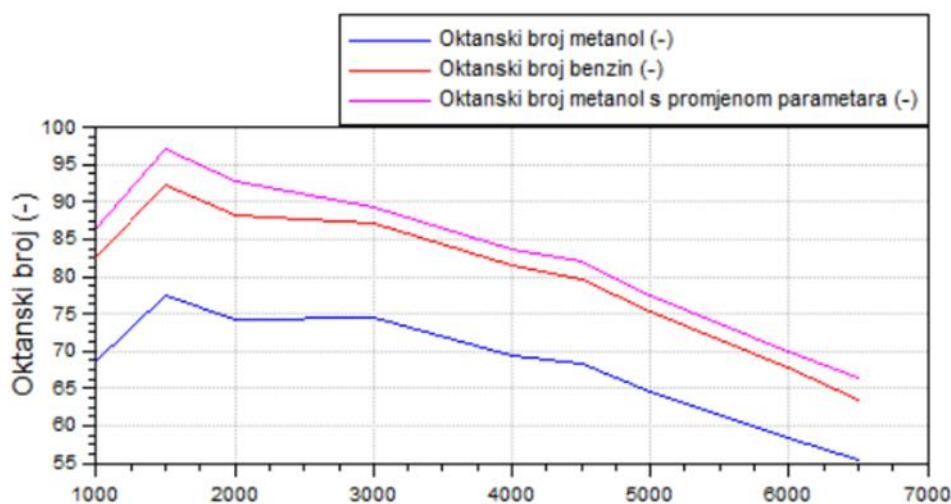
Iz dijagrama na slici 18. je vidljivo kako se samom promjenom na metanol uz zadržane parametre kalibracije za benzin dobije znatno povećanje momenta. Osim toga, sa dijagrama na slici 17. vidljivo je da je oktanski broj dobiven uz takve parametre čak puno niži od oktanskog broja benzina, a kako je već navedeno oktanski broj metanola je 110 što je više od oktanskog broja benzina. U tome je vidljiva mogućnost postizanja još većih performansi promjenom parametara izgaranja.

## 5.2. Simulacija motora pri pogonu metanolom i uz promjenu radnih parametara

Kako je cilj ovog rada saznati koliko promjena vrste goriva na metanol može pridonijeti povećanju performansi motora, u ovoj simulacijskoj konfiguraciji motora pokušalo se doći do parametara koji daju najveći moment. Kalibracija je napravljena na način da se mijenjao kut početka izgaranja  $\alpha_{početak}$  na raniji kako bi povećali oktanski broj sve dok ne dođe do maksimalne vrijednosti 110 ili dok krivulja momenta ne počne stagnirati ili padati. I ovdje su se koristile jednake vrijednosti za tlakove nabijanja u turbopunjaču kao i za prethodne simulacije tako da je i ovdje korištena opcija *Boost Pressure Calculation*. Na slikama 19. i 20. prikazani su rezultati kalibracije s promjenom parametara za motor s pogonom na metanol. Na slikama se nalaze i dijagrami iz poglavlja 4. te iz točke 5.2 radi usporedbe.



Slika 19. Usporedni dijagram momenta benzinskog motora i motora s pogonom na metanol sa i bez promjene parametara



Slika 20. Usporedni dijagram oktanskog broja benzinskog motora i motora s pogonom na metanol sa i bez promjene parametara

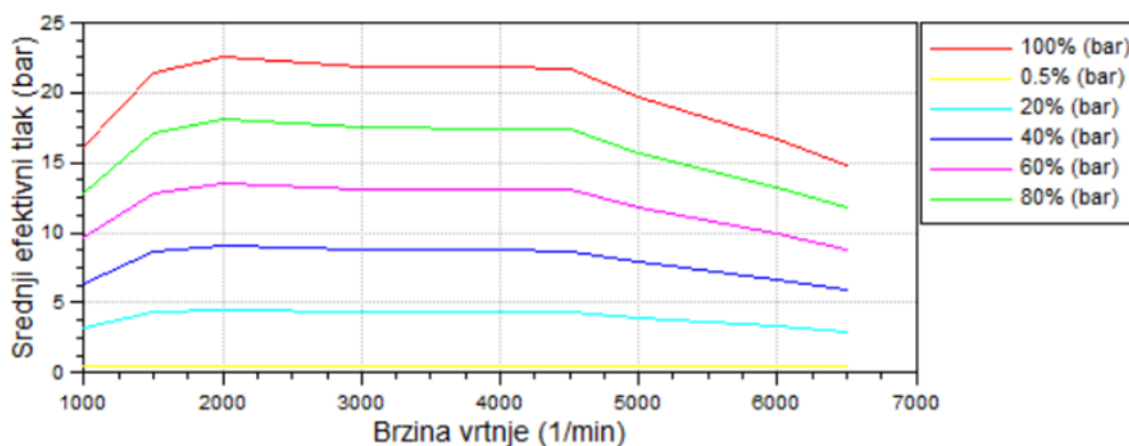
Na dijagramu na slici 20. je vidljivo da za model s promjenom parametara oktanski broj nije dosegao svoju moguću vršnu vrijednost od 110. Razlog je u tome što je prilikom kalibracije utvrđeno da za više vrijednosti oktanskog broja, odnosno za ranije kuteve početka izgaranja, momentna krivulja počne padati na višim brzinama vrtnje, dok na nižim brzinama vrtnje više ne dolazi do porasta momenta. Time je kalibracija završena i dobivena je krivulja momenta na slici 19. U tablici 4. navedene su vrijednosti kuta početka izgaranja koje su dale ovakvu krivulju momenta. Ostali parametri izgaranja su isti kao iz tablice 3 zbog nemogućnosti pronalaska preporučenih vrijednosti za metanol.

**Tablica 4. Parametri izgaranja za simulacijski model motora s pogonom na metanol s promjenom parametara**

Veličina	Oznaka	Vrijednost	
Brzina vrtnje motora	$n$	1000 min <sup>-1</sup>	6500 min <sup>-1</sup>
Početak izgaranja	$\alpha_{početak}$	-7°KV	-22°KV

### 5.3. Djelomična opterećenja modela s promjenom parametara

Postupak je istim onom napisanom za benzinski motor u poglavlju 4.4, osim što je potrebno unijeti vrijednosti količine zraka za izgaranje za metanol koje su već objašnjene u poglavlju 5.1. Isto kao i za benzinski motor u poglavlju 4.4 za dobivanje krivulja punog opterećenja koristi se blago bogata smjesa s faktorom pretička zraka 0.9, a za krivulje djelomičnog opterećenja koristi se stehiometrijska smjesa s faktorom pretička zraka  $\lambda = 1$ . Dobiveni dijagrami za puno opterećenje i za djelomična opterećenja prikazani su na slici 21.



**Slika 21. Srednji efektivni tlak motora za djelomična opterećenja modela s promjenom parametara za pogon metanolom**

## 6. PRIKAZ I USPOREDBA REZULTATA SIMULACIJA

Rezultati simulacija provedenih u programskom paketu AVL BOOST™ obrađeni su i prikazani u obliku topografskih dijagrama u programskom paketu MATLAB™.

Radne točke motora i pripadajuće veličine koje želimo analizirati moguće je prikazati u obliku matrice A:

$$A = [n \ p_e \ X] \quad (4)$$

gdje je:

$n$  – brzina vrtnje motora [ $\text{min}^{-1}$ ];

$p_e$  – srednji efektivni tlak motora [bar];

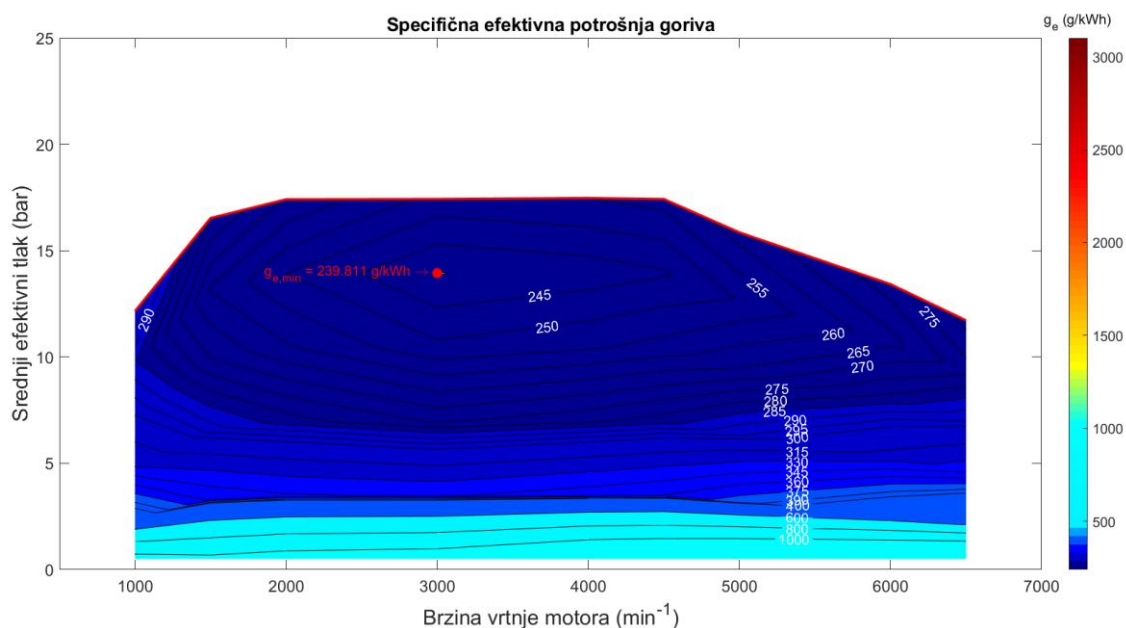
$X$  – veličina koju želimo prikazati.

Analiza je napravljena na način da se veličine prikazuju u ovisnosti o brzini vrtnje te za različita opterećenja motora objašnjena i prikazana na slikama 16. i 21. Podaci za metanol se prikazuju za model s promjenjenim parametrima, odnosno za onaj model za koji je dobiven najveći moment.

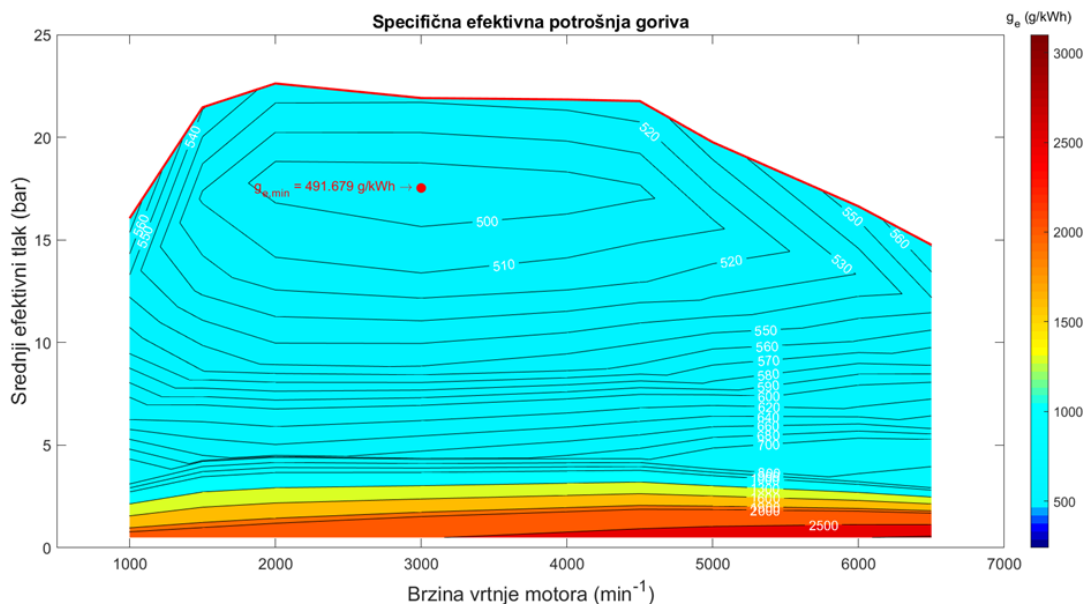
### 6.1. Specifična efektivna potrošnja goriva

U tehnici motora specifična efektivna potrošnja goriva računa se kao omjer satne masene potrošnje goriva  $\dot{m}_{G,h}$  i snage motora  $P_e$ : [2]

$$g_e = \frac{\dot{m}_{G,h}}{P_e}, \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \text{ ili } \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] \quad (5)$$



Slika 22. Specifična efektivna potrošnja goriva za benzin



**Slika 23. Specifična efektivna potrošnja goriva za metanol**

Na slici 22. prikazan je dijagram specifične efektivne potrošnje goriva za benzinski motor, a na slici 23. za motor s primjenom metanola.

Vidimo kako potrošnja raste smanjenjem opterećenja. Jedina iznimka je na 100%-tnom opterećenju, gdje je potrošnja veća jer motor radi s bogatom smjesom ( $Z=13 \text{ kg}_z/\text{kg}_g$ ) u odnosu na djelomična opterećenja gdje je smjesa stehiometrijska ( $Z_0=13 \text{ kg}_z/\text{kg}_g$ ).

Minimalne vrijednosti specifične efektivne potrošnje goriva za oba goriva označene su na pripadajućim dijagramima. Vrijednost za benzinski motor je  $g_e = 239,811 \text{ [g/kWh]}$  dok je kod motora s metanolom  $g_e = 491,679 \text{ [g/kWh]}$ . Prema formuli (5) i dobivenom porastu momenta, odnosno snage promjenom na metanol, moglo bi se očekivati da će takvom motoru potrošnja biti manja. No, drastičan porast specifične efektivne potrošnje goriva kod primjene metanola proizlazi iz znatne razlike u svojstvima goriva kao što su donja ogrijevna vrijednost i stehiometrijski omjer zraka i goriva.

Naime, stehiometrijski omjer zraka i goriva za izgaranje metanola manji je od onog za izgaranje benzina, te iznosi 6,4:1 u odnosu na benzinovih 14,5:1. To znači da je za potpuno izgaranje 1 kg metanola potrebno 6,4 kg zraka, a benzina 14,5 kg zraka. Iz toga proizlazi da je za rad motora pogonjenog metanolom potrebno više goriva.

Specifična efektivna potrošnja goriva može se prikazati formulom:

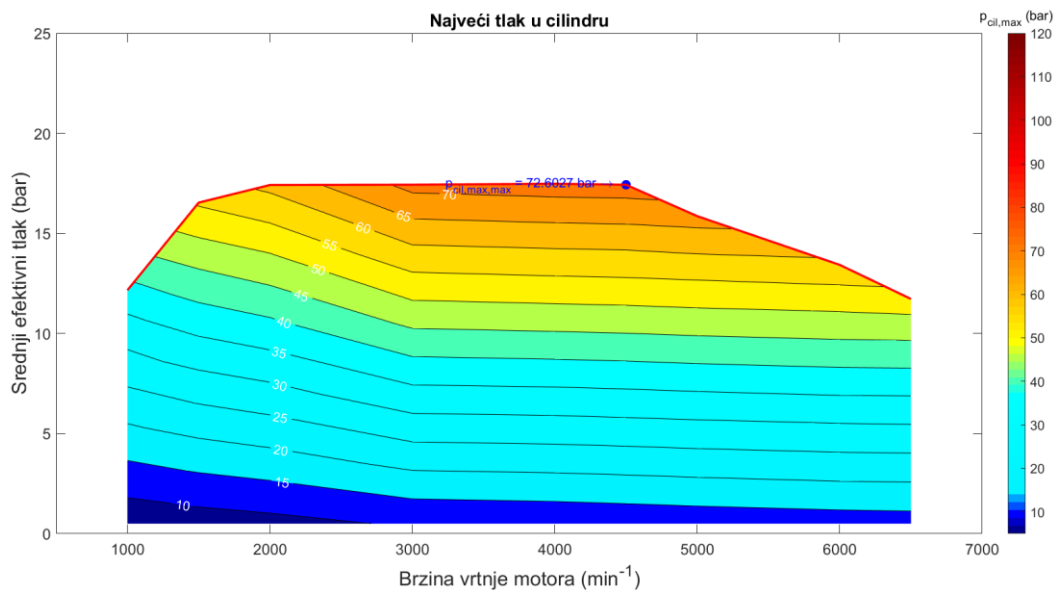
$$g_e = \frac{3.6}{\eta_e \cdot H_d} \quad (6)$$

prema kojoj vidimo da veća ogrijevna vrijednost goriva  $H_d$  daje manju potrošnju. Kako je ogrijevna vrijednost benzina 44,5 MJ/kg, a metanola 19,66 MJ/kg (Tablica 1.) što je više nego

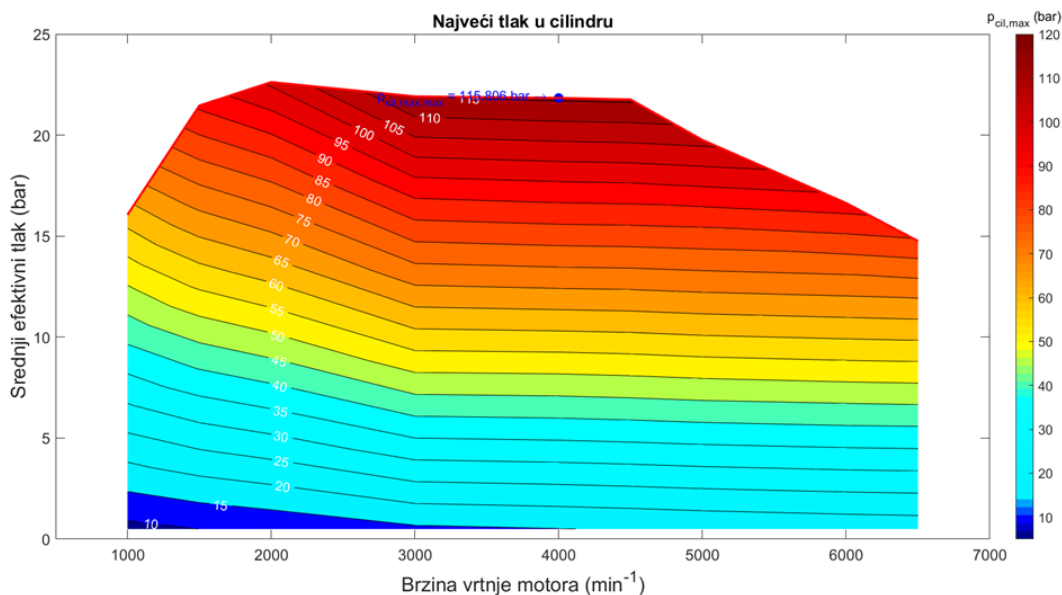
dvostruko manja vrijednost, može se zaključiti kako je velik porast potrošnje primjenom metanola očekivan.

## 6.2. Vršna temperatura i tlak u cilindru

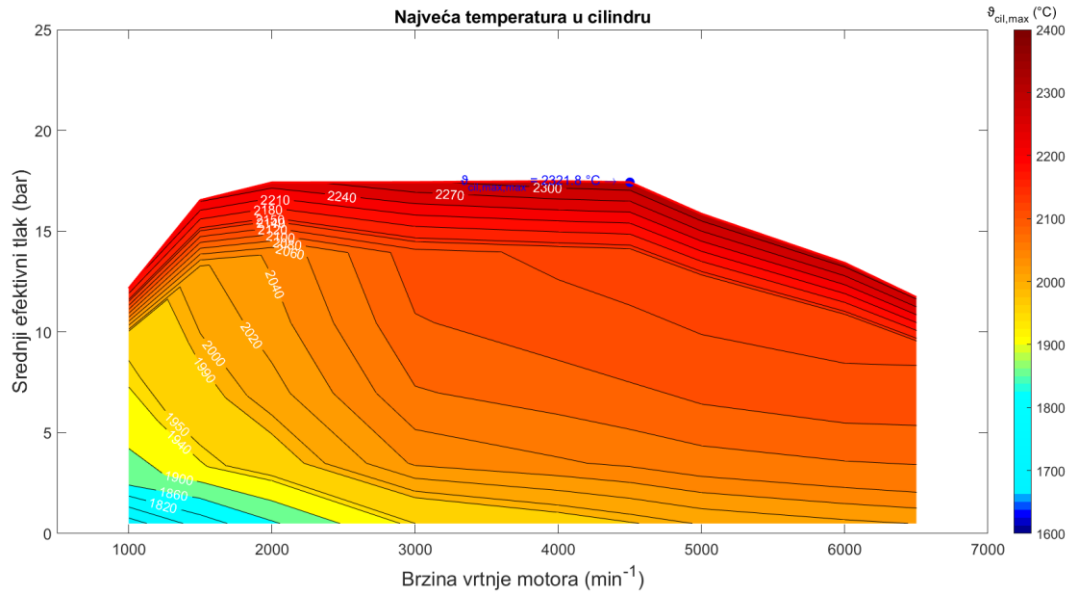
Vršne temperature i tlakovi su vrijednosti koje se javljaju u cilindru za vrijeme izgaranja. Kako je već navedeno, donja ogrjevna vrijednost metanola je manja od one kod benzina, a kako je donja ogrjevna vrijednost toplina oslobođenja izgaranjem goriva, može se zaključiti da su manje vrijednosti temperature i veće vrijednosti tlaka za metanol u tablici 5. upravo posljedica promjene donje ogrjevne vrijednosti.



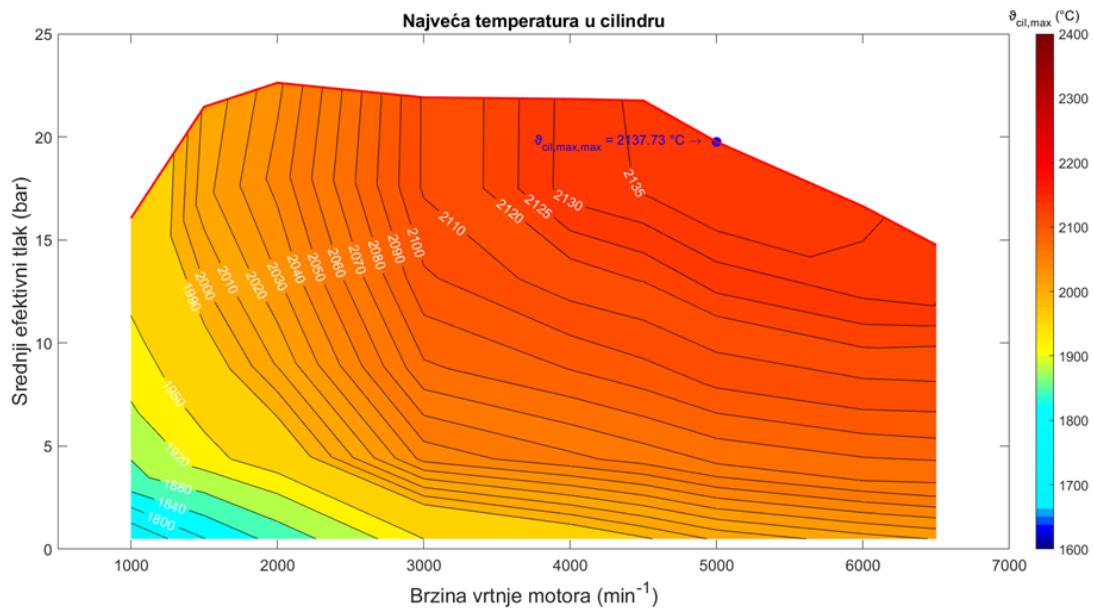
Slika 24. Vršni tlak u cilindru za benzin



Slika 25. Vršni tlak u cilindru za metanol



Slika 26. Vršna temperatura u cilindru za benzin



Slika 27. Vršna temperatura u cilindru za metanol

Tablica 5. Usporedba vršnih temperatura i tlakova u cilindru

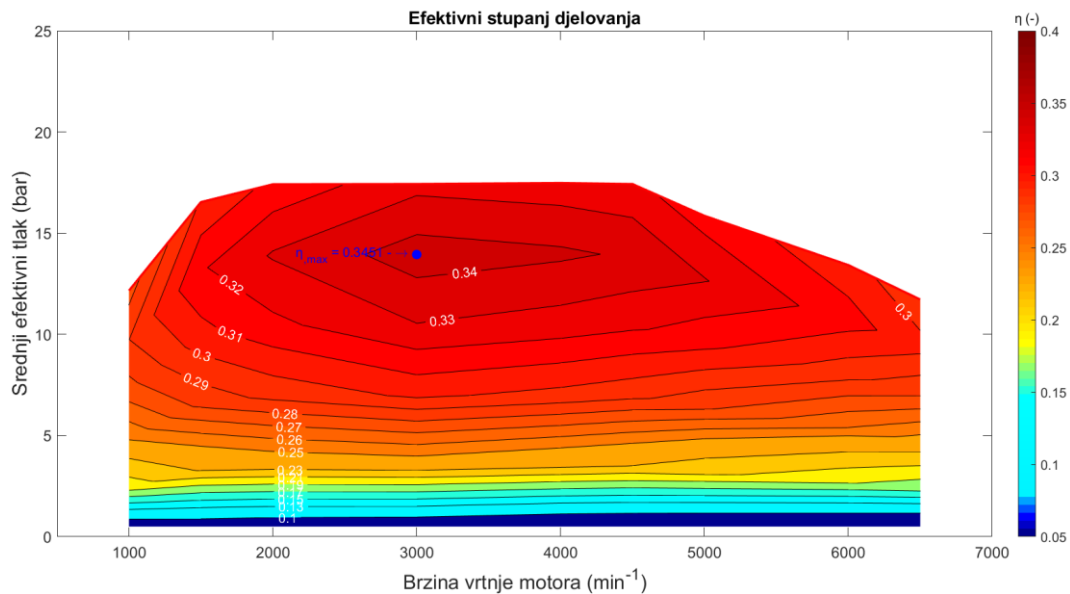
Vrsta goriva	Vršni tlak u cilindru	Vršna temperatura u cilindru
Benzin	72,6027 bar	2321,8 °C
Metanol	115, 806 bar	2137,73 °C

### 6.3. Efektivni stupanj djelovanja

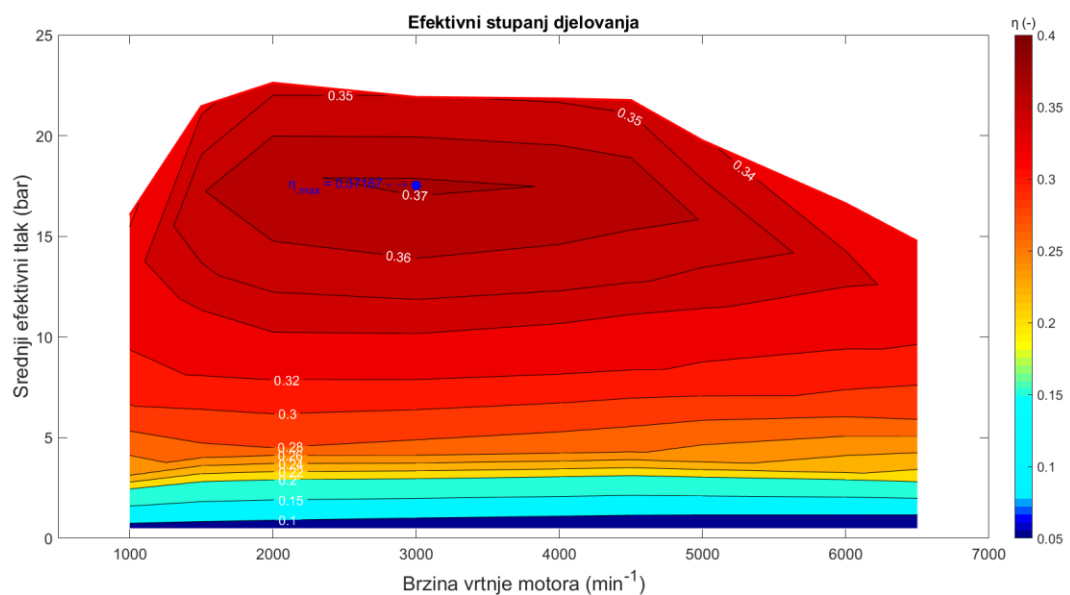
Ekonomičnost motora ocjenjuje se usporedbom efektivnih stupnjeva djelovanja ako su ogrjevne vrijednosti goriva različite. [2] Efektivni stupanj djelovanja opisuje djelotvornost



pretvorbe energije u nekom procesu, te je obrnuto proporcionalan specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva i donjoj ogrjevnoj vrijednosti.



Slika 28. Efektivni stupanj djelovanja za benzin



Slika 29. Efektivni stupanj djelovanja za metanol

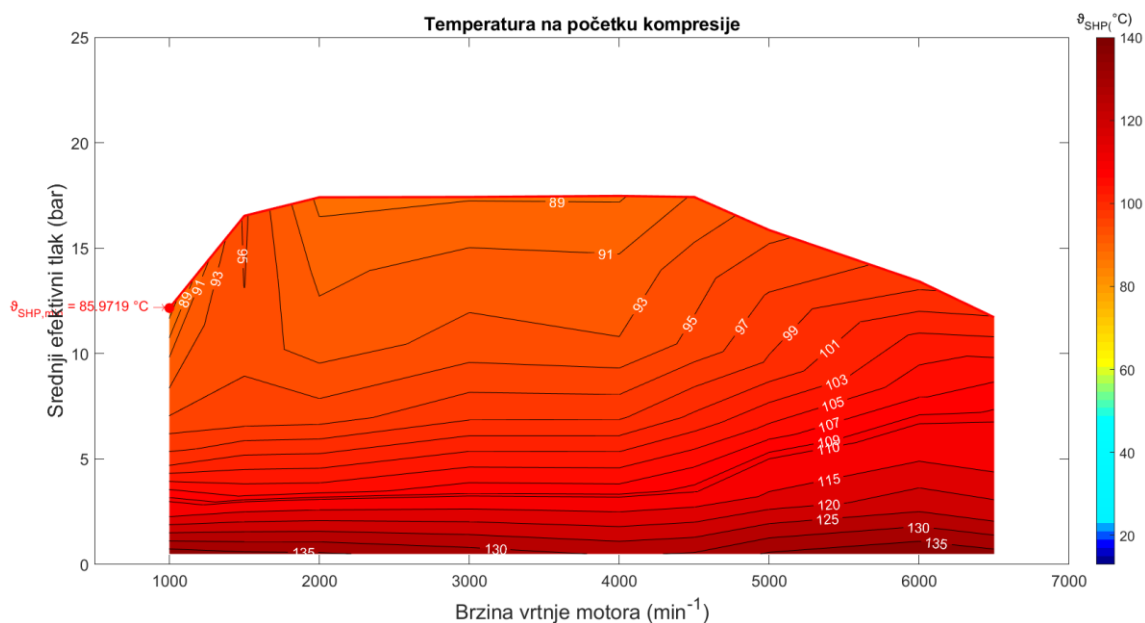
Maksimalne vrijednosti efektivnog stupnja djelovanja za oba goriva mogu se očitati na dijagramima sa slika 28. i 29. Najveći efektivni stupanj djelovanja za benzinski motor je  $\eta_e = 0,3451 [-]$ , a za motor s primjenom metanola  $\eta_e = 0,37167 [-]$ .

Porast efektivnog stupnja djelovanja kod primjene metanola može se pripisati porastu opterećenja motora, ali također i očekivanim manjim toplinskim gubitcima kao rezultat nižih

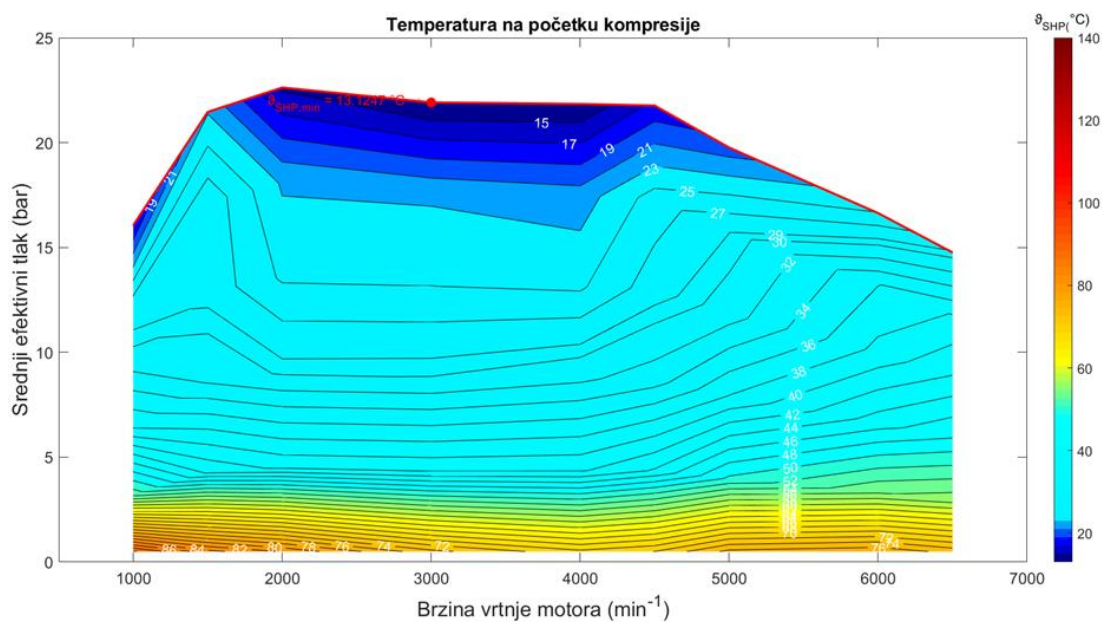
temperatura za vrijeme izgaranja koje su vidljive iz dijagrama vršnih temperatura u cilindru (slike 16. i 27.) odnosno iz očitanih vrijednosti u tablici 5.

#### 6.4. Temperatura i tlak na početku kompresije

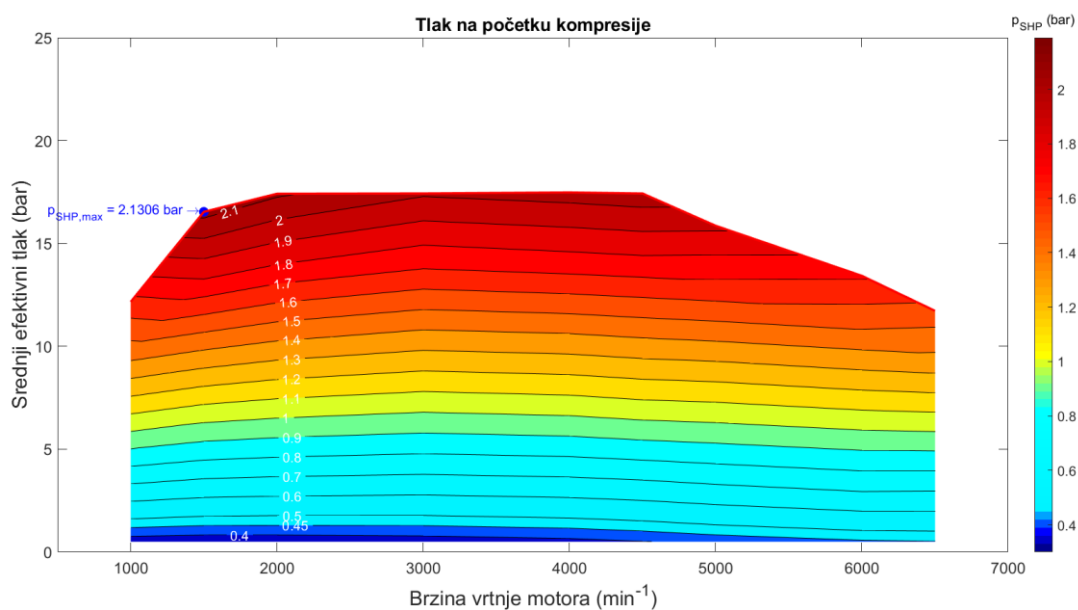
Usporedbom dijagrama na slikama 30. i 31. te dijagrama na slikama 32. i 33., odnosno usporedbom vrijednosti iz tablice 6, vidi se da je temperatura motora pogonjenog metanolom na početku kompresije manja, a tlak veći. Takve promjene su posljedica veće topline isparavanja metanola u odnosu na benzin uslijed čega dolazi do hlađenja smjese u cilindru.



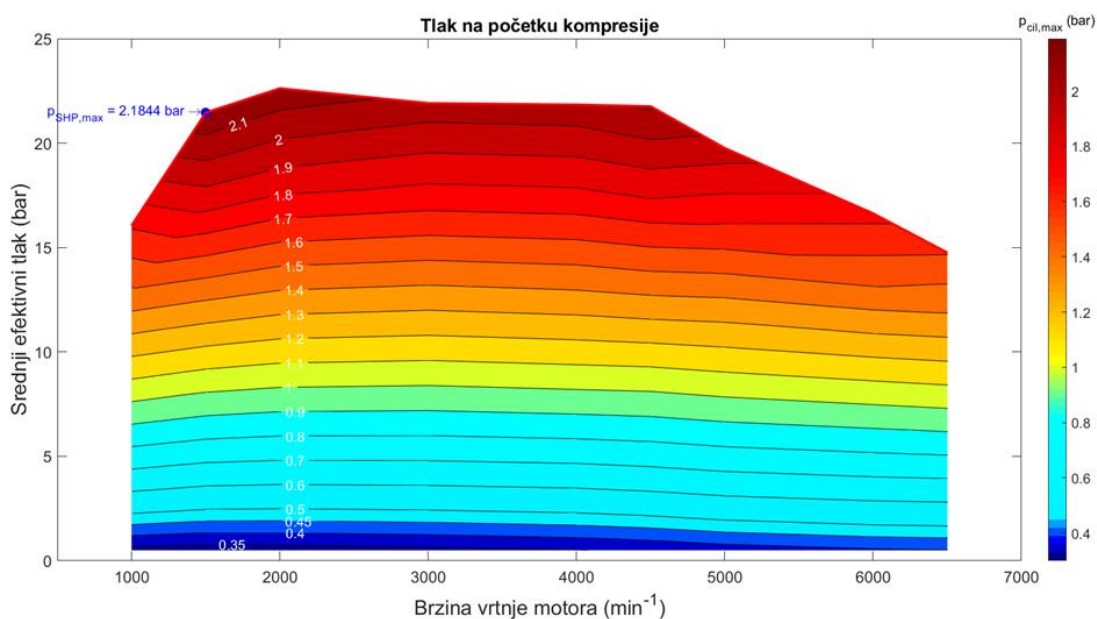
Slika 30. Temperatura na početku kompresije za benzin



Slika 31. Temperatura na početku kompresije za metanol



Slika 32. Tlak na početku kompresije za benzin



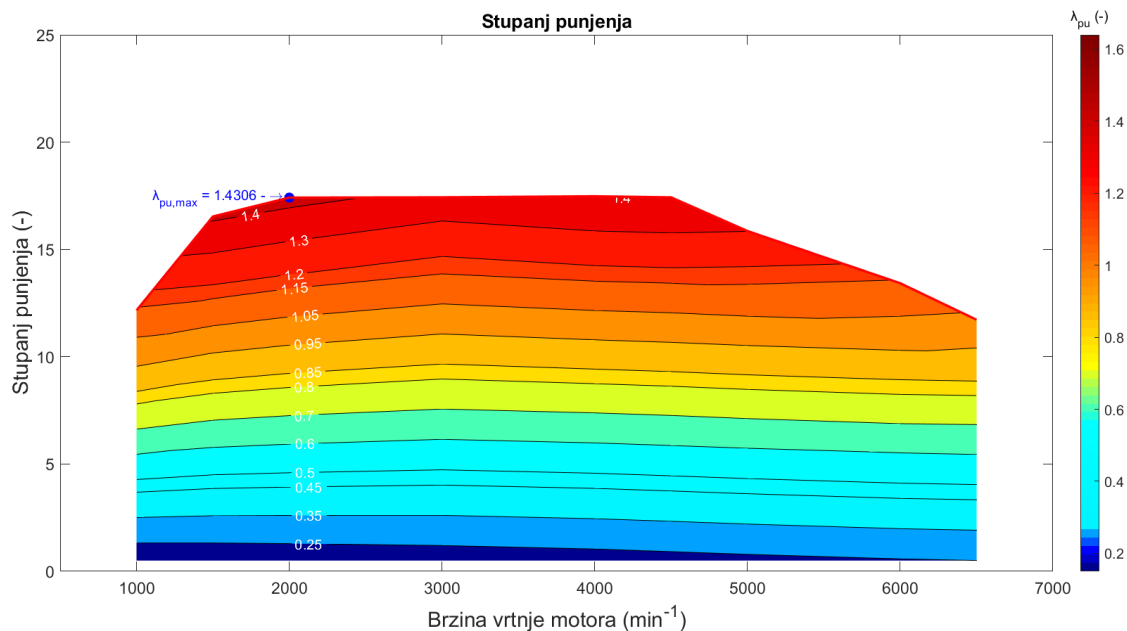
Slika 33. Tlak na početku kompresije za metanol

Tablica 6. Usporedba temperatura i tlakova na kraju kompresije

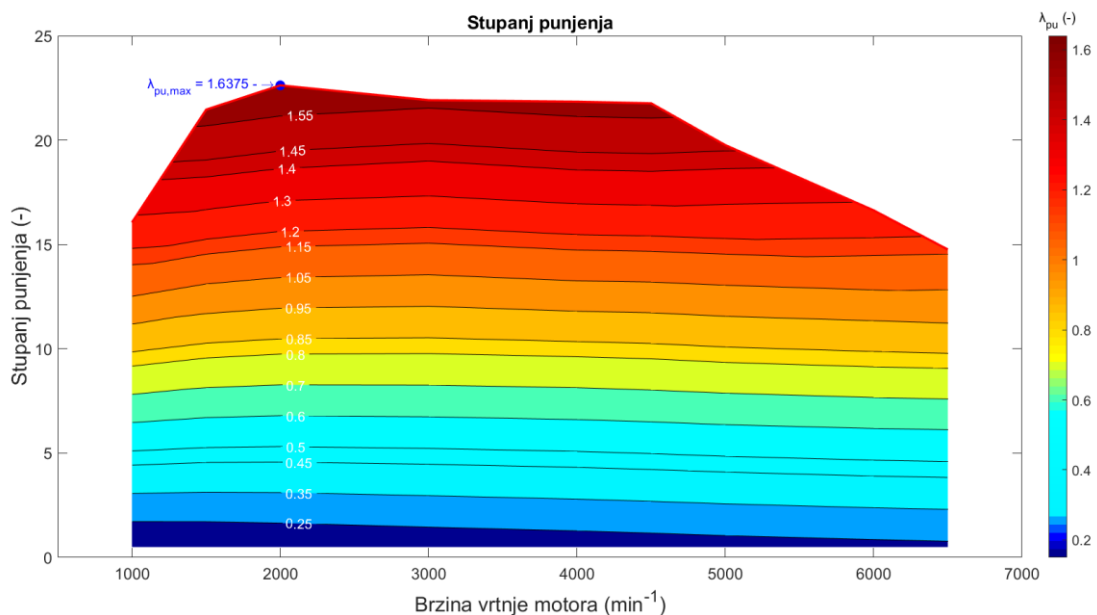
Vrsta goriva	Tlak na početku kompresije	Temperatura na početku kompresije
<b>Benzin</b>	2,1306 bar	115, 806 bar
<b>Metanol</b>	2,1844 bar	2137,73 °C

### 6.5. Stupanj punjenja

Definicija stupnja punjenja navedena je već prilikom objašnjenja nabijanja (poglavlje 2.4). Tamo je objašnjeno da je povećanje snage motora bez povećanja radnog volumena i brzine vrtnje moguće ostvariti povećanjem stupnja punjenja, odnosno mase svježeg zraka u cilindru što je bitna polazna informacija za analizu sljedećih dijagrama.



Slika 34. Stupanj punjenja za bezin



Slika 35. Stupanj punjenja za metanol

Na slici 34. prikazan je dijagram stupnja punjenja za benzinski motor, a na slici 35. za motor s primjenom metanola. Očitanjem maksimalnih vrijednosti stupnja punjenja iz tih dijagrama dobivamo vrijednost za motor s benzinskim gorivom  $\lambda_{pu} = 1,4306 [-]$ , a za motor s metanolom  $\lambda_{pu} = 1,6375 [-]$ .

Mogućnost dobivanja većeg stupnja punjenja kod primjene metanola, uz zadržavanje istih tlakova nabijanja, dolazi iz veće topline isparavanja metanola u odnosu na benzin što je već opisano kod objašnjenja temperatura i tlakova na početku kompresije. Rezultat manje temperature na početku kompresije, odnosno temperature nakon zatvaranja usisnog ventila, je veća masa svježeg zraka u cilindru čime se dobiva veći stupanj punjenja.

## 7. ZAKLJUČAK

Svrha ovog završnog rada bila je da se pomoću analize dijagrama dobivenih u korištenim programskim paketima potvrde početne pretpostavke utjecaja razlika u svojstvima metanola i benzina na značajke rada motora. Svojstva metanola poput veće temperature isparavanja, većeg oktanskog broja, manjeg omjera goriva i zraka te manje donje ogrjevne vrijednosti u usporedbi s benzinom, predstavljaju prednosti i mane prenamjene Ottovog konvencionalnog motora u Ottov motor pogonjen metanolom.

Analizom topografskih dijagrama može se zaključiti da je specifična efektivna potrošnja goriva veća zbog puno manje donje ogrjevne vrijednosti i manjeg omjera goriva i zraka što će rezultirati potrebom za većim obujmom spremnika goriva, a značiti će i veću potrošnju za korisnika vozila. Veća toplina isparavanja metanola u odnosu na benzin uzrokuje hlađenje smjese u cilindru što se vidjelo usporedbom topografskih dijagrama za temperaturu na početku kompresije. Kad je smjesa hladna kapljevito gorivo slabije isparava što uzrokuje otežano upaljivanje smjese kod hladnog pokretanja motora. Ova pojava nije rezultat odrađene simulacije u ovom radu, već poznata pojava koja predstavlja još jedan nedostatak metanola.

No, zbog veće topline isparavanja i većeg hlađenja smjese na početku kompresije stupanj punjenja je veći. Povećanje stupnja punjenja dovodi do povećanja efektivnog momenta. U ovom radu najveći ostvaren iznos povećanja momenta samo promjenom goriva na metanol kreće se oko vrijednosti od 20%. Istovremeno, niže temperature u cilindru za vrijeme kompresije rezultiraju manjim rizikom od detonantnog izgaranja što je vidljivo iz izračunatog potrebnog oktanskog broja za iste radne parametre. Manja sklonost detonaciji omogućuje i raniji trenutak preskakanja iskre (u simulacijskom modelu zadavano kao početak izgaranja). S obzirom da je za metanol istraživački oktanski broj veći nego za benzin, početak izgaranja više nije ograničen pojavom detonantnog izgaranja nego padom momenta (učinkovitosti). Kako se opasnost od pojave detonacije pokazala manjom kod primjene metanola, može se zaključiti da će takvo gorivo dati mogućnost povećanja stupnja kompresije, a s povećanjem stupnja kompresije dolazi i do povećanja stupnja djelovanja. Važno je napomenuti kako se u simulaciji provedenoj u ovom završnom radu nije mijenjao kompresijski omjer, već je držan kao zadani od proizvođača, a mijenjao se trenutak početka izgaranja. Promjenom trenutka početka izgaranja nakon promjene goriva na metanol simulacijom se dobio maksimalni porast momenta od oko 24% u usporedbi na benzin. Porast efektivnog stupnja djelovanja od 8% kod primjene metanola izveden ovakvom simulacijom događa se zbog porasta opterećenja motora i manjih toplinskih gubitaka kao rezultat nižih temperatura za vrijeme izgaranja.

Iz svega navedenog, pokazalo se da su mnoga svojstva i karakteristike metanola zaista povoljna za motore s unutarnjim izgaranjem, no postoje i svojstva koja bi rezultirala problemima prilikom primjene ovakvog goriva. Isto tako, uz spomenute nedostatke potrebno je napomenuti da u ovom završnom radu nisu razmatrana potrebna konstrukcijska rješenja te njihova izvedivost ukoliko bi se htjelo prilagoditi motor s pogonom na benzin na motor pogonjen metanolom kao ni štetne emisije, cijena, dostupnost metanola i slično.

Može se zaključiti kako zaista postoji potencijal da metanol zamijeni goriva fosilnog porijekla, no kako bi se uistinu moglo zaključiti koliki je taj potencijal i može li se ostvariti u praksi potrebna su dodatna istraživanja te pronalazak rješenja za nedostatke koje primjena metanola sa sobom nosi.

---

**LITERATURA**

- [1] [https://www.researchgate.net/publication/282744095\\_An\\_overview\\_of\\_methanol\\_as\\_a\\_n\\_internal\\_combustion\\_engine\\_fuel](https://www.researchgate.net/publication/282744095_An_overview_of_methanol_as_a_n_internal_combustion_engine_fuel)
- [2] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [3] <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2014/MC-10122162-9999.pdf>
- [4] <https://www.auto-data.net/en/audi-a4-b8-8k-1.8-tfsi-160hp-4303>
- [5] [https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine\\_id=118](https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=118)
- [6] <https://paultan.org/2008/06/27/audi-a4-18t-b8-launched-in-malaysia/>
- [7] AVL BOOST™ – version 2013.2., Users Guide and Theory
- [8] <http://www.catcams.com/engines/engine-selection.aspx?SelectedManufacturer=29>



---

**PRILOZI**

I. CD-R disc