Analiza fizikalnog zakašnjenja paljenja i primjena modela rasta jezgre plamena u Ottovom motoru

Bubalo, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:749727

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Bubalo

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Student:
Ante Bubalo

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Momiru Sjeriću na svim savjetima, literaturi i vremenu koje je uložio kako bi mi pomogao. Bez njegovih znanja, korisnih smjernica i dobre volje u savjetovanju izrada ovog završnog rada ne bi bila moguća.

Također se zahvaljujem majci Mari i ocu Anti, te bratu i prijateljima na svoj pomoći i podršci koju su mi pružili tijekom studija.

Ante Bubalo

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Bubalo** Mat. br.: 0035206857

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza fizikalnog zakašnjenja paljenja i primjena modela rasta jezgre plamena u Ottovom motoru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of Ignition Delay and Application of Flame Kernel Growth Model in Spark Ignition Engine**

Opis zadatka:

Fizikalno zakašnjenje paljenja u Ottovim motorima predstavlja period od trenutka početka preskakanja električne iskre do trenutka kada nastaje primjetni porast tlaka u cilindru motora u usporedbi s profilom tlaka ostvarenim bez izgaranja. Pored kemijskog zakašnjenja paljenja, fizikalno zakašnjenje paljenja sadrži i utjecaj lokalnog strujanja, sastava smjese, geometrije prostora izgaranja, elektrodi svjećice i energije sustava paljenja.

U sklopu završnog rada potrebno je:

- Analizirati izmjerene radne točke u radnom području Ottovog motora,
- Definirati način određivanja zakašnjenja paljenja iz izmjerenih profila tlaka,
- Za odabrani broj radnih točaka motora izračunati fizikalno zakašnjenje paljenja,
- Analizirati i prikazati ovisnost fizikalnog zakašnjenja paljenja o radnim parametrima motora i/ili uvjetima u cilindru motora,
- Izraditi simulacijski model razmatranog Ottovog motora i primijeniti kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena u programskom paketu AVL Boost™,
- Napraviti validaciju i provesti parametarsku analizu modela rasta jezgre plamena na odabranom broju radnih točaka motora,
- Provesti simulaciju fizikalnog zakašnjenja paljenja kroz cijelo radno područje motora,
- Usporediti ostvarene simulacijske rezultate s izmjerenim podacima i kvantificirati pogreške simulacijskog modela,
- Iznijeti zaključke o ostvarenim simulacijskim rezultatima i njihovoj usporedbi.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnoga rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

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 IV
POPIS OZNAKA VI
KRATICE VIII
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
2. OPIS SIMULACIJSKOG PAKETA 2
2.1. Odabrani motor i njegovo modeliranje u simulacijskom paketu 3
3. ODABIR RADNIH TOČAKA 8
3.1. SHP tlak 9
3.2. Sastav smjese 12
4. ODREĐIVANJE ZAKAŠNJENJA PALJENJA 14
4.1. Analiza zakašnjenja paljenja u ovisnosti o radnim parametrima motora 17
5. KVAZI-DIMENZIJSKI MODEL RASTA JEZGRE PLAMENA 24
5.1. Pod-model električnog kruga 25
5.2. Pod-model rasta jezgre plamena 26
5.3. Pod-model električne iskre 27
5.4. Pod-model geometrije svjećice 27
6. PRIMJENA KVAZI-DIMENZIJSKOG MODELA RASTA JEZGRE PLAMENA 29
6.1. Izračun zakašnjenja paljenja pomoću kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena. 39
6.2. Analiza rezultata kvazi-dimenzijskog modela 42
6.3. Analiza utjecajnosti ulaznih parametara 44
6.4. Usporedba rezultata početnog i kvazi-dimenzijskog modela 54
6.4.1. Specifična efektivna potrošnja goriva 55
6.4.2. CA5 56
6.4.3. CA50 58
7. Zaključak 59
LITERATURA 60

POPIS SLIKA

Slika 1. Simulacijski model kojim opisujemo odabrani motor. 4
Slika 2. Definiranje vrijednosti za usisne ventile. 5
Slika 3. Definiranje podizaja usisnih ventila. 5
Slika 4. Postavke *Formula Interpretera*. 6
Slika 5. Postavke *PID Contorllera*. 7
Slika 6. Odabrane radne točke. 8
Slika 7. Profil podizaja usisnog ventila. 9
Slika 8. Profil tlaka u cilindru za točku 3. 10
Slika 9. *Case explorer* za slučaj maksimalnog opterećenja. 11
Slika 10. Vrijednosti SHP tlaka za slučaj maksimalnog opterećenja. 11
Slika 11. Vrijednosti SHP tlaka za slučaj opterećenja od 400 kPa. 12
Slika 12. Vrijednost SHP tlaka za slučaj opterećenja od 100 kPa. 12
Slika 13. Omjer goriva i zraka za slučaj maksimalnog opterećenja. 13
Slika 14. Omjer goriva i zraka za slučaj opterećenja od 400 kPa. 13
Slika 15. Omjer goriva i zraka za slučaj opterećenja od 100 kPa. 13
Slika 16. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora. 14
Slika 17. Profili tlakova za točku 12. 15
Slika 18. Određivanje zakašnjenja paljenja za točku 12. 16
Slika 19. Detalj profila tlakova. 16
Slika 20. Zakašnjenje paljenja radnih točaka. 17
Slika 21. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o brzini vrtnje. 18
Slika 22. Zakašnjenje paljenja izraženo u milisekundama. 19
Slika 23. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o trenutku preskakanja iskre. 20
Slika 24. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o srednjem efektivnom tlaku. 21
Slika 25. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka. 22
Slika 26. Ovisnost zakašnjenja paljenja o tlaku u cilindru. 22
Slika 27. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o temperaturi u cilindru. 23
Slika 28. Sučelje izgaranja u kojem je izgaranje definirano po fraktalnoj teoriji. 24
Slika 29. Definiranje geometrije prostora izgaranja. 25
Slika 30. Geometrijski parametri svjećice. 28
Slika 31. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra r_0. 31
Slika 32. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra E_S. 32
Slika 33. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra C_{BD}. 34
Slika 34. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra k_w. 35
Slika 35. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra T_{SP}. 37
Slika 36. Područje u kojem ćemo varirati parametar α. 37
Slika 37. Vrijednosti srednjeg odstupanja za različite slučajeve parametra α 38
Slika 38. Usporedba rezultata zakašnjenja paljenja. 40

Slika 39. Srednje odstupanje rezultata zakašnjenja paljenja. 41
Slika 40. Kvazi-dimenzijsko zakašnjenje paljenja prema razini opterećenja. 42
Slika 41. Vremensko zakašnjenje paljenja dobiveno kvazi-dimenzijskim modelom. 43
Slika 42. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka. 43
Slika 43. Srednje odstupanje i prosječno srednje odstupanje za pojedine slučajeve seta r_0. 47
Slika 44. Usporedba indicirane specifične potrošnje goriva. 55
Slika 45. Razlika između eksperimentalnih i kvazi-dimenzijskih rezultata za ISFC te prosječna vrijednost odstupanja 56
Slika 46. Usporedba CA5. 57
Slika 47. Razlika između kvazi-dimenzijskih i eksperimentalnih podataka za CA5 te prosječna vrijednost. 57
Slika 48. Usporedba CA50. 58
Slika 49. Razlika između kvazi-dimenzijskih i eksperimentalnih podataka za CA50. 58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci odabranog motora. ... 3
Tablica 2. Radne točke ... 8
Tablica 3. Vrijednosti za točku 3 ... 9
Tablica 4. Tlak u SHP-u za maksimalno opterećenje. ... 10
Tablica 5. Tlak u SHP-u za 400 kPa. ... 10
Tablica 6. Tlak u SHP-u za 100 kPa. ... 11
Tablica 7. Zakašnjenje paljenja radnih točaka. ... 17
Tablica 8. Zakašnjenje paljenja izraženo u milisekundama. ... 19
Tablica 9. Vrijednosti geometrijskih parametara svjećice. ... 27
Tablica 10. Vrijednosti parametra r_0. ... 30
Tablica 11. Srednja odstupanja za parametar r_0. ... 30
Tablica 12. Vrijednosti parametra E_S ... 31
Tablica 13. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar E_S ... 32
Tablica 14. Vrijednosti parametra C_{BD}. ... 33
Tablica 15. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar C_{BD}. ... 33
Tablica 16. Vrijednosti parametra k_w. ... 34
Tablica 17. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar k_w. ... 35
Tablica 18. Vrijednosti parametra T_{SP}. ... 36
Tablica 19. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar T_{SP}. ... 36
Tablica 20. Vrijednosti parametra α. ... 37
Tablica 21. Vrijednosti srednjeg odstupanja za slučajeve sa parametrom α. ... 38
Tablica 22. Ulazni parametri kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena. ... 39
Tablica 23. Srednje odstupanje rezultata. ... 41
Tablica 24. Ulazni parametri kvazi-dimenzijskog modela za slučaj 1. ... 44
Tablica 25. Vrijednosti parametra r_0. ... 45
Tablica 26. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar r_0 ... 46
Tablica 27. Prosječno odstupanje po slučajevima za parametar r_0. ... 46
Tablica 28. Vrijednosti parametra E_S ... 47
Tablica 29. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar E_S ... 48
Tablica 30. Vrijednosti parametra C_{BD}. ... 48
Tablica 31. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar C_{BD}. ... 49
Tablica 32. Vrijednosti parametra T_{SP}. ... 49
Tablica 33. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar T_{SP}. ... 50
Tablica 34. Vrijednost parametra k_w ... 50
Tablica 35. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar k_w. ... 51
Tablica 36. Vrijednosti parametra α. ... 51
Tablica 37. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar α 52
Tablica 38. Prosječne vrijednosti srednjeg odstupanja za setove prema parametrima. ... 52

Tablica 39. Postotak promjene vrijednosti parametara r_0. 53
Tablica 40. Utjecaj postotne promjene ulaznih parametara na konačni rezultat. 54
Tablica 41. Vrijednosti točaka sa velikim odstupanjem. 55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
z	[-]	Broj cilindara
D	[mm]	Promjer klipa
H	[mm]	Hod klipa
V_H	[cm^3]	Radni volumen motora
l	[mm]	Duljina klipnjače
ε	[-]	Kompresijski omjer
e	[mm]	Zamak osovinice klipa
T	[-]	Broj taktova
M_e	[Nm]	Efektivni moment
P_e	[kW]	Efektivna snaga
p_e	[kPa]	Srednji efektivni tlak
n_m	[min^{-1}]	Broj okretaja u minuti
$n_{v,u}$	[-]	Broj usisnih ventila
$n_{v,i}$	[-]	Broj ispušnih ventila
$d_{v,u}$	[mm]	Promjer usisnih ventila
$d_{v,i}$	[mm]	Promjer ispušnih ventila
SHP	[Pa]	Tlak u trenutku zatvaranja usisnih ventila
λ	[-]	Faktor pretička zraka
α	[°]	Kut zakreta koljenastog vratila
α_P	[°]	Kut preskakanje električne iskre
α_{IP}	[°]	Kut početka izgaranja
α_{ZP}	[°]	Zakašnjenje paljenja u kutu zakreta koljenastog vratila
t_{ZP}	[ms]	Vremensko zakašnjenje paljenja
T	[°C]	Temperatura
E_S	[mJ]	Inicijalna energija sekundarnog strujnog kruga
R_S	[Ω]	Otpor sekundarnog strujnog kruga
V_{ie}	[V]	Napon između elektrodi
i_S	[A]	Jakost struje sekundarnog strujnog kruga
r	[]	Opis oznake
E_K	[J]	Energija predana jezgri
m_k	[kg]	Masa jezgre
Q_E	[W]	Dovedena električna snaga
Q_W	[W]	Gubitak topline jezgre
δ_{UZ}	[kg/m^3]	Gustoća neizgorene zone
S_K	[m^2]	Slobodna površina jezgre plamena
$U_{L,eff}$	[m/s]	Efektivna laminarna brzina plamena

k_w	[W/m^{2}K]	Koeficijent prijelaza topline
S_e	[m^2]	Trenutačna površina jezgre u dodiru s elektrodama
T_K	[°C]	Temperatura jezgre plamena
T_{SP}	[°C]	Temperatura elektrodi svjećice
r_0	[mm]	Kritični radijus jezgre plamena
T_Q	[°C]	Temperatura gašenja jezgre plamena
L_S	[H]	Induktivitet sekundarnog strujnog kruga
C_{BD}	[V/√(J·mm)]	Konstanta proboja električne iskre
$V_{A,fall}$	[V]	Pad napona na anodi svjećice
$V_{C,fall}$	[V]	Pad napona na katodi svjećice
S	[%]	Srednje odstupanje

KRATICE

CFD	Računalna dinamika fluida (eng. Computational Fluid Dynamics)
0-D	Jednodimenzijski
VVT	Fazni pomak razvodnog mehanizma (eng. Variable Valve timing)
ROHR	Karakteristika oslobađanja topline (eng. Rate Of Heat Release)
SHP	Početak kompresije smjese (eng. Start of High Pressure)
A/F Ratio	Omjer goriva i zraka (eng. Air/Fuel Ratio)
BMEP	Srednji efektivni tlak (eng. Brake Mean Effective Pressure)
GMT	Gornja mrtva točka
ISFC	Indicirana specifična potrošnja goriva (eng. Indicated-specific fuel consumption)
CA5	Kut zakreta koljenastog vratila kod kojeg izgori 5% mase goriva u cilindru
CA50	Kut zakreta koljenastog vratila kod kojeg izgori 50% mase goriva u cilindru

SAŽETAK

Vozila pogonjena motorima s unutarnjim izgaranjem glavni su način transporta u svijetu. Pred proizvođače se stavlja konstantan zahtjev za poboljšanjem pa su vozila u svakoj novoj generaciji jača, sigurnija, udobnija, štedljivija i čistija . To ujedno znači velik trošak za istraživanje i razvoj pa proizvođači traže način kako poboljšati proces razvoja vozila. Zbog mogućnosti koje nude i prihvatljivog troška kao odličan alat pokazale su se računalne simulacije koje su sada nezaobilazne u razvoju gotovo svih komponenti vozila. Ovaj rad bavi se simulacijskim modelom koji opisuje rad odabranog motora, njegovom primjenom i usporedbom rezultata s eksperimentalnim podacima. Proizvođači motora s unutarnjim izgaranjem suočeni su s velikim brojem izazova; međunarodne organizacije i vlade postavljaju zahtjeve vezane za emisiju štetnih plinova koje su svake godine sve oštrije, zahtjevi potrošača su što je moguće manja potrošnja, uz jednaku ili veću snagu, pa je razvoj novog vozila traženje optimuma u svim zahtjevima. Temelj svake optimizacije u motorima je optimizacija procesa izgaranja. U Ottovim motorima proces izgaranja započinje preskakanjem električne iskre no izgaranje ne počinje trenutno već se javlja zakašnjenje paljenja u kojem se formira jezgra plamena. Fizikalno zakašnjenje paljenja predstavlja period od trenutka preskakanja električne iskre do trenutka kada nastaje primjetan porast tlaka u usporedbi s profilom tlaka ostvarenim bez izgaranja i vrlo je važno u opisivanju procesa izgaranja.

U ovom radu je analizirano fizikalno zakašnjenja paljenja, a analiza je provedena usporedbom eksperimentalnih podataka i simulacijskih rezultata dobivenih primjenom programa AVL BOOST^{TM}. Primijenjen je kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena kojim se može obuhvatiti fizikalno zakašnjenje paljenja u Ottovim motorima. Pokazano je da model rasta jezgre plamena dobro opisuje fenomen zakašnjenja paljenja, prosječno odstupanje u rezultatima je 17.75% s tim da su neke točke pokazale povećano odstupanje te uz dodatnu prilagodbu u tim točkama opisivanje zakašnjenja paljenja može biti još bolje. Primijenjeni model može se koristiti i za analizu brojnih drugih veličina pa je tako prosječno odstupanje kvazi-dimenzijskih rezultata indicirane specifične potrošnje u odnosu na rezultate dobivene eksperimentalnim putem 5.51%.

Ključne riječi: Ottov motor, zakašnjenje paljenja, simulacija radnog ciklusa, model rasta jezgre plamena.

SUMMARY

Main form of transportation in today's world is by vehicles with internal combustion engines. Manufacturers are under constant pressure to develop quicker, safer, more comfortable and cleaner vehicles. Low fuel consumption is another important demand. All of that raises R&D costs significantly and therefore manufacturers are looking for ways to improve development processes of new vehicles. Because of high computational power of modern computers and relatively low costs, applicaton of computational simulations in development of new vehicles is a new standard. Rules regarding vehicle emissons are getting more strict by every generation and manufacturers are forced to obey them, whilst costumers have demand of low fuel consumption with same or more powerful engines. Therefore optimization of every componet is much needed. Basis of any optimization of IC engine is optimization of combustion process. In SI engines combusion starts by electric discharge of a spark plug. Combustion, however, is not instantaneous, electric discharge is followed by ingintion delay in which the flame kernel is formed. Ignition delay is defined as period from spark discharge untill significant rise of pressure can be traced.

This paper analizes ignition delay using experimental data and simulation model of particular engine. Simulation model is formed in AVL BOOST^{TM} program and Flame Kernel Growth Model is applied. This paper shows that Flame Kernel Growth Model is excellent tool for describing ignition delay phenomena, average deviation in results when comparing simulation and experimental results is 17.75% with huge potential for improvement if certain working points are better described.

Key words: Spark ignited engine, igniton delay, Flame Kernel Growth model, cycle simulation.

1. UVOD

Motori s unutarnjim izgaranjem su najvažniji i najzastupljeniji način dobivanja mehaničkog rada za pogon vozila. Unatoč sve većoj popularizaciji "alternativnih" pogona, kao što su električni i hibridni, motori s unutarnjim izgaranjem zadržati će velik udio na tržištu i u daljoj budućnosti zbog svojih prednosti, prije svega jednostavnosti i pouzdanosti. Glavni problem motora s unutarnjim izgaranjem su loša iskoristivost dovedene energije (30-40%) i štetne emisije koje se ispuštaju u okoliš, a glavni trend kojim se pokušava postići poboljšanje u tim područjima posljednjih desetak godina u automobilskoj industriji je smanjenje radnog obujma motora i primjena prednabijanja kako bi se povećala specifična snaga motora. Uz to provodi se i optimizacija svih radnih točaka kako bi se dobio idealan omjer snage, potrošnje goriva i emisije štetnih tvari. Sve to iznimno je kompleksan posao, a kada bi se sve to radilo eksperimentalnim putem trošak razvoja vozila bio bi mnogostruko veći. Zbog velike računalne snage i potencijala kojeg imaju računala razumno je bilo razvijati simulacijske modele koji za trošak, koji je zanemariv u usporedbi sa eksperimentalnim pristupom, mogu dati sličan rezultat koji se onda u krajnjim fazama razvoja potvrđuje eksperimentalnim putem. Tako su simulacijski paketi postali neizostavan alat u razvoju i optimizaciji vozila, a koriste se na svim pod-sklopovima današnjih vozila, od strujanja zraka u kabini, povećanja sigurnosti i udobnosti do optimizacije procesa u motorima te posljedično smanjenja goriva i štetnih emisija te iskorištavanju i probijanju granica kada su u pitanju performanse.
Proces izgaranja imperativ je kad je u pitanju optimizacija jer o njemu ovisi snaga koju motor razvija, emisije štetnih tvari i potrošnja goriva, a budući da izgaranje započinje preskakanjem iskre, dobro poznavanje i optimiranje tog fenomena također je neophodno. Nakon preskakanja iskre, izgaranje ne započinje trenutno već slijedi zakašnjenje paljenja u kojem se formira jezgra plamena. U ovom radu analizirati ćemo fizikalno zakašnjenje paljenja koristeći se simulacijskim modelom i eksperimentalnim podacima. Promatrani motor je Ottov četverotaktni motor radne zapremnine 1.4 L (16V) talijanskog proizvođača Fiat.

Cilj ovoga rada je izraditi simulacijski model promatranog motora u simulacijskom paketu AVL BOOST^{TM} te pomoću kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena, koji je pod-model kvazi-dimenzijskog modela izgaranja, izračunati fizikalno zakašnjenje paljenja za dvanaest promatranih radnih točaka. Nakon toga potrebno je usporediti rezultate dobivene simulacijskim modelom sa rezultatima eksperimenta i kvantificirati pogreške.

2. OPIS SIMULACIJSKOG PAKETA

Numeričke simulacije koje se koriste za opis procesa unutar motora možemo podijeliti, s obzirom na stupanj složenosti i razinu detalja, na:

- CFD simulacijske pakete,
- Real Time modeli,
- 1-D/0-D modeli,

CFD (Computational Fluid Dynamics / Računalna dinamika fluida) simulacijski paketi temelje se na metodi konačnih volumena, koriste se za detaljne analize. Vremenski i numerički su jako zahtjevne upravo zbog razine detalja koje daju.
Koriste se za optimiranje i detaljne proračune, na primjer modeliranje strujanja unutar cilindra, nastrujavanja preko ventila, prijenosa topline i općenito za pojave o kojima ovisi izgaranje.

Real Time modeli su najmanje detaljni, njihova prednost je što provode proračune u stvarnom vremenu pa se najčešće koriste za praćenje stanja unutar motora u stvarnom vremenu.

U našem slučaju koristili smo 1-D/0-D model jer daje idealnu kombinaciju gornja dva; dovoljnu razinu detalja uz prihvatljivo vrijeme trajanja simulacije. Ovi modeli daju mogućnost simulacije cjelokupnog sustava motora (uključujući usis i ispuh).
1-D u nazivu odnosi se na to da se u usisnim i ispušnim cijevima provodi prostorna diskretizacija, izračun protoka kroz njih zasnovan je na metodi konačnih volumena.
O-D se odnosi na prostor cilindra, njega tretiramo kao jedan kontrolni volumen i ne provodi se prostorna diskretizacija pa veličine u cilindru ovise samo o vremenu. Stoga se 0-D modeli još nazivaju i termodinamički modeli.
Termodinamički modeli izgaranja mogu se podijeliti u dvije grupe:
1. jednozonski :
    -smjesa unutar cilindra ima jednak tlak, temperaturu i sastav.
    -nedostatak ovakvih modela je što ne uzimaju u obzir propagaciju plamene fronte, geometriju prostora izgaranja, a to su vrlo bitni parametri za opis izgaranja.
2. dvozonski :
    -prostor izgaranja dijeli se na izgorenu i neizgorenu zonu koje odvaja plamena fronta.
    -tlak je jedinstven za cijeli cilindar, a dvije zone su predstavljenje kao dva zasebna termodinamička sustava, od kojih svaki ima pripadnu temperaturu i sastav.
    -za proračun se koriste prvi zakon termodinamike, jednadžba stanja i zakon održanja mase.

Posebna podvrsta dvozonskih modela su kvazi-dimenzijski modeli koji u obzir uzimaju propagaciju plamene fronte kroz neizgorenu zonu, iako se prostorna diskretizacija ne provodi. Koriste se za izračun brzine izgaranja u 0-D modelima, za proračun stanja u cilindru također

koriste termodinamičke jednadžbe, a proračun izgaranja uključuje i geometrijske veličine, npr. položaj i geometriju svjećice.

U ovom radu za opisivanje odabranog motora korišten je dvozonski 1-D/0-D model, a u drugom dijelu koristi se i kvazi-dimenzijski model izgaranja.

2.1. Odabrani motor i njegovo modeliranje u simulacijskom paketu

Odabrani motor za koji imamo eksperimentalne podatke izmjerene u laboratorijskim uvjetima je četverocilndarski Ottov motor radne zapremnine 1.4 L bez prednabijanja. Opremljen je VVT sustavom za fazni pomak usisnih i ispušnih ventila, a koristi iste vrijednosti pomaka za oba seta ventila. Gorivo se ubrizgava u usisne cijevi, a broj brizgaljki jednak je broju cilindara. Na motor je ugrađena svjećica J-gap oblika oznake NGK ZKR7A sa razmakom između elektrodi od 1 mm. U tablici [1] prikazani su osnovni podaci koji opisuju odabrani motor.

Tablica 1. Podaci odabranog motora.

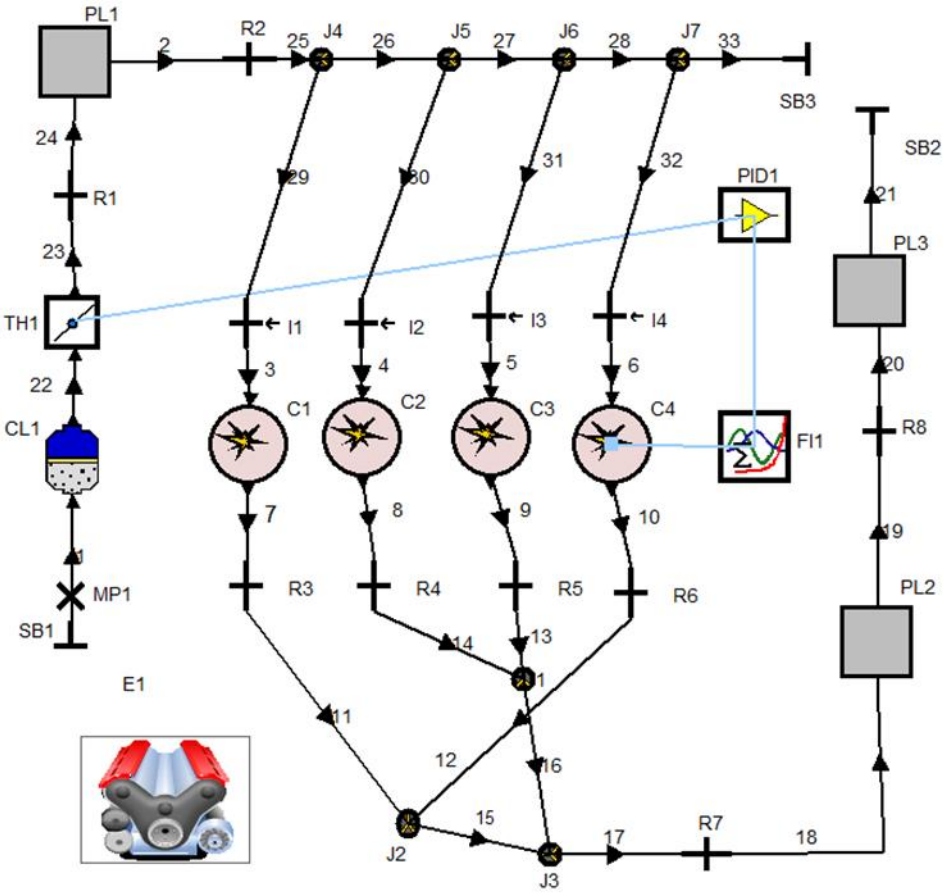
Veličina	Oznaka	Vrijednost
Broj cilindara [-]	z	4
Promjer klipa [mm]	D	72
Hod klipa [mm]	H	84
Radni volumen [cm^3]	V_H	1368
Duljina klipnjače [mm]	l	129
Kompresijski omjer [-]	ε	11
Pomak osi rotacije koljenastog vratila [mm]	e	0.5
Broj taktova [-]	T	4
Maksimalni moment [Nm]	M_e	111 (pri 3000 min^{-1})
Maksimalna snaga [kW]	P_e	51.2 (pri 5500 min^{-1})
Broj usisnih ventila po cilindru [-]	$n_{v,u}$	2
Promjer usisnog ventila [mm]	$d_{v,u}$	30.94
Broj ispušnih ventila po cilindru [-]	$n_{v,i}$	2
Promjer ispušnih ventila [mm]	$d_{v,i}$	25.4

Za 162 radne točke poznati su i brojni drugi eksperimentalni podaci koji će nam koristiti za kalibraciju simulacijskog modela poput; faktora pretička zraka, trenutka preskakanja iskre, profila tlaka u cilindru, karakteristika oslobađanja topline i ostalog.

U prvom dijelu rada zakašnjenje paljenja računat ćemo preko profila tlakova i to profila tlaka u cilindru za odabranu radnu točku i profila tlaka koji bi se ostvario u istim uvjetima kada bi

izostalo preskakanje električne iskre odnosno upaljivanje smjese. Oslobađanje topline računat će se pomoću krivulja oslobađanja topline za pripadajuću radnu točku, tzv. ROHR krivulja.

Profile tlaka ostvarenog u cilindru prilagodit ćemo da odgovaraju eksperimentalnim krivuljama tlaka pomoću SHP tlaka; tlaka koji vlada u cilindru u trenutku zatvaranja usisnih ventila. Za sve to neophodni su nam ranije spomenuti eksperimentalni podaci. Izgled simulacijskog modela kojim opisujemo odabrani motor prikazan je na slici [1].

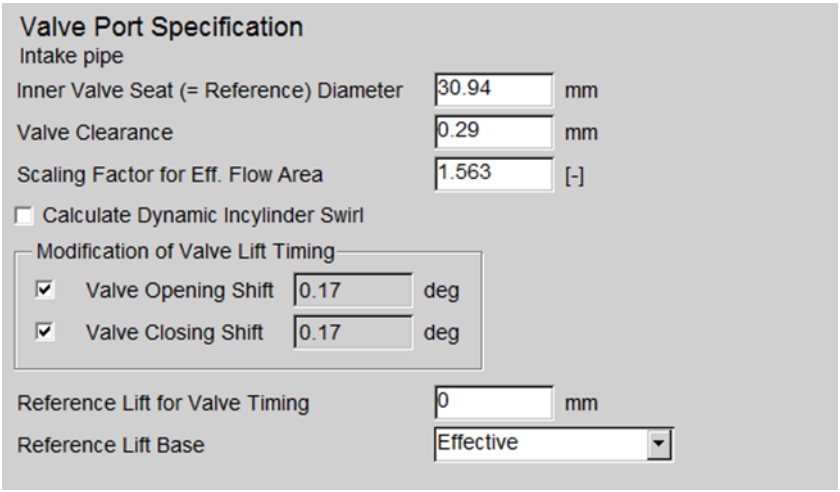


Slika 1. Simulacijski model kojim opisujemo odabrani motor.

Simulacijski model definiran je istim komponentama kao i stvarni motor uz manju razinu detalja s obzirom da je teško točno definirati sve parametre od kojih se sastoji stvarni motor. Model motora sastoji se od: filtra zraka (CL1), zaklopke snage (TH1), četiri brizgaljke goriva (I1), četiri cilindra (C1), te brojnih plenuma (PL), restriktora (R), sjecišta cijevi (J), te usisnih i ispušnih cijevi (označene brojevima 1-32). Granice sustava opisane su elementima (SB), a elementi PID i FI predstavljaju *PID Contorller* i *Formula Interpreter* koji nam služe za postizanje željenog tlaka u trenutku zatvaranja usisnih ventila.

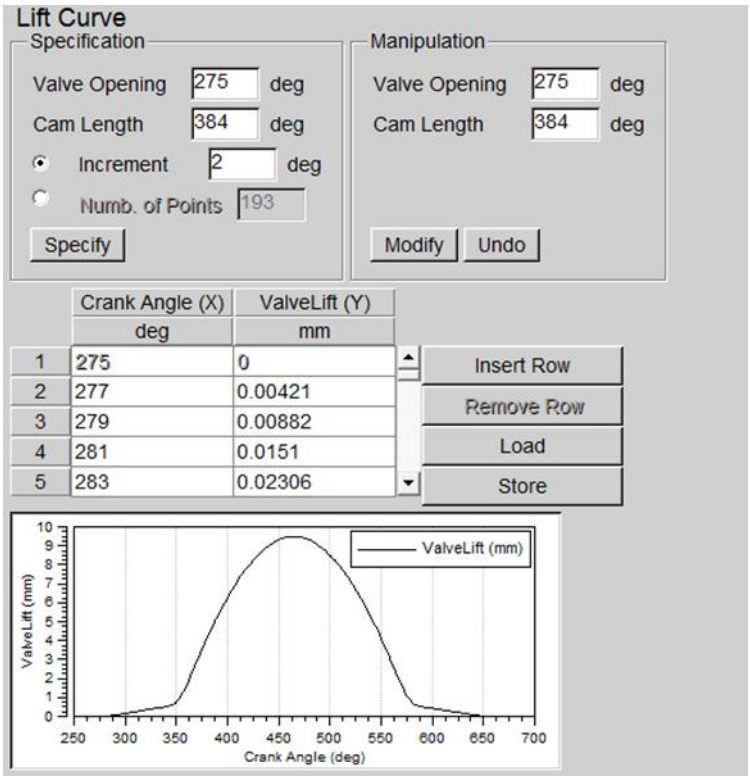
Svaki od elemenata definiran je, neki iskustveno, a neki iterativno kako bi rezultati simulacijskog modela bili što bliži eksperimentalnim rezultatima. U nastavku je pokazan način definiranja za neke najbitnije parametre.

Izmjena radnog medija kontrolira se usisnim i ispušnim ventilima, a oni su definirani u sučelju cilindra. Potrebni podaci za definiranje ventila prikazani na primjeru usisnih ventila. Slika [2] prikazuje kako je definiran promjer ventila, njegova zračnost, pomak faze i ostale vrijednosti.



Slika 2. Definiranje vrijednosti za usisne ventile.

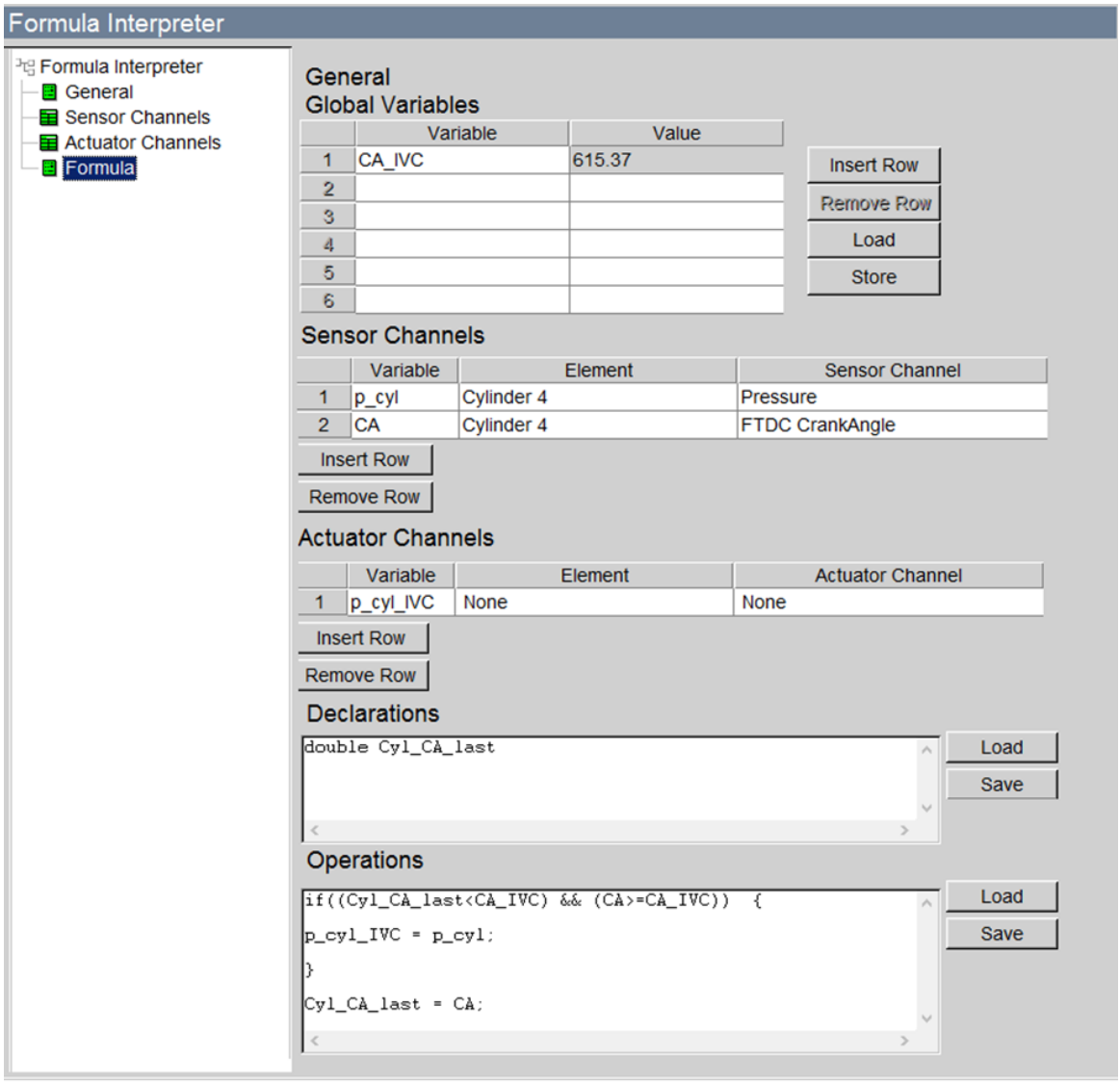
Vrijednost VVT-a postavljena je kao globalni parametar koji je onda dodan u *case explorer* gdje su mu dodijeljene vrijednosti za pripadajuće radne točke. Podizaj ventila unesen je prema dostupnim podacima za stvarni motor te je definiran trenutak otvaranja i trajanje otvorenosti ventila. To je pokazano na slici [3].



Slika 3. Definiranje podizaja usisnih ventila.

Identičan postupak proveden je i za ispušne ventile sa vrijednostima svojstvenima za njih. Vrijednost VVT-a opisana je istim globalnim parametrom budući da je fazni pomak ventila jednak i za ispušne i za usisne ventile.
Još ćemo pokazati kako su definirani *PID Controller* i *Formula Interpreter* koji nam služe da postignemo pravilne vrijednosti tlaka u trenutku zatvaranja usisnih ventila (SHP tlak). *Formula Interpreter* postavljen je na cilindar 4 i mjeri kolika je vrijednost tlaka u cilindru za trenutni kut zakreta koljenastog vratila. Željeni tlak definiran je kao globalni parametar i dodane su mu odgovarajuće vrijednosti u *case exploreru* , a isto je učinjeno sa trenutkom zatvaranja usisnih ventila (kutom zakreta koljenastog vratila u tom trenutku). PID *controler* uzima te podatke te regulira zaklopku snage kako bi se ostvarile željenje vrijednosti.

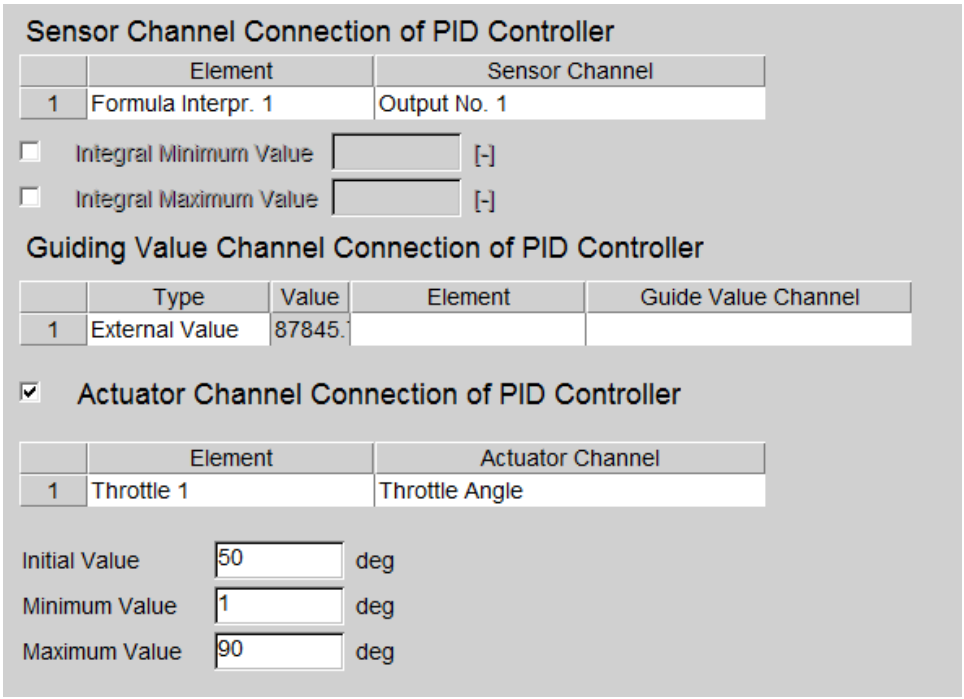
Na slici [4] prikazane su vrijednosti kojima je definiran *Formula interpreter*.



Slika 4. Postavke *Formula Interpretera*.

Vidimo da je u ovome sučelju kut zakreta koljenastog vratila definiran kao globalni parametar. Pod *Sensor Channels* vidimo vrijednosti koje *Formula Interpreter* prati, tlak u cilindru i kut zakreta koljenastog vratila.

Slika [5] prikazuje kako je definiran *PID Controller*.



Slika 5. Postavke *PID Contorllera*.

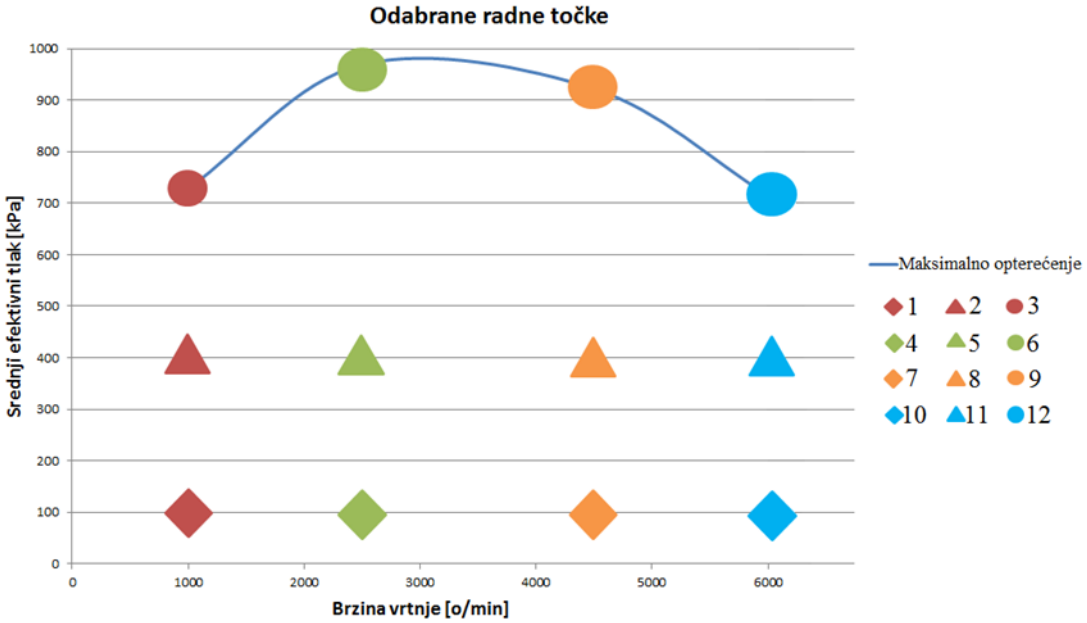
Globalni parametar postavljen u *PID Controleru* je vrijednost SHP tlaka, tlaka koji vlada u cilindru u trenutku zatvaranja usisnih ventila.
Nakon što smo definirali sve elemente, što ovdje nećemo navoditi jer bi zauzelo previše mjesta, možemo krenuti u izračun traženih vrijednosti. Proračun ćemo najprije detaljno provesti za 12 točaka, a u posljednjem poglavlju nakon što pravilno postavimo kvazi-dimenzijski model provest ćemo simulaciju zakašnjenja za sve 162 točke.

3. ODABIR RADNIH TOČAKA

Izračun zakašnjenja paljenja provest ćemo za dvanaest radnih točaka motora. Radne točke definirane su veličinom srednjeg efektivnog tlaka i brzinom vrtnje, a odabrali smo tri različite razine opterećenja; maksimalno, te ona pri kojima je srednji efektivni tlak 400 kPa i 100 kPa i četiri brzine vrtnje motora; 1000, 2500, 4500 i 6000 okretaja u minuti.
Odabrane točke prikazane su u tablici [2] i na slici [6] koja predstavlja radno područje motora.

Tablica 2. Radne točke

Radna točka	Brzina vrtnje [o/min]	Srednji efektivni tlak [kPa]
1	1000	100
2	1000	400
3	1000	728
4	2500	100
5	2500	400
6	2500	969
7	4500	100
8	4500	400
9	4500	922
10	6000	100
11	6000	400
12	6000	715



Slika 6. Odabrane radne točke.

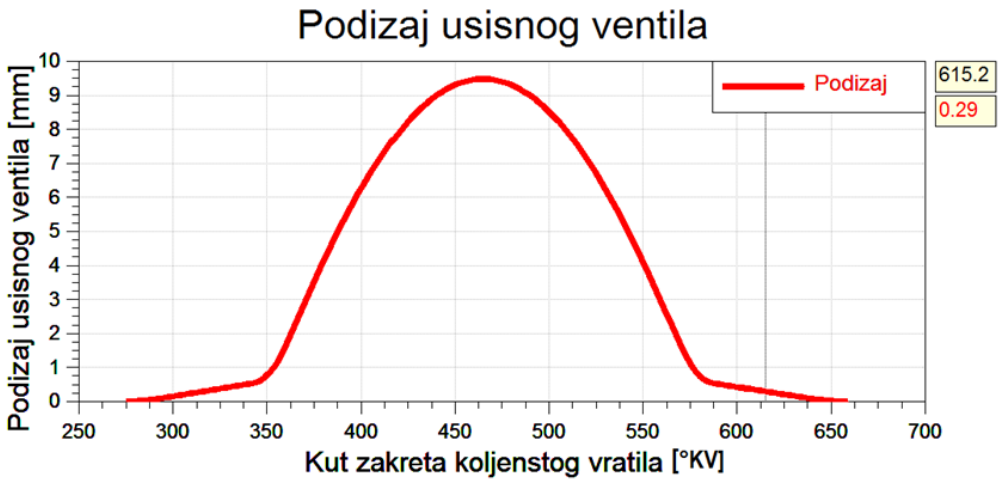
Pošto zakašnjenje paljenja određujemo iz profila tlaka u cilindru najvažnije je da on bude što precizniji i da se ostvari dobro poklapanje sa profilom tlaka kojeg smo dobili eksperimentalnim putem. To ćemo postići ako je u trenutku zatvaranja usisnih ventila u cilindru postignut odgovarajući tlak i ako je smjesa u cilindru odgovarajućeg sastava; ako je omjer zraka i goriva u cilindru jednak onome u eksperimentalnim podacima. To znači da ćemo za kalibraciju promatrati dva parametra:

-Tlak u cilindru u trenutku zatvaranja usisnih ventila ili skraćeno ***SHP tlak***.

-Omjer goriva i zraka u cilindru, u daljnjem tekstu pojednostavljeno ***A/F Ratio***.

3.1. SHP tlak

Da bismo znali koliki je SHP tlak (Start of High Pressure) moramo znati u kojem trenutku počinje kompresija smjese u cilindru odnosno kada se zatvaraju usisni ventili cilindra. Usisni ventil zatvara se na 615.2 stupnja zakreta koljenastog vratila, a podizaj usisnog ventila prikazan je na slici [7] . Iz dijagrama podizaja ventila vidimo da je zračnost ventila 0.29 mm.



Slika 7. Profil podizaja usisnog ventila.

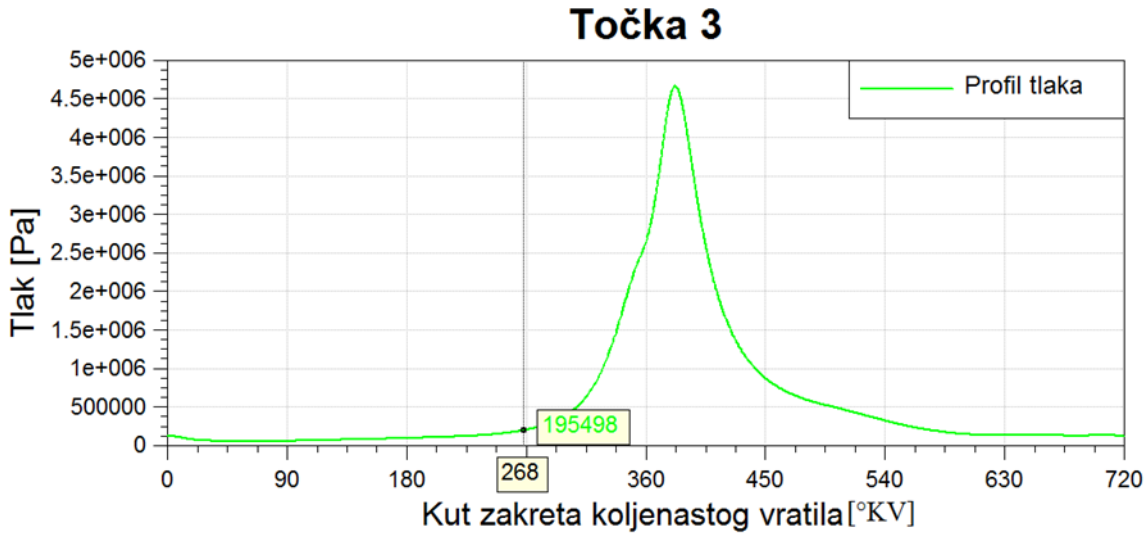
Vrijednosti zakreta koljenastog vratila na kojoj se zatvara usisni ventil treba treba pribrojiti i odgovarajuću vrijednost faznog pomaka razvodnog mehanizma zato što je motor opremljen VVT (Variable Valve Timing) sustavom. Isti iznos faznog pomaka primijenjen je i za usisne i ispušne ventile, tj. usisnu i ispušnu bregastu osovinu.

Postupak određivanja tlaka u trenutku početka kompresije smjese (trenutak zatvaranja usisnih ventila) pokazat ćemo za točku u kojoj je maksimalno opterećenje i brzina vrtnje 4500 o/min. Vrijednosti za tu točku dane su u tablici [3] .

Tablica 3. Vrijednosti za točku 3

Brzina vrtnje [o/min]	BMEP [kPa]	Vrijednost VVT [°KV]	Kut zatvaranja usisnih ventila [°KV]
4500	922	12,01	268

Sada znamo pri kojem kutu zakreta koljenastog vratila počinje kompresija smjese za tu točku. Iz profila tlaka snimljenog u eksperimentu možemo očitati koliki je tlak u cilindru u trenutku zatvaranja usisnih ventila. Na slici [8] prikazan je profil tlaka u cilindru na kojem vidimo da je vrijednost *SHP tlaka* 195 498,67 Pa.



Slika 8. Profil tlaka u cilindru za točku 3.

Isti postupak proveli smo kako bi odredili SHP tlak u svih dvanaest točaka, a rezultati su prikazani u tablicama [4], [5] i [6].

Tablica 4. Tlak u SHP-u za maksimalno opterećenje.

Radna točka	Vrijednost VVT [°KV]	Zatvaranje usisnih ventila [°KV]	SHP tlak [Pa]
3	0,09	256	143 231,59 Pa
6	3	259	165 356,08 Pa
9	12,01	268	195 498,67 Pa
12	17,03	273	185 977,14 Pa

Tablica 5. Tlak u SHP-u za 400 kPa.

Radna točka	Vrijednost VVT [°KV]	Zatvaranje usisnih ventila [°KV]	SHP tlak [Pa]
2	0,17	256	87 845,75 Pa
5	40,07	296	170 406,7 Pa
8	23,08	279	137 691,08 Pa
11	17,81	273	122 115,6 Pa

Tablica 6. Tlak u SHP-u za 100 kPa.

Radna točka	Vrijednost VVT [°KV]	Zatvaranje usisnih ventila [°KV]	SHP tlak [Pa]
1	0,22	256	45 769,89 Pa
4	27,68	283	66 756,13 Pa
7	44,15	300	131 733,11 Pa
10	38,27	294	117 356,51 Pa

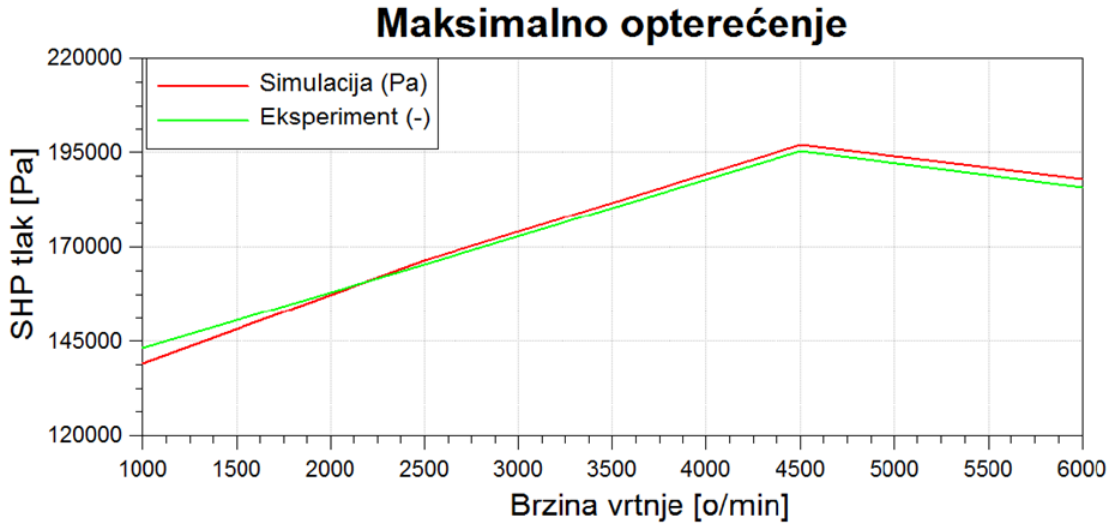
Sad kada znamo u kojem trenutku treba biti koliki tlak u cilindru u simulacijskom modelu postavljamo globalne parametre CA_SHP i p_SHP . Njih ćemo postaviti u *case explorer* te mijenjati njihove vrijednosti da odgovaraju odabranim radnim točkama. Na slici [9] prikazan je *case explorer* za slučaj maksimalnog opterećenja.

max_ opt.	Brzina_vrtnje	A/F Ratio	VVT_intake	CA_SHP	p_SHP	ROHR_file
	rpm	[-]	deg	deg	Pa	
0479-10	1000	13.709	0.09	=615.2+VVT_intake	1.4323159e+005	c:\Users\data\0479_1000_728_ROHR.dat
0511-25	2500	13.537	3	=615.2+VVT_intake	1.6535608e+005	c:\Users\data\0511_2500_969_ROHR.dat
0577-45	4500	12.679	12.01	=615.2+VVT_intake	1.9549867e+005	c:\Users\data\0577_4500_922_ROHR.dat
0632-60	6000	11.491	17.03	=615.2+VVT_intake	1.8597714e+005	c:\Users\data\0632_6000_715_ROHR.dat

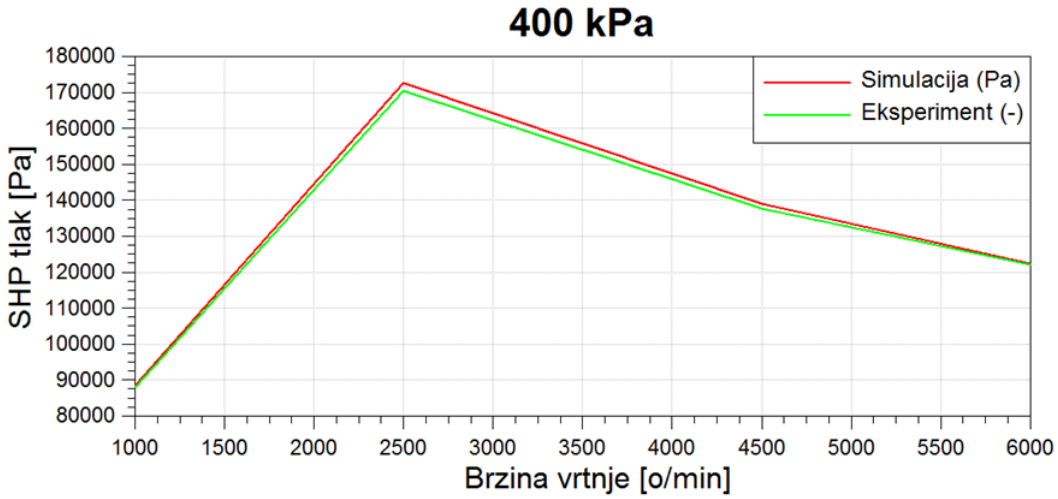
Slika 9. *Case explorer* za slučaj maksimalnog opterećenja.

Tako definirane globalne parametre stavljamo u *PID contorller* koji pomoću vrijednosti koji dobiva preko *Formula interpretera* prilagođava kut zaklopke kako bi se dobile gore navedene vrijednosti tlaka u trenutku zatvaranja usisnih ventila.

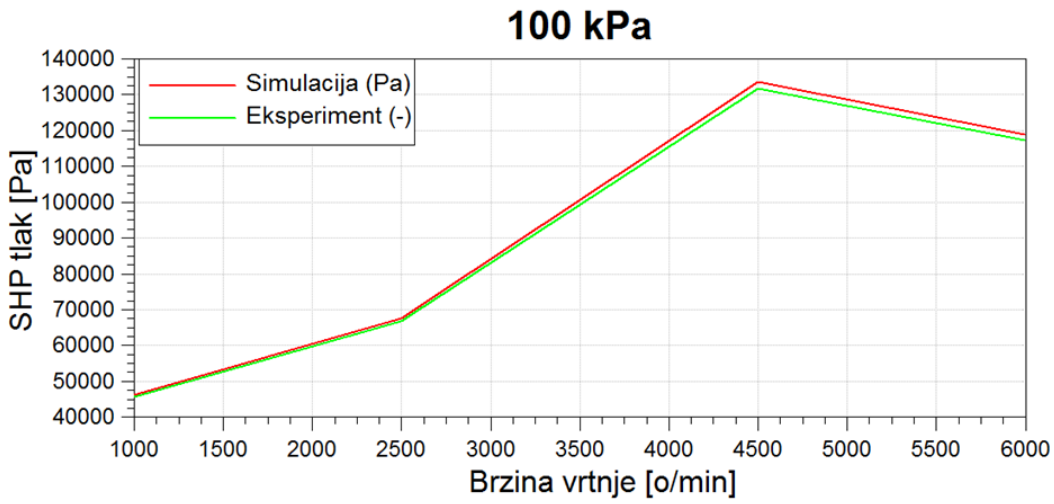
Simulacijom nije moguće dobiti savršeno poklapanje s eksperimentom, ali su vrijednosti zadovoljavajuće. Rezultati tlaka u trenutku zatvaranja usisni ventila dobiveni u simulaciji i njihova usporedba s eksperimentalnim podacima prikazani su na sljedećim slikama.



Slika 10. Vrijednosti SHP tlaka za slučaj maksimalnog opterećenja.



Slika 11. Vrijednosti SHP tlaka za slučaj opterećenja od 400 kPa.

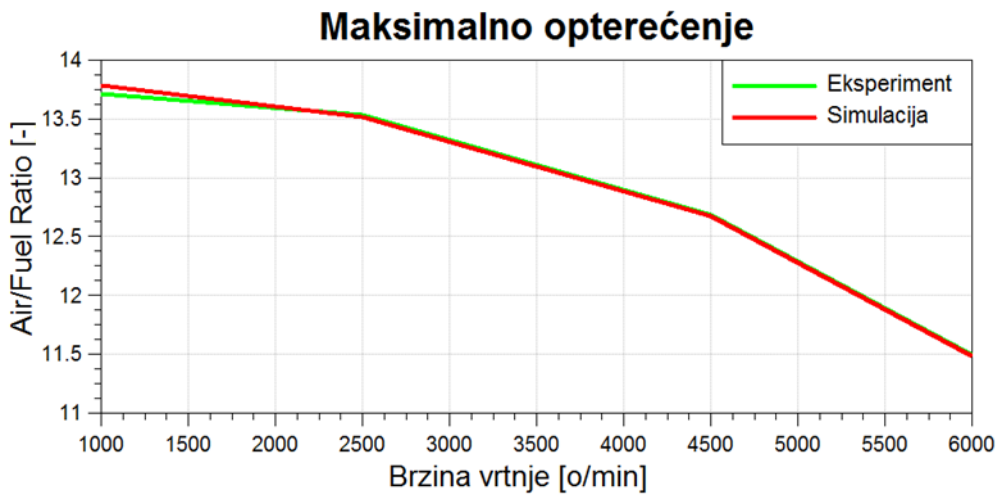


Slika 12. Vrijednost SHP tlaka za slučaj opterećenja od 100 kPa.

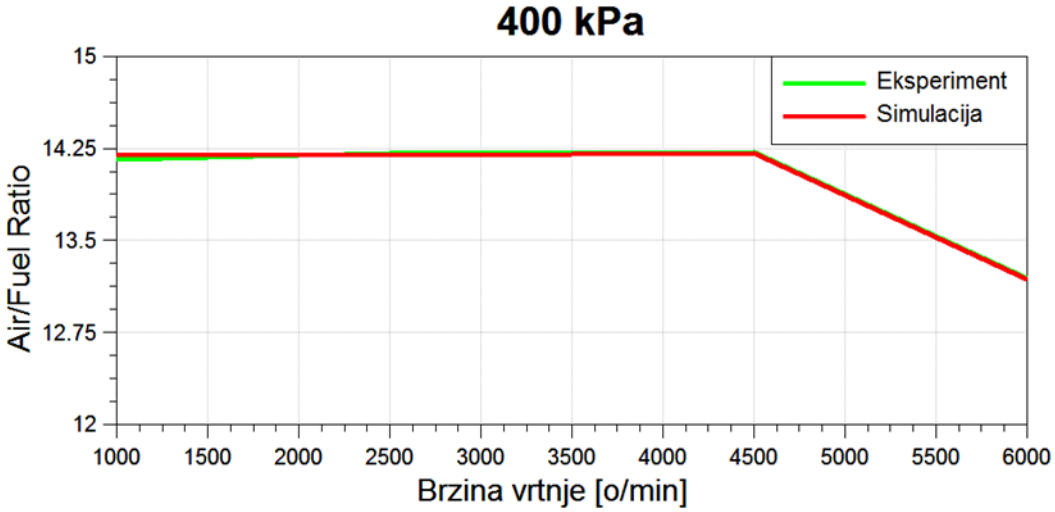
Svi slučajevi su konvergirali u konačni rezultat, a prosječni broj ciklusa potrebnih da bi se postigla potpuna konvergencija je 50.

3.2. Sastav smjese

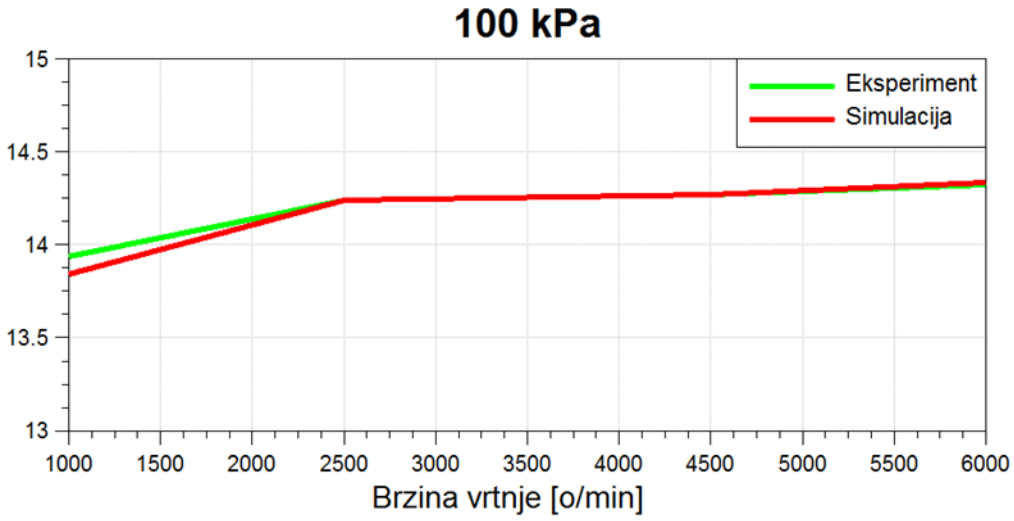
Druga važna veličina za opisivanje stanja u cilindru je sastav smjese, odnosno omjer goriva i zraka ili jednostavnije A/F ratio. Ovaj omjer također je definiran kao globalni parametar te je dodan u *case explorer* gdje je svakoj radnoj točki pridružena odgovarajuća vrijednost. Taj globalni parametar postavljen je na injektore te na sve točke u kojima je svježa radna smjesa kao podatak za inicijalizaciju vrijednosti. Na sljedećim slikama prikazane su vrijednosti omjera goriva i zraka postignute za pojedina opterećenja te njihova usporedba sa eksperimentalnim vrijednostima.



Slika 13. Omjer goriva i zraka za slučaj maksimalnog opterećenja.



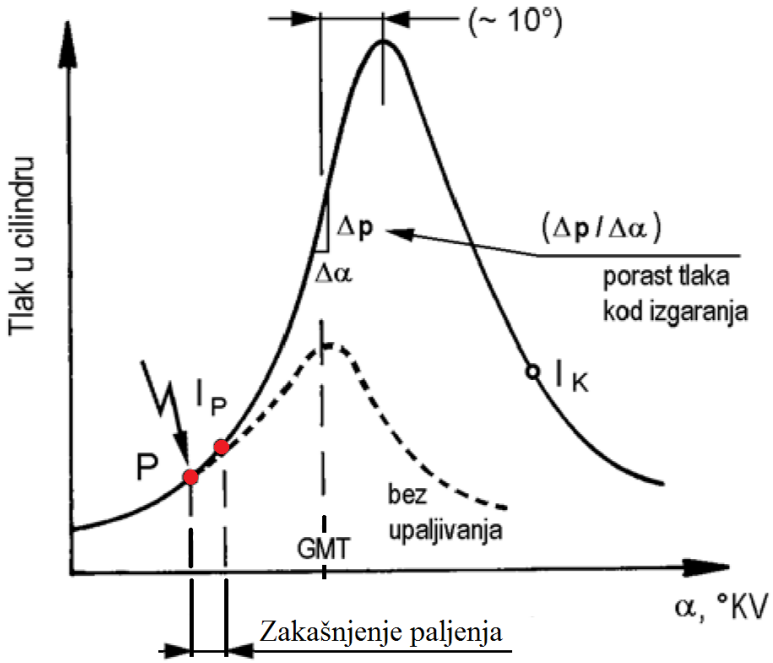
Slika 14. Omjer goriva i zraka za slučaj opterećenja od 400 kPa.



Slika 15. Omjer goriva i zraka za slučaj opterećenja od 100 kPa.

4. ODREĐIVANJE ZAKAŠNJENJA PALJENJA

Proces izgaranja potrebno je što je moguće više optimirati jer o njemu ovisi snaga koju motor razvija, emisije štetnih tvari i potrošnja goriva. U prošlosti nije bilo mogućne detaljno pratiti procese unutar cilindra za vrijeme izgaranja, a glavni izvor informacija bio je zabilježeni profil tlaka koji se onda nastojao optimirati.
Danas zahvaljujući modernim tehnologijama možemo iznimno detaljno znati što se događa u cilindru u svakome trenutku , te možemo modelirati i optimirati širok spektar parametara kao što su strujanje smjese u cilindru, razinu turbulencije, prijelaz topline, stvaranje i rast jezgre plamena i ostalo. Ipak i dalje profil tlaka u cilindru ostaje polazište i temelj svake optimizacije u cilindru, a to je slučaj i u ovome radu.
Zakašnjenje paljenja odredit ćemo iz profila tlaka u cilindru i to uspoređujući profil tlaka koji se u cilindru ostvaruje u ranije definiranim radnim točkama i profila tlaka koji bi se ostvario u istim uvjetima kad bi izostalo preskakanje iskre, odnosno izgaranje. Orijentacijski izgled profila tlakova za takva dva slučaja dan je na slici [16].

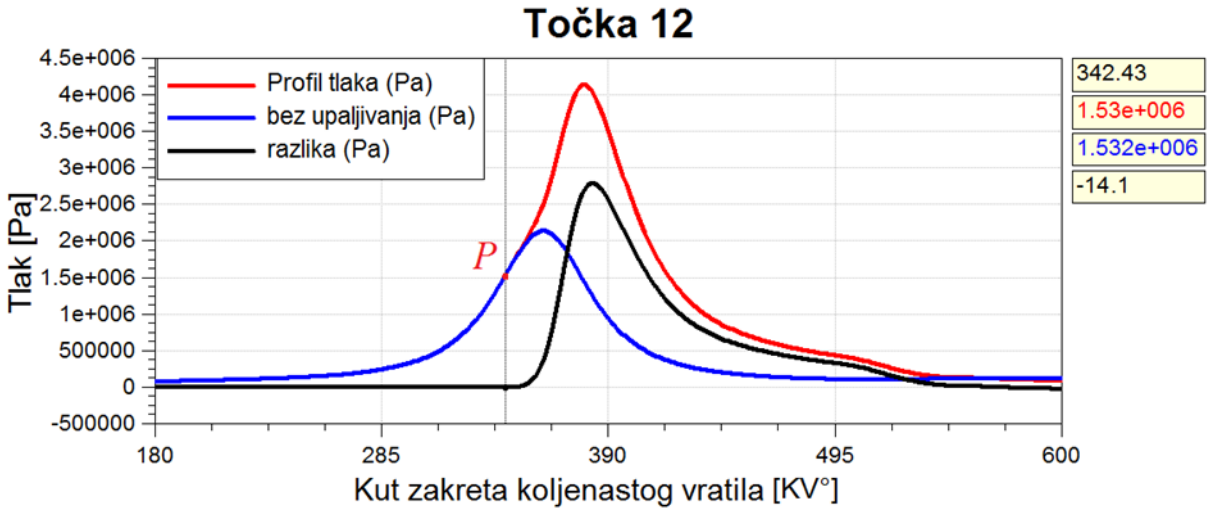


Slika 16. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora [4].

Upaljivanje gorive smjese električnom iskrom predstavlja točka *P* . Početak izgaranja označen je sa *Ip* , a kraj izgaranja sa I_K. Period između upaljivanja smjese (preskakanja iskre na svjećici) i početka izgaranja nazivamo zakašnjenje paljenja. Preskakanjem iskre na svjećici (točka *P*) upali se samo smjesa u neposrednoj blizini svjećice te se formira jezgra plamena od koje zatim postupno kreće izgaranje.
Iskustveno znamo da je indicirani rad procesa najveći ako je težište izgaranja (točka do koje je izgorjelo 50 % goriva unesenog u proces) oko 10°KV iza GMT.

Težište izgaranja izravno ovisi o trenutku početka izgaranja i to je još jedan razlog važnosti optimiranja početka i procesa izgaranja.

Period koji protekne od preskakanja iskre na svjećici do zamjetnog povećanja u profilu tlaka u odnosu na slučaj kada bi izostalo paljenje predstavlja zakašnjenje paljenja.
Za uvjet zamjetnog povećanja u profilu tlaka uzet ćemo razliku od 10 000 Pa između profila tlaka u cilindru ostvarenog u radnoj točki i profila tlaka koji bi nastao pri istim uvjetima kada bi izostalo izgaranje. Na slici [17] prikazani su ranije spomenuti profili tlakova za točku 12 te njihova razlika iz koje ćemo preko kriterija od 10 000 Pa odrediti koliko je zakašnjenje paljenja.



Slika 17. Profili tlakova za točku 12.

Profil tlaka koji nastaje kada nema preskakanja iskre određen je isključivo kompresijom smjese kao posljedica gibanja klipa. Najveći tlak u tom slučaju postiže se u GMT. Na slici [17] slovom *P* prikazan je trenutak u kojoj se događa preskakanje iskre, a to je za promatranu točku 12 na 342.43 stupnja zakreta koljenastog vratila. Prije tog trenutka profili tlaka su jednaki, nedugo nakon toga može se primijetiti porast profila tlaka koji je posljedica dodatnog oslobađanja topline uslijed izgaranja.
Iznos zakašnjenja paljenja odredit ćemo tako što ćemo na krivulji koja predstavlja razliku stvarnog profila tlaka i profila koji nastaje bez upaljivanja pronaći kut zakreta koljenastog vratila na kojem tlak iznosi 10 000 Pa. Taj postupak za točku 12 prikazan je na slici [18].



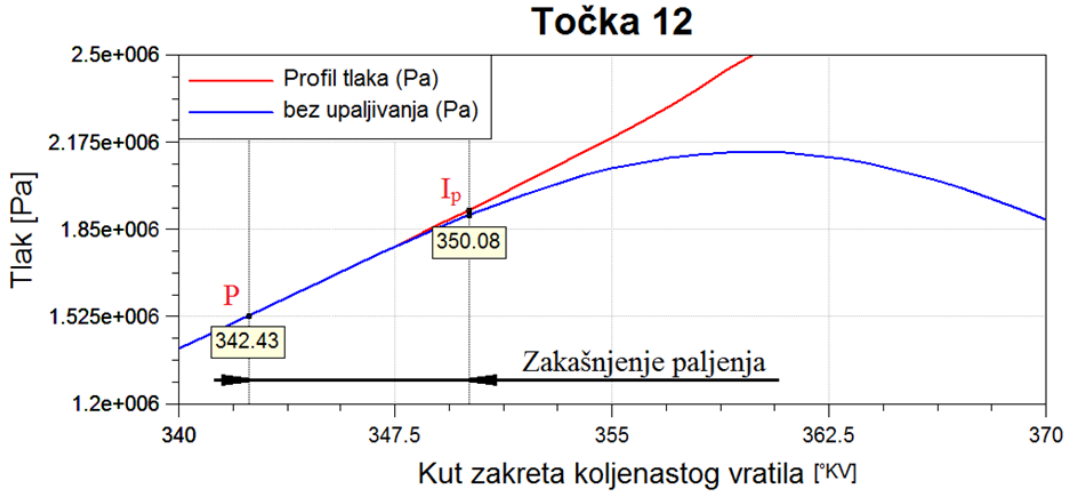
Slika 18. Određivanje zakašnjenja paljenja za točku 12.

Pomakom kursora za očitavanje vrijednosti krivulje nalazimo da se vrijednost od 10 000 Pa u razlici tlakova nalazi na kutu zakreta koljenastog vratila od 350.08 stupnjeva. Zakašnjenje paljenja dobit ćemo ako oduzmemo od kuta na kojem je primjetan porast tlaka kut na kojem preskače iskra, a za točku 12 ono iznosi:

$$\alpha_{ZP} = \alpha_P - \alpha_{I_P} = 350.08 - 342.43 = 7.65\ [°\text{KV}] \quad \textbf{(1)}$$

gdje je :
α_{ZP}- zakašnjenje paljenja izraženo u kutovima zakreta koljenastog vratila.
α_P- kut zakreta koljenastog vratila pri kojem preskače iskra na svjećici.
α_{I_P}- kut zakreta koljenastog vratila pri kojem je zabilježen porast tlaka od 10 000 Pa.

Slika [19] uvećano prikazuje stanje profila tlakova u točki preskakanja iskre (označeno sa P) i neposredno nakon te je označena točka u kojoj porast tlaka iznosi 10 000 Pa (označeno sa I_P).



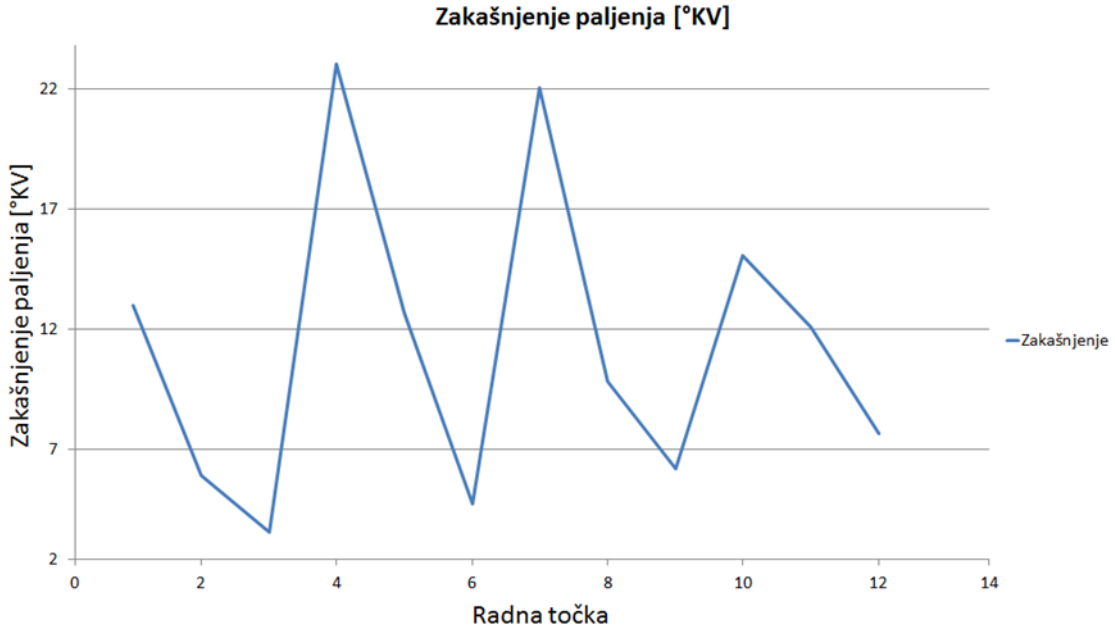
Slika 19. Detalj profila tlakova.

Isti postupak proveden je za svih dvanaest radnih točaka,a rezultati su prikazani u tablici [77].

Tablica 7. Zakašnjenje paljenja radnih točaka.

Radna točka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zakašnjenje paljenja [°KV]	13	5.89	3.55	23.1	12.6	4.73	22	9.83	6.21	15	12.1	7.65

Rezultati zakašnjenja paljenja za svih dvanaest radnih točaka prikazani su grafički na slici [20].

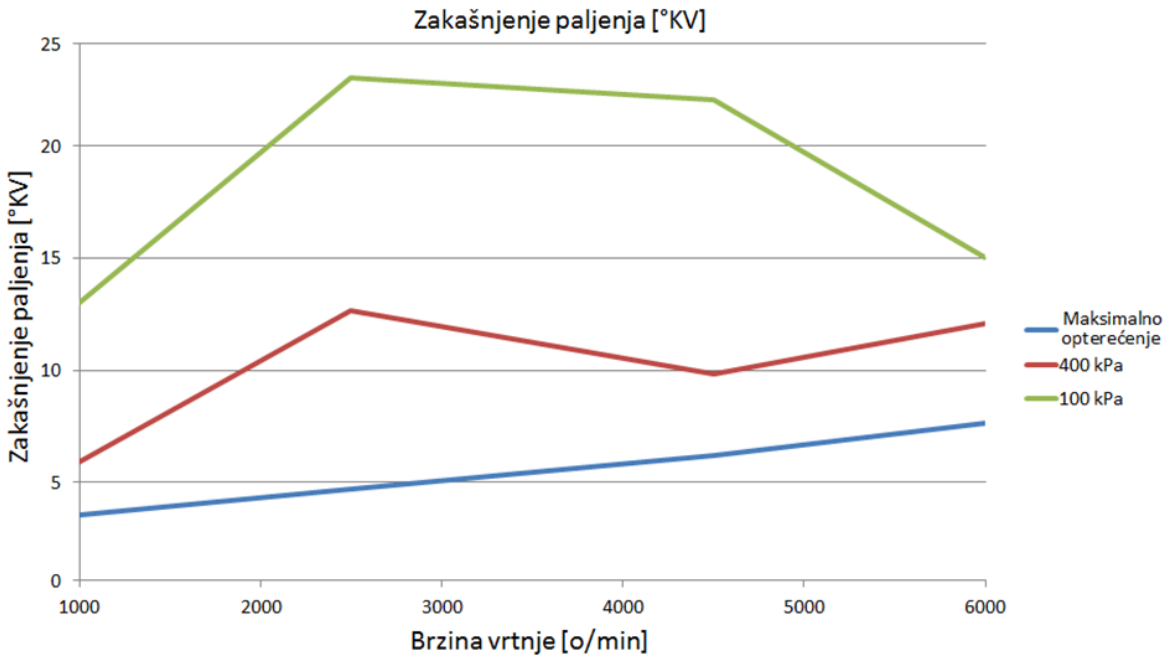


Slika 20. Zakašnjenje paljenja radnih točaka.

4.1. Analiza zakašnjenja paljenja u ovisnosti o radnim parametrima motora

Ovdje ćemo izračunato zakašnjenje paljenja prikazati u ovisnosti o opterećenju motora u pojedinim točkama i brzini vrtnje te vidjeti postoji li kakav trend.

Na slici [21] zakašnjenje paljenja prikazano je u ovisnosti o brzini vrtnje. Vidi se da je općenito za najveće opterećenje zakašnjenje izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila najmanje, te da zakašnjenje raste kako opterećenje pada.



Slika 21. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o brzini vrtnje.

Osim u kutu zakreta koljenastog vratila zakašnjenje paljenja prikazat ćemo vremenski u milisekundama. Vremensko zakašnjenje paljenja izračunavamo poznavajući za određenu točku zakašnjenje izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila te pripadajuću brzinu vrtnje motora za tu točku prema formuli:

$$t_{ZP} = \frac{\alpha_{ZP}}{\frac{n_m}{60} \cdot 2\pi}. \qquad \textbf{(2)}$$

gdje je:
t_{ZP}- zakašnjenje paljenja izraženo u sekundama,
α_{ZP}- zakašnjenje paljenja izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila,
n_m- brzina vrtnje motora u okretajima u minuti.

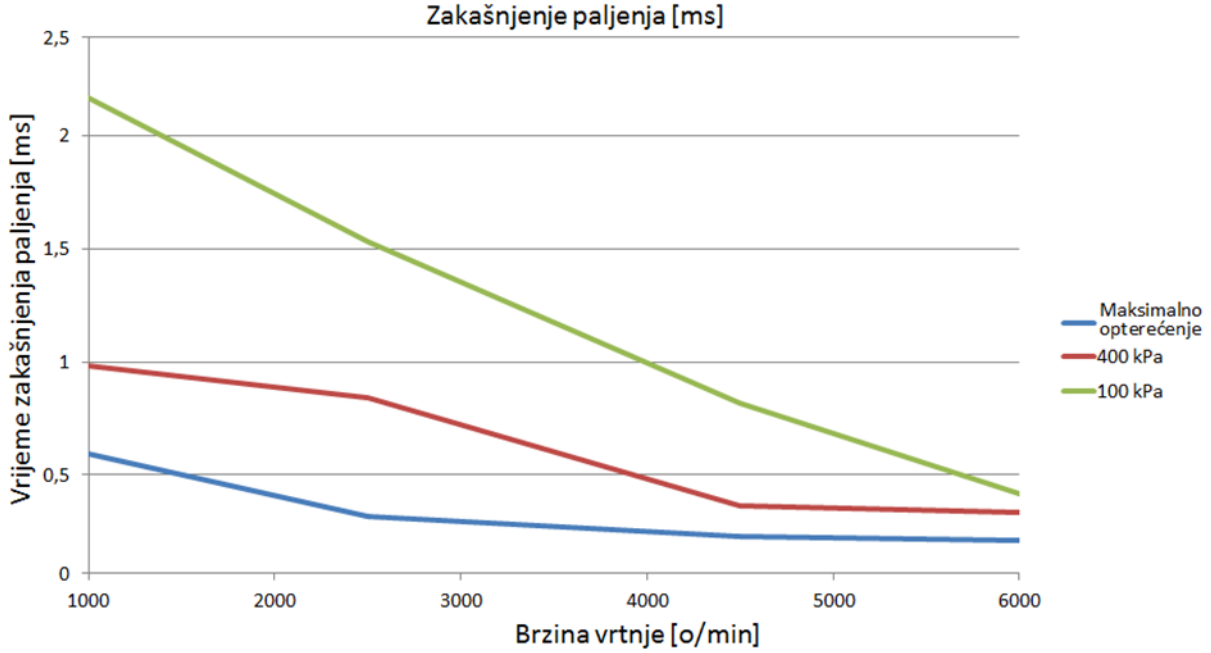
Vremensko zakašnjenje paljenja iznosom je vrlo malo pa je zgodnije izraziti ga u milisekundama, a to ćemo dobiti ako gornji izraz pomnožimo s tisuću. Izračun je proveden za svih dvanaest točaka, a vremenski iznosi zakašnjenja paljenja prikazani su u tablici [8].

Tablica 8. Zakašnjenje paljenja izraženo u milisekundama.

Radna točka	Vremensko zakašnjenje paljenja [ms]
1	2.1667
2	0.98167
3	0.59167
4	1.534
5	0.8433
6	0.31533
7	0.8167
8	0.36407
9	0.23
10	0.41778
11	0.33583
12	0.2125

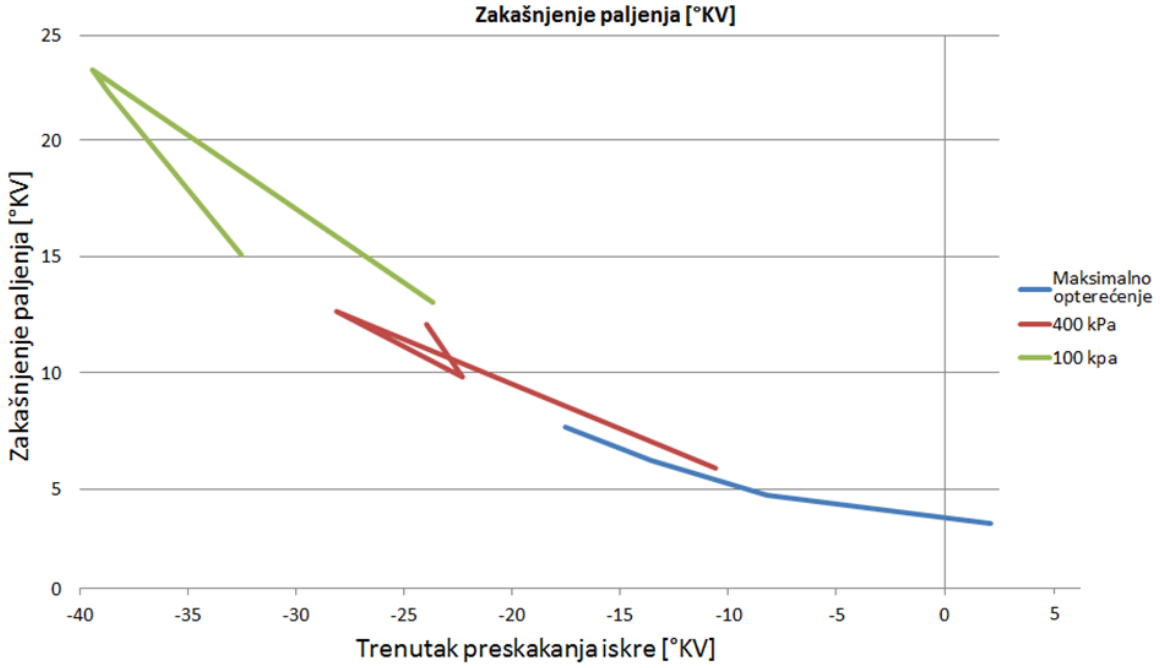
Vremensko zakašnjenje paljenja prikazano je na slici [22]. Vidimo da s porastom brzine vrtnje vremenski iznos zakašnjenja paljenja opada. Također vidimo da je za određenu brzinu vrtnje vremensko zakašnjenje paljenja najmanje za maksimalno opterećenje, a kako opterećenje pada trajanje zakašnjenja paljenja raste.

Trajanje zakašnjenja paljenja za promatrane radne točke je u rasponu od 0.2125 ms do 2.1667 ms, a u većini točaka je zakašnjenje paljenja manje od 1 ms.



Slika 22. Zakašnjenje paljenja izraženo u milisekundama.

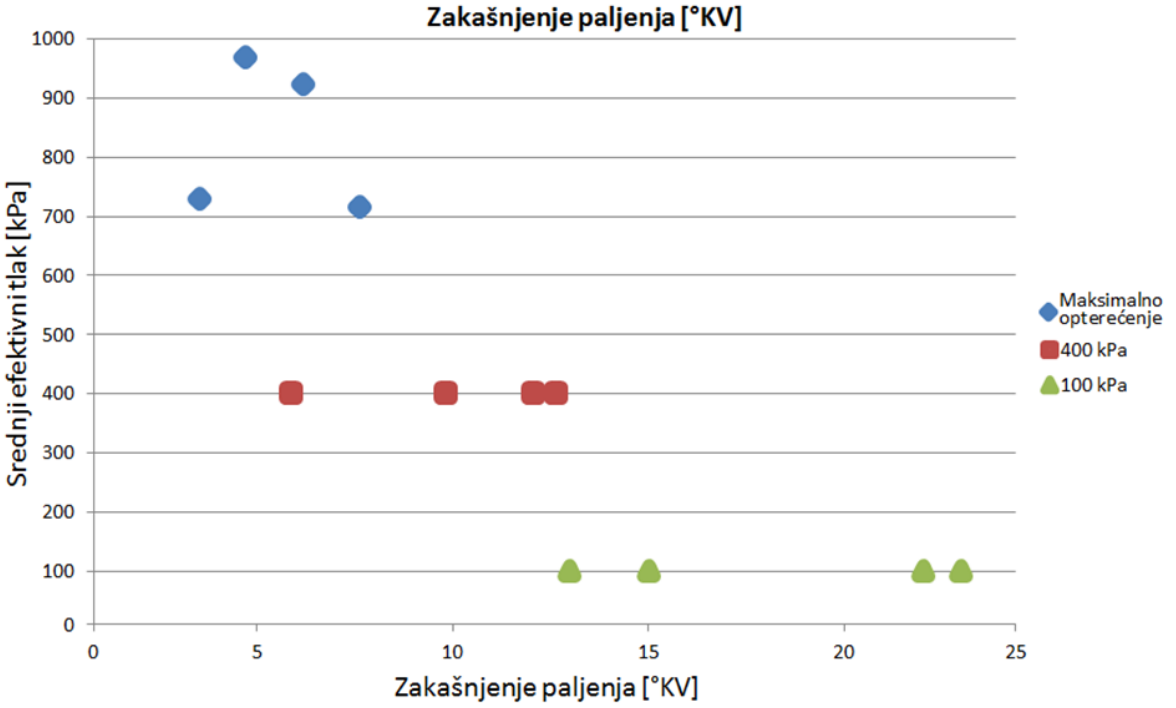
Zanimljivo je prikazati i zakašnjenje paljenja u ovisnosti o trenutku preskakanja iskre. Na slici [23] možemo vidjeti da ranijem trenutku preskakanja iskre odgovara veće zakašnjenje paljenja, a kod kasnijeg preskakanja iskre zakašnjenje paljenja je manje, uz sitna odstupanja od ovog pravila.



Slika 23. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o trenutku preskakanja iskre.

Možemo prikazati kakvo je zakašnjenje paljenja s obzirom na opterećenje motora, odnosno postignuti srednji efektivni tlak. Kao što je ranije rečeno, radne točke su prema opterećenju podijeljene u tri slučaja; maksimalno opterećenje, te opterećenja pri kojima se u zadanim brzinama vrtnje ostvaruju srednji efektivni tlakovi od 400 kPa i 100 kPa.

Na slici [24] prikazano je zakašnjenje paljenja izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila u ovisnosti o srednjem efektivnom tlaku.

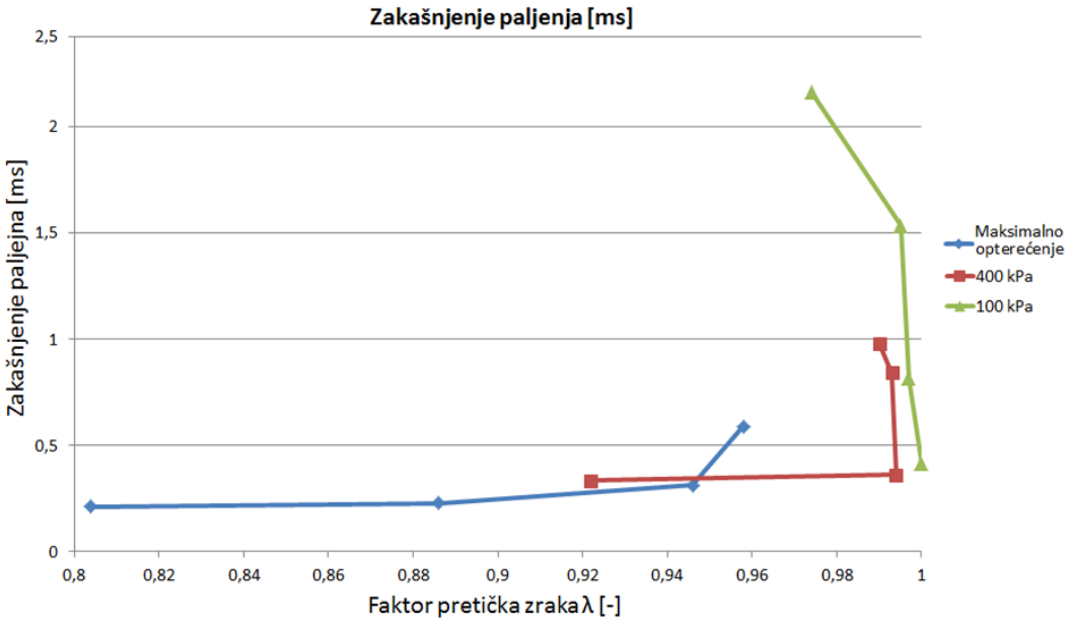


Slika 24. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o srednjem efektivnom tlaku.

Disipacija točaka je poprilična, ali možemo primijetiti da je iznos zakašnjenja paljenja za maksimalno opterećenje do 10 stupnjeva, za opterećenje od 400 kPa zakašnjenje se kreće između 5 i 15 stupnjeva, a za opterećenje od 100 kPa zakašnjenje je u rasponu između 10 i 25 stupnjeva zakreta koljenastog vratila. Drugim riječima za točke s velikim opterećenjem možemo očekivati zakašnjenje paljenja ispod 10 stupnjeva, a za točke s niskim opterećenjem zakašnjenje je veće od 10 stupnjeva zakreta koljenastog vratila.

Za očekivati je da zakašnjenje paljenja ovisi i o uvjetima koji vladaju u cilindru u trenutku preskakanja iskre. Provjerit ćemo postoji li kakva ovisnost o najbitnijim veličinama koje opisuju stanje u cilindru; tlaku, temperaturi i sastavu radne smjese.

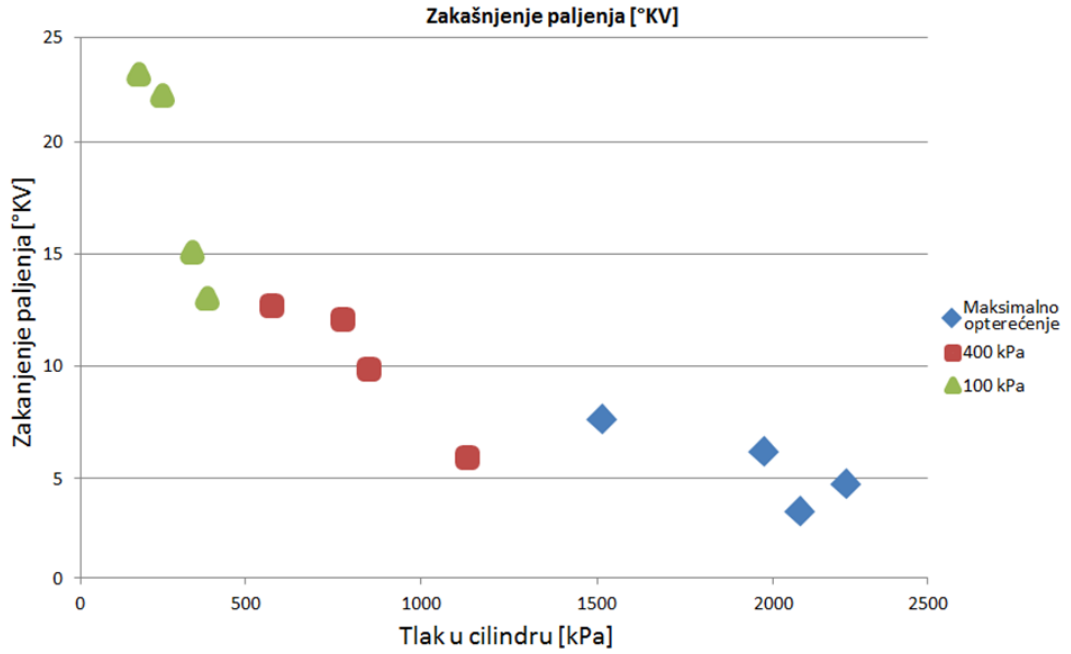
Četiri odabrane radne točke imaju maksimalno opterećenje pa za njih očekujemo bogatu radnu smjesu, odnosno faktor pretička zraka manji od 1. Budući da je odabrani motor ugrađivan s trokomponentnim katalizatorom za smanjivanje štetne emisije znamo da radna smjesa mora biti strogo stehijometrijskog omjera za pravilan rad katalizatora uz dopušteno odstupanje od ±2%. Jedina iznimka su točke pod maksimalnim opterećenjem za koje je nužna bogata smjesa. Ostale točke trebale bi dakle imati faktor pretička zraka 1. Na slici [25]. prikazano je zakašnjenje paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka.



Slika 25. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka.

Vidimo da nižim vrijednostima faktora pretička zraka odgovara malo zakašnjenje paljenja, a za faktor pretička zraka približno vrijednostima 1, zbog velike koncentracije točaka, imamo i male i velike vrijednosti zakašnjenja paljenja.

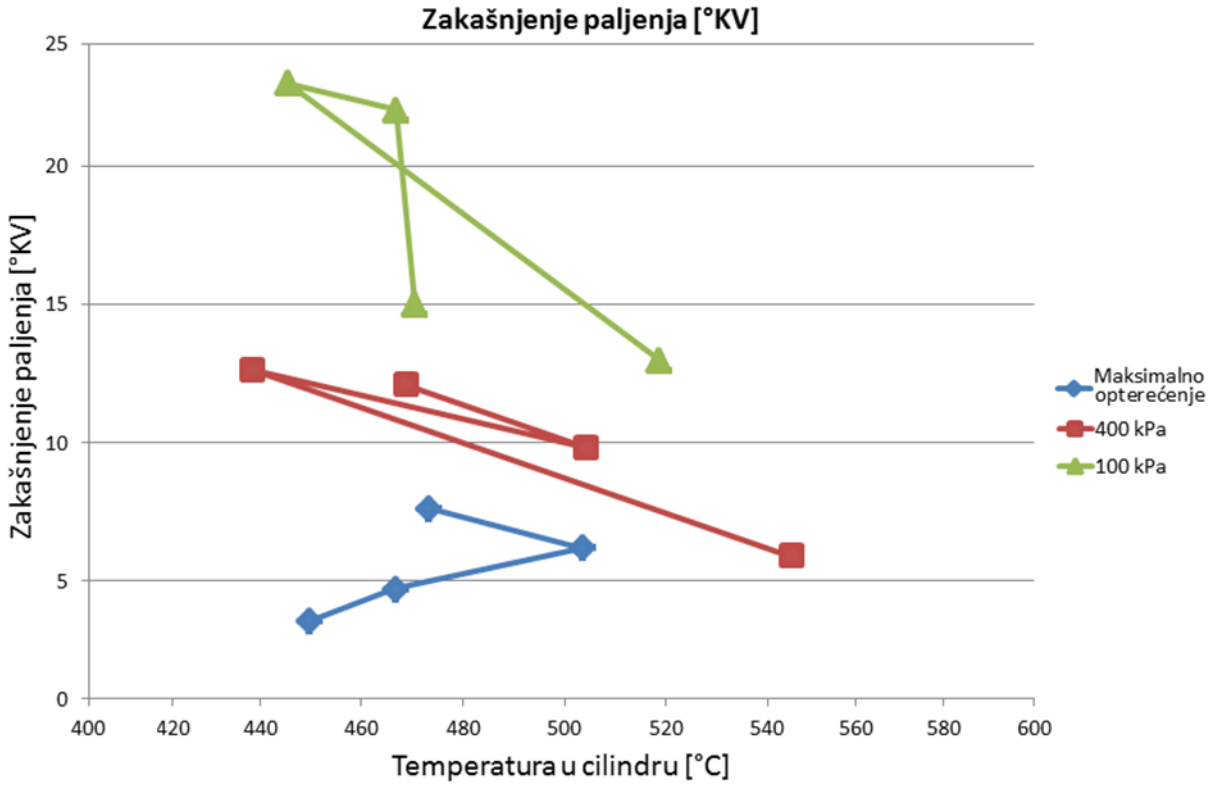
Slika [26] prikazuje ovisnost zakašnjenja paljenja o tlaku u cilindru. Tlak u cilindru zabilježen je u trenutku preskakanja iskre za pojedinu točku.



Slika 26. Ovisnost zakašnjenja paljenja o tlaku u cilindru.

Može se primijetiti da većim tlakovima pripadaju manji iznosi zakašnjenja paljenja, a kako tlak u cilindru u trenutku preskakanja iskre pada, raste iznos zakašnjenja paljenja.

Još nam ostaje prikazati postoji li ovisnost zakašnjenja paljenja o temperaturi u cilindru u trenutku preskakanja iskre. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o temperaturi u cilindru prikazano je na slici [27].



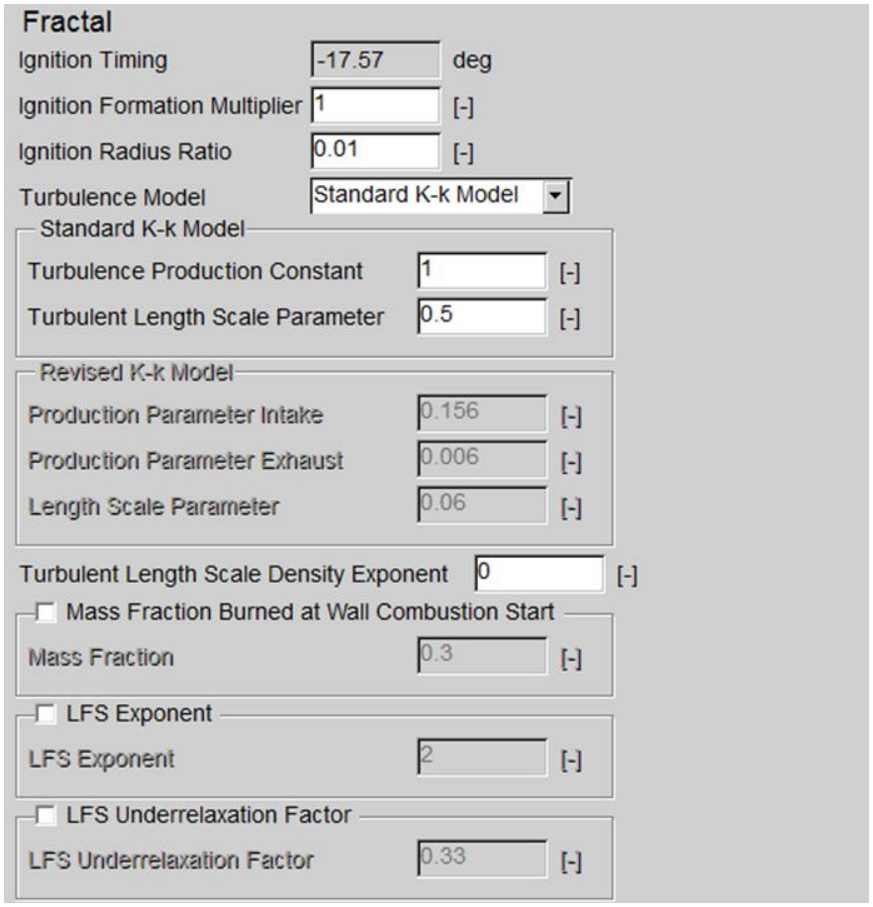
Slika 27. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o temperaturi u cilindru.

Nikakav uzorak u ovisnosti o temperaturi se ne može uočiti, razlog tome je što je temperatura u trenutku preskakanja iskre za svih 12 točaka u uskom području od 440℃ do 540℃ ,pa je koncentracija točaka prevelika da bi se očitovao neki uzorak.

5. KVAZI-DIMENZIJSKI MODEL RASTA JEZGRE PLAMENA

U ovom poglavlju za izračun zakašnjenja paljenja koristit ćemo kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena i usporedit ćemo rezultate zakašnjenja paljenja koje smo dobili na dva načina. Odredit ćemo i odstupanja u rezultatima i provesti analizu ulaznih parametara za kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena, odrediti koji set ulaznih podataka daje najbolje rezultate, te koliko promjena pojedinih parametara utječe na konačni rezultat.

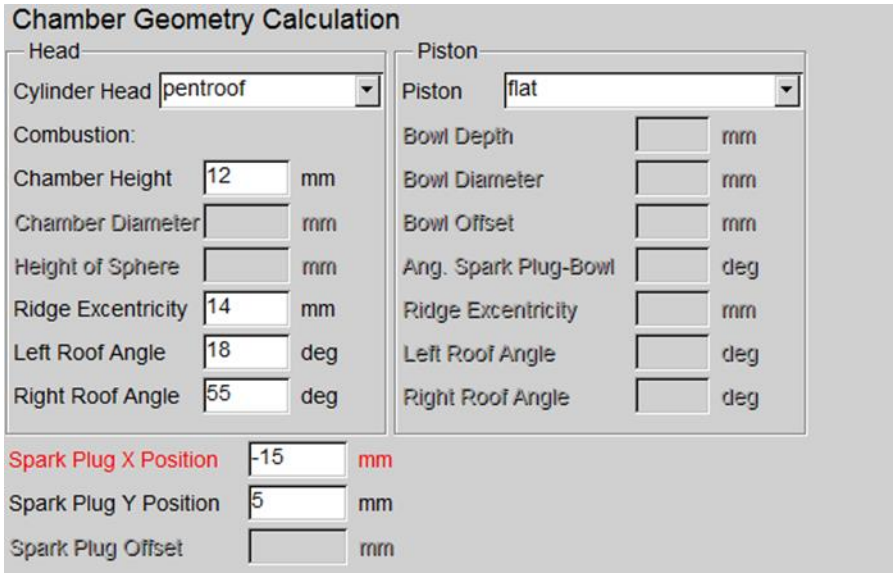
Kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena za izračun izgaranja ne može koristiti krivulje oslobađanja topline pa je izgaranje potrebno definirati drugačije. U sučelju u kojem biramo po način izračuna topline odabiremo *Fractal*, a veličine koje je potrebno definirati prikazane su na slici [28].



Slika 28. Sučelje izgaranja u kojem je izgaranje definirano po fraktalnoj teoriji.

Kao globalni parametar definiran je trenutak preskakanja iskre te je postavljen u *case explorer* i svakoj točki je dodijeljena odgovarajuća vrijednost. Također za ovakav način izračuna izgaranja potrebno je definirati prostor izgaranja.

Na slici [29] prikazano je sučelje u kojem je definirana geometrija prostora izgaranja.



Slika 29. Definiranje geometrije prostora izgaranja.

Kvazi-dimenzijski model izgaranja sastoji se od četiri pod-modela i čitavog niza parametara koje je moguće mijenjati, koji bitno utječu na konačan rezultat i koji se definiraju od strane korisnika.

Četiri pod-modela kvazi-dimenzijskog modela izgaranja su:

-model električnog strujnog kruga,

-model rasta jezgre plamena,

-model električne iskre,

-model geometrije električne svjećice.

U nastavku je dan kratak pregled pod-modela i njihovih ulaznih parametara.

5.1. Pod-model električnog kruga

Zbog pojednostavljenja promatra se samo sekundarni strujni krug , a najvažniji parametar je inicijalna energija koja se oslobađa i stvara jezgru plamena. Taj parametar je potrebno definirati od strane korisnika. Električna energija sekundarnog strujnog kruga E_S računa se prema jednadžbi:

$$\frac{dE_S(t)}{dt} = -R_S i_S^2(t) - V_{ie} i_s(t) \qquad \textbf{(3)}$$

gdje je:

R_S – otpor sekundarnog strujnog kruga [Ω] ,

V_{ie} – napon između elektrodi [V] ,

i_s – jakost struje sekundarnog strujnog kruga [A] .

Gornjom jednadžbom definirano je i trajanje izboja električne iskre, kada energija sekundarnog strujnog kruga dosegne vrijednost 0, izboj električne iskre prestaje.

5.2. Pod-model rasta jezgre plamena

U trenutku preskakanja iskre proračun rasta jezgre plamena započinje s već formiranom jezgrom plamena, a u našem slučaju to je sfera radijusa 0.5 mm koja se nalazi na polovici udaljenosti između elektrodi svjećice. Daljnji tijek rasta jezgre ovisi o probojnoj energiji koju sustav upaljivanja preda smjesi, prijelazu topline između jezgre i elektrodi, strujanju smjese u području svjećice i ostalom, a udio ovisnosti o svakom parametru ćemo analizirati u nastavku. Nakon upaljivanja, napredak rasta jezgre plamena opisuje se promjenom predane energije jezgre $\boldsymbol{E_K}$ i povećanjem mase jezgre $\boldsymbol{m_k}$:

$$\frac{dE_K}{dt} = Q_E - Q_W \quad \textbf{(4)}$$

$$\frac{dm_k}{dt} = \rho_{UZ} \cdot S_K \cdot U_{L,eff} \quad \textbf{(5)}$$

gdje je :

Q_E- dovedena električna snaga [W] ,
Q_W- gubitak topline jezgre [W] ,
ρ_{UZ} - gustoća neizgorene zone [kg/m^3] ,
S_K- slobodna površina jezgre plamena [m^2] ,
$U_{(L,eff)}$- efektivna laminarna brzina plamena [m/s] ,
m_k- predstavlja masu jezgre i jednaka je masi izgorene zone.

Inicijalna energija dovedena u sustav E_K iznosi 60% energije proboja električne iskre E_{BD} . Podsjetimo energija proboja električne iskre je ulazni parametar koji je definiran od strane korisnika. Iskustveno je određeno da se 60% posto te energije prenosi u jezgru plamena.

Značajan dio ovog pod-modela je izračun gubitka topline koja prelazi sa jezgre plamena na svjećicu. Ta toplina se računa prema izrazu:

$$Q_W = k_w \cdot S_e \cdot (T_K - T_{SP}) \quad \textbf{(6)}$$

gdje je:
k_w- koeficijent prijelaza topline [W/m2K] ,
S_e- trenutačna površina svjećice koja je u dodiru s jezgrom [m2] ,
T_K- temperatura jezgre plamena [K] ,
T_{SP}- temperatura svjećice [K] .

Od gore navedenih vrijednosti, k_w i T_{SP} su parametri koje definira korisnik. Površina svjećice u dodiru sa jezgrom plamena se izračunava na temelju trenutačne veličine i položaja jezgre plamena, a od korisnika se traži da definira geometriju svjećice. Temperaturu jezgre plamena

model računa iz jednadžbe stanja idealnog plina, poznavajući tlak, volumen, masu i individualnu plinsku konstantu izgorene zone. Izračun rasta jezgre plamena provodi se sve dok masa izgorene smjese m_k ne dosegne određenu kritičnu vrijednost. Ta masa direktno je povezana sa radijusom r_0 odnosno veličinom jezgre u tom trenutku za koju se pretpostavlja da nije više jezgra plamena nego prelazi u pravu plamenu frontu koja dalje izgara.
Radijus r_0 u kojem se prekida izračun po ovome pod-modelu je također parametar koji definira korisnik.

5.3. Pod-model električne iskre

Pravilno modeliranje duljine iskre je jako važno jer njena duljina utječe na napon među elektrodama, a time i na karakteristiku oslobađanja energije , prije svega trajanje izboja iskre.
Električna iskra modelira se pomoću marker točaka, a pozicija tih točaka u danom trenutku određena je profilom brizne smjese koja nastrujava na elektrode. Točke se opisuju Lagrangeovim česticama. U trenutku upaljivanja, inicijalni markeri raspoređeni su jednoliko po najkraćem putu između dviju elektroda (broj markera je 11), a jezgra plamena postavlja se na točku koja je u sredini.
Nakon toga se na tako pozicionirane markere primjenjuje operator brzine koji pomiče te točke u smjeru koji definira kut nastrujavanja α. Kut nastrujavanja na elektrode svjećice α još je jedan od parametara koje definira korisnik.

5.4. Pod-model geometrije svjećice

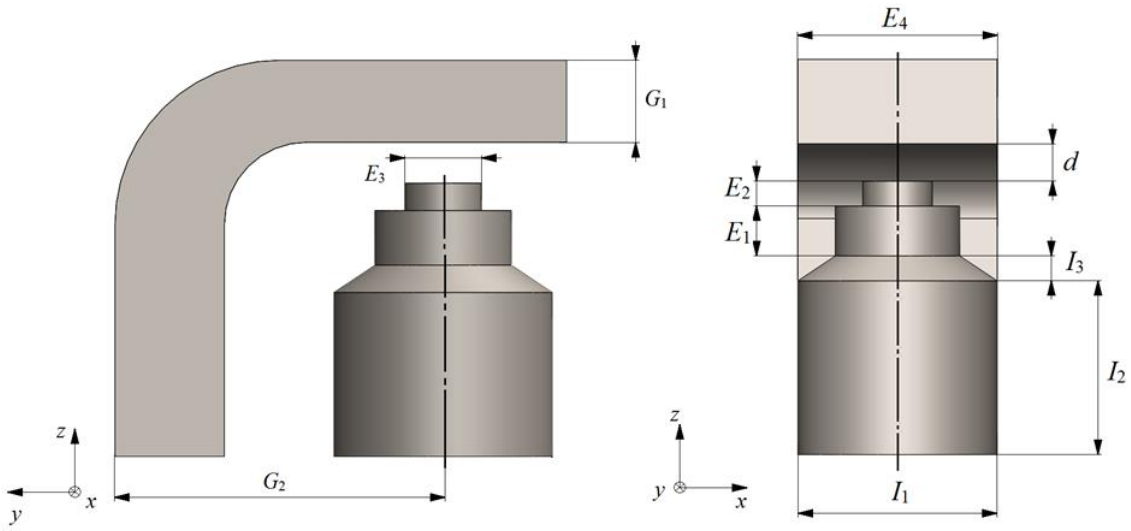
Za dobro opisivanje procesa rasta jezgre plamena iznimno je bitan gubitak topline uslijed dodira jezgre plamena i svjećice koja je znatno hladnija. Kako bi pravilno odredili količinu topline koja prelazi s jezgre plamena na svjećicu potrebno je osim temperature, veličine i položaja jezgre znati i geometriju svjećice. Poznavajući gore navedene faktore znamo kolika je površina svjećice trenutno zahvaćena jezgrom plamena. Površine svjećice opisane su jednoliko raspoređenim točkama, sličan pristup kao kod modeliranja duljine električne iskre, samo se ovdje radi o puno većem broju točaka. Točke su udaljene za vrijednost δ , a prostiru se u sve tri osi, x,y i z. Svaka točka predstavlja jediničnu površinu ΔS pa ako znamo koliko je točaka obuhvaća jezgra plamena znamo i površinu dodira.

Geometrija svjećice definira se pomoću geometrijskih parametara: G_1, G_2, I_1, I_2, I_3, E_1, E_2, E_3, E_4 i d. Sve ove parametre unosi korisnik na temelju stvarno izmjerene geometrije svjećice .Vrijednosti tih parametara za naš slučaj dane su u tablici [9] .

Tablica 9. Vrijednosti geometrijskih parametara svjećice.

Parametar	G_1	G_2	I_1	I_2	I_3	E_1	E_2	E_3	E_4	d
Vrijednost [mm]	2	6	4	3	0.5	1	0	0	2.5	1

Geometrijski parametri kojima se definira izgled svjećice prikazani su na slici[30].



Slika 30. Geometrijski parametri svjećice.

Navest ćemo još jednom sve parametre pod-modela kvazi-dimenzijskog modela upaljivanja koje definira korisnik:

r_0- radijus jezgre plamena kod kojega se prekida izračun rasta jezgre plamena [mm] ,

α- kut nastrujavanja smjese na elektrode svjećice [°] ,

T_{SP}- temperatura svjećice [K] ,

k_w- koeficijent prijelaza topline [W/m^{2}K] ,

E_S- inicijalna energija sekundarnog strujnog kruga [J] ,

T_Q- temperatura pri kojoj dolazi do gašenja jezgre plamena [K] ,

L_S- induktivitet sekundarnog strujnog kruga [H] ,

R_S- otpor sekundarnog strujnog kruga [Ω] ,

C_{BD}- konstanta proboja električne iskre [V/√(J·mm)] ,

V_{cg}- konstanta za izračun napona [-] ,

$V_{A,fall}$- pad napona na anodi svjećice [V] ,

$V_{C,fall}$- pad napona na katodi svjećice [V] .

Od gore navedenih parametara koje unosi korisnik postoje neki koje nećemo mijenjati pri parametarskoj analizi. T_Q temperatura gašenja jezgre plamena je veličina svojstvena gorivu te je nepromjenjiva. Induktivitet L_S i otpor R_S sekundarnog, te pad napona na katodi i anodi svjećice strujnog kruga utjecajne su veličine za pod-model električne iskre, no nemaju utjecaja na rast jezgre plamena jer je jedini ulazni podatak iz pod-modela električne iskre koji je bitan E_S, inicijalna energija strujnog kruga.

Ostale parametre ćemo mijenjati da dobijemo najbolje moguće poklapanje sa ranije izračunatim zakašnjenjem, a nakon toga ćemo odrediti koliko promjena pojedinog parametra utječe na konačan rezultat.

6. PRIMJENA KVAZI-DIMENZIJSKOG MODELA RASTA JEZGRE PLAMENA

U ovom dijelu rada fizikalno zakašnjenje paljenja odredit ćemo pomoću kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena. Ovaj način izračuna zakašnjenja paljenja puno je jednostavniji i brži od računanja istog iz profila tlakova zato to ovaj pod-model iznos zakašnjenja paljenja daje kao broj u tranzijentnim rezultatima. Jednini nedostatak ovakvog načina izračuna je to što moramo samostalno definirati velik broj ulaznih parametara, no jednom kad su pravilno definirani ovaj pod-model nam uvelike olakšava posao.
Vrijednosti ulaznih parametara koje daju nabolje poklapanje rezultata s onima iz poglavlja 4. odredit ćemo tako što ćemo pojedinačno mijenjati pojedine parametre, a nakon toga iz skupine u kojoj smo mijenjali isti parametar naći onaj slučaj koji ima najmanje srednje odstupanje u odnosu na zakašnjenje paljenja izračunato iz profila tlakova. Znači najprije ćemo varirati parametar r_0 i onda vidjeti za koju je vrijednost parametra r_0 najmanje srednje odstupanje u rezultatima. To ćemo ponoviti za sve parametre dok ne dobijemo najbolju kombinaciju parametara za koju očekujemo da će dati najmanje odstupanje u rezultatima.
Srednje odstupanje izraženo u postotcima računamo prema :

$$S = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \cdot 100 \qquad \textbf{(7)}$$

gdje je:
R_2- rezultat dobiven kvazi-dimenzijskim modelom [°KV] ,
R_1-rezultat dobiven iz profila tlaka u ranijem poglavlju [°KV] .

Ukupno smo simulaciju proveli za 28 različitih slučajeva. Svaki slučaj označava promjenu vrijednosti jednog parametra dok sve ostale vrijednosti ostaju nepromijenjene. Slučajeve u kojima smo mijenjali isti parametar možemo staviti u isti set. Tako za parametar r_0 imamo set od pet slučajeva što znači da smo simulaciju proveli za pet različitih vrijednosti parametra r_0. U nastavku ćemo, po setovima, najprije pokazati vrijednosti parametara za pojedine slučajeve, a nakon toga i vrijednosti srednjeg odstupanja koje ti parametri daju.

Parametar r_0 :
Ulazni parametar r_0 definira do kojega trenutka, odnosno do koje veličine se provodi izračun rasta jezgre plamena. Izračun počinje u trenutku preskakanja električne iskre s jezgrom veličine 0,5 mm i provodi se dok jezgra ne naraste do sfere radijusa r_0 . Za početni slučaj uzeli smo vrijednost r_0=4.75 mm te smo onda od slučaja do slučaja mijenjali parametar r_0 i pratili kako to utječe na rezultat zakašnjenja paljenja. U tablici [10] dane su vrijednosti parametra za provedene slučajeve.

Tablica 10. Vrijednosti parametra r_0.

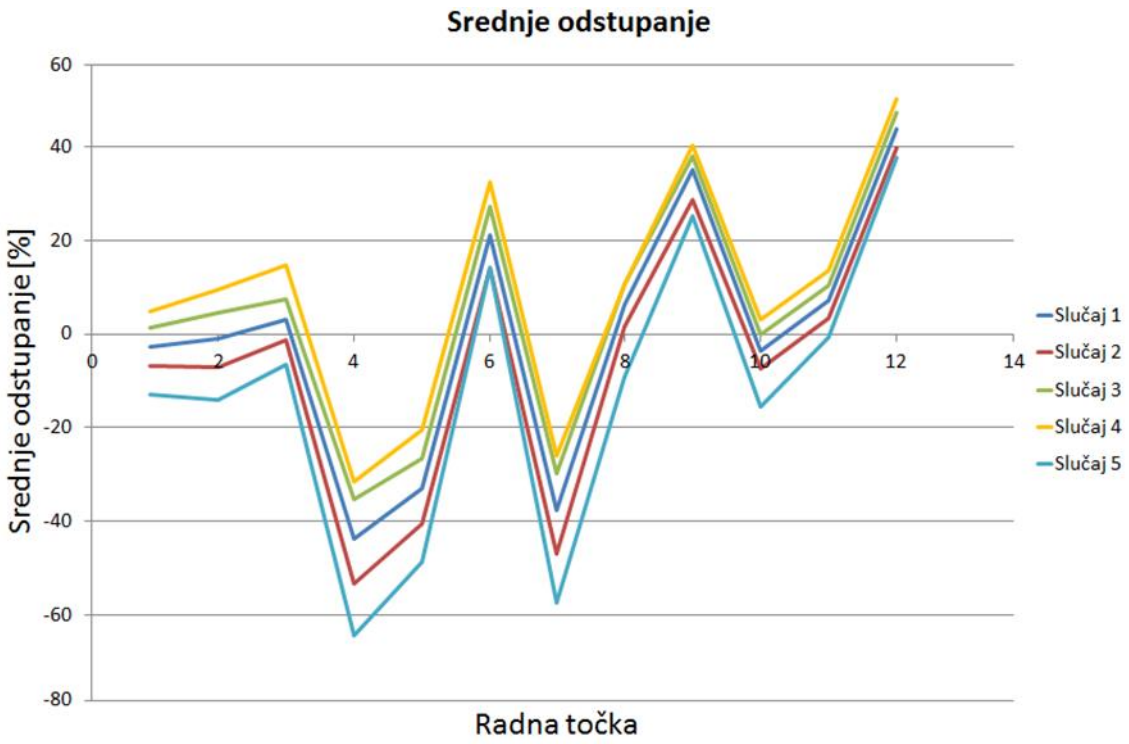
	Vrijednost parametra r_0 [mm]
Slučaj 1	4.75
Slučaj 2	4.5
Slučaj 3	5
Slučaj 4	5.25
Slučaj 5	4.25

U tablici [11] prikazana su srednja odstupanja rezultata od rezultata zakašnjenja paljenja dobivenih iz profila tlakova u poglavlju 4 . U posljednjem retku prikazan je apsolutni zbroj vrijednosti srednjih odstupanja za svaku točku koji ćemo koristi kao kriterij za odlučivanje koji je slučaj najbliži referentnom. Najbolji rezultati su oni koji imaju najmanju vrijednost apsolutnog zbroja i bit će označeni u drugoj boji.

Tablica 11. Srednja odstupanja za parametar r_0.

	Srednje odstupanje [%]				
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5
1	-2.629	-6.849	1.266	4.88	-13.044
2	-0.972	-7.091	4.487	9.384	-13.99
3	3.191	-1.429	7.383	14.8	-6.501
4	-43.813	-53.4	-35.353	-31.486	-64.357
5	-33.158	-40.556	-26.5	-20.476	-48.824
6	21.167	14	27.231	32.429	14
7	-37.813	-47	-29.706	-26	-57.5
8	6.381	1.7	10.636	10.636	-9.22
9	35.017	28.722	37.823	40.311	25.135
10	-3.724	-7.429	-0.267	2.967	-15.692
11	7	3.28	10.444	13.643	-0.75
12	43.807	39.824	47.182	50.05	37.773
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	238.67	251.279	238.279	257.069	306.8

Najbolji je slučaj 3 odnosno vrijednost parametra r_0=5mm. Srednje odstupanje dano u gornjoj tablici prikazano je i grafički na slici [31].



Slika 31. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra r_0.

Parametar E_S :

Parametar E_S označava inicijalnu energiju strujnog kruga, odnosno energiju koja se svjećicom prenosi na smjesu i formira električnu iskru, a onda posljedično i jezgru plamena. Energija unesena u jezgru direktno je povezana s ovim parametrom pa od njega očekujemo velik utjecaj na konačan rezultat. Vrijednosti ovog parametra za pojedini slučaj prikazane su u tablici [12].

Tablica 12. Vrijednosti parametra E_S.

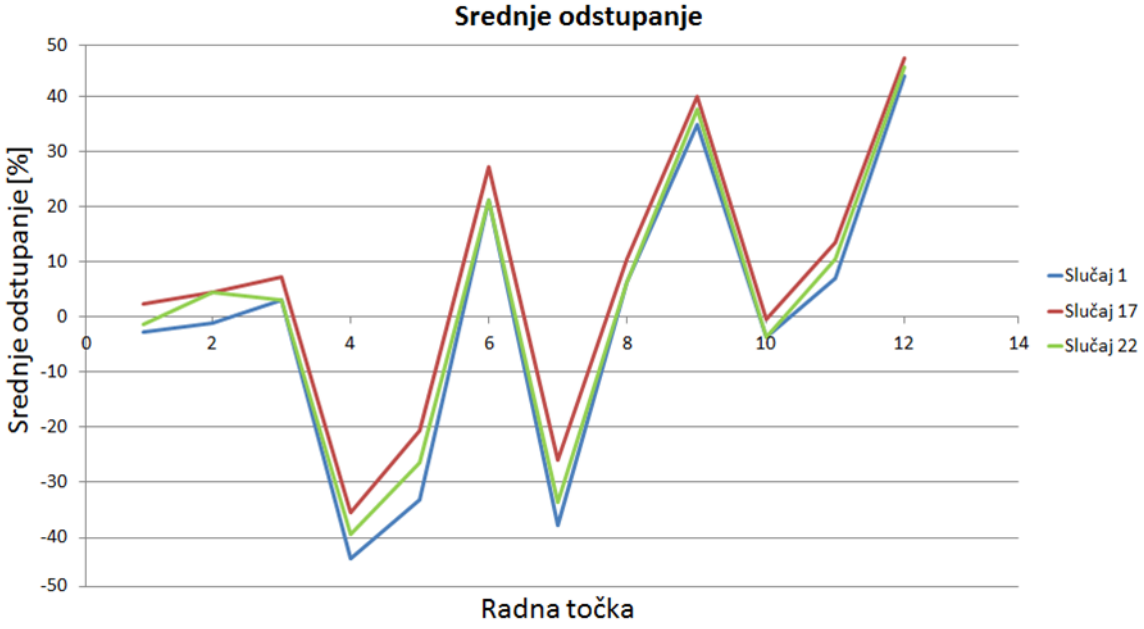
	Vrijednost parametra E_S [mJ]
Slučaj 1	60
Slučaj 15	30
Slučaj 16	100
Slučaj 17	45
Slučaj 22	52

Vrijednosti srednjeg odstupanja za pojedine slučajeve kao i apsolutni zbroj vrijednosti odstupanja dane su tablici [13].

Tablica 13. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar E_S .

	Srednje odstupanje [%]				
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 15	Slučaj 16	Slučaj 17	Slučaj 22
1	-2.629	7.143	-11.425	2.498	-1.301
2	-0.972	13.804	-13.993	4.487	4.487
3	3.191	11.25	-1.429	7.383	3.191
4	-43.813	-24.378	-70.44	-35.353	-39.455
5	-33.158	-10	-48.823	-20.476	-26.5
6	21.167	32.429	21.667	27.231	21.667
7	-37.812	-16.052	-52.069	-26	-33.636
8	6.381	18.083	-9.222	10.636	6.381
9	35.017	42.529	28.716	40.133	37.764
10	-3.724	8.848	-11.407	-0.267	-3.724
11	7	22	-0.75	13.643	10.44
12	43.807	52.342	37.612	46.978	45.451
Apsolutni zbroj srednjih vrijednosti	238.67	258.86	307.06	235.08	233.5

Najbolje vrijednosti srednjeg odstupanja daje slučaj 22 odnosno vrijednost parametra E_S=52 mJ. Vrijednosti dane u gornjoj tablici prikazane su i grafički na slici [32]. Zbog jasnijeg prikaza nisu prikazani svi slučajevi nego samo 1, 17 i 22.



Slika 32. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra E_S.

Parametar C_{BD}:

Parametar C_{BD} predstavlja konstantu za proboj električne iskre i utječe na inicijalnu energiju u jezgri. Sastavni je dio pod-modela električnog kruga svjećice, a na energiju koju taj sustav predaje utječe prema formuli:

$$E_{BD} = \frac{V_{BD}^2}{C_{BD}^2 \cdot d} \quad \textbf{(8)}$$

Vidimo da na energiju utječe obrnuto proporcionalno i to kvadratom pa očekujemo veliku utjecajnost ovog parametra. Vrijednosti parametra C_{BD} korištene u raznim slučajevima prikazane su u tablici [14].

Tablica 14. Vrijednosti parametra C_{BD}.

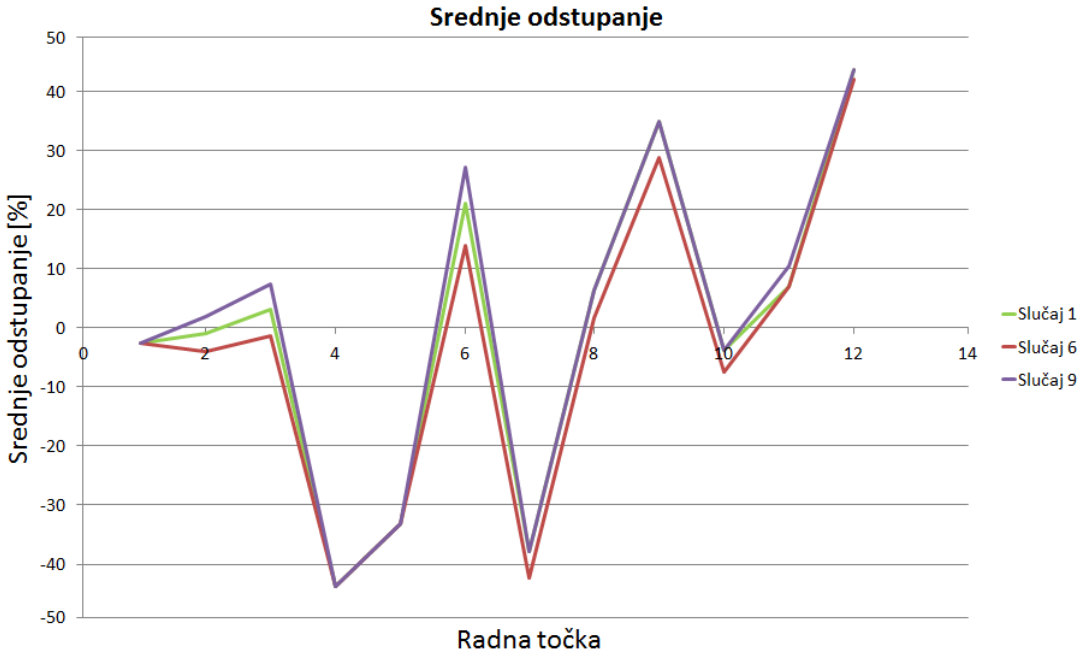
	Vrijednost parametra C_{BD} [V/√(J·mm)]
Slučaj 1	134 000
Slučaj 6	100 000
Slučaj 7	80 000
Slučaj 8	150 000
Slučaj 9	165 000
Slučaj 21	120 000

Utjecaj promjene parametra na rezultat opet je prikazan srednjim odstupanjem od rezultata zakašnjenja paljenja dobivenih iz profila tlakova. Vrijednosti srednjeg odstupanja i apsolutni zbrojevi istih dane su u tablici [15].

Tablica 15. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar C_{BD}.

	Srednje odstupanje [%]					
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 6	Slučaj 7	Slučaj 8	Slučaj 9	Slučaj 21
1	-2.629	-2.629	-1.301	-2.629	-2.623	-2.629
2	-0.972	-3.935	-7.091	1.833	1.833	-0.972
3	3.191	-1.429	-12.104	7.39	7.39	3.183
4	-43.813	-43.813	-43.813	-43.813	-43.813	-43.813
5	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158	33.158
6	21.167	14	14	21.167	27.231	21.167
7	-37.812	-42.258	-42.258	-37.812	-37.812	-37.812
8	6.381	1.7	-3.474	6.38	6.381	1.7
9	35.017	28.765	21.001	34.919	34.879	31.975
10	-3.724	-7.429	-7.429	-3.724	-3.724	-3.724
11	7	7	3.28	7	10.44	7
12	43.807	42.1	37.597	43.705	43.655	42.05
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	238.67	228.21	233.9	239.33	252.95	229.18

Najbolje poklapanje u rezultatima imamo za slučaj 6 odnosno za vrijednost parametra C_{BD}=100000 V/√(J·mm). Vrijednosti srednjeg odstupanja dane u gornjoj tablici prikazane su i grafički na slici [33]. Zbog jasnijeg prikaza nisu prikazane sve vrijednosti već samo one za slučajeve 1, 6 i 9.



Slika 33. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra C_{BD}.

Parametar k_w :

Parametar k_w označava koeficijent prijelaza topline sa jezgre plamena na elektrode svjećice te nam služi za izračun topline koju predaje jezgra plamena. Vrijednosti ovog parametra za različite slučajeve prikazane su u tablici [16].

Tablica 16. Vrijednosti parametra k_w.

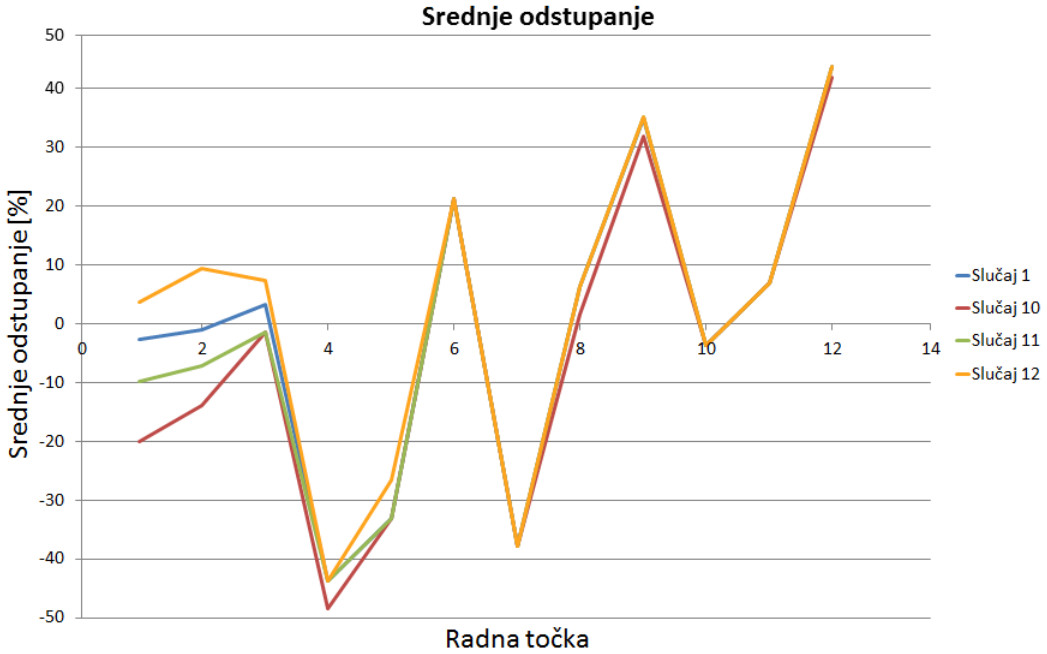
	Vrijednost parametra k_w [W/m^{2}K]
Slučaj 1	2000
Slučaj 10	1000
Slučaj 11	1500
Slučaj 12	2500

Utjecaj promjene parametra na rezultat opet je prikazan srednjim odstupanjem od rezultata zakašnjenja paljenja dobivenih iz profila tlakova. Vrijednosti su dane u tablici [17].

Tablica 17. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar k_w.

	Vrijednost srednjeg odstupanja [%]			
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 10	Slučaj 11	Slučaj 12
1	-2.629	-20.004	-9.859	3.704
2	-0.972	-13.99	-7.091	9.385
3	3.191	-1.429	-1.429	7.383
4	-43.813	-48.452	-43.813	-43.813
5	-33.158	-33.158	-33.158	-26.5
6	21.167	21.167	21.167	21.167
7	-37.812	-37.812	-37.812	-37.812
8	6.381	1.7	6.381	6.381
9	35.017	31.935	35.03	35.042
10	-3.724	-3.724	-3.724	-3.724
11	7	7	7	7
12	43.087	41.945	43.814	43.784
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	238.69	262.32	250.28	245.69

Najbolje, odnosno najmanje vrijednosti srednjeg odstupanja od referentnih rezultata daje slučaj 1 tj. vrijednost parametra k_w=2000 W/m^{2}K. Vrijednosti srednjeg odstupanja za pojedine slučajeve prikazane su grafički na slici [34].



Slika 34. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra k_w.

Parametar T_{SP} :

Parametrom T_{SP} definiramo temperaturu elektrodi svjećice, a taj podatak nam je bitan za izračun topline koja prelazi sa jezgre plamena na svjećicu koja je znatno niže temperature. Vrijednosti ovog parametra za pojedine slučajeve dane su u tablici [18].

Tablica 18. Vrijednosti parametra T_{SP}.

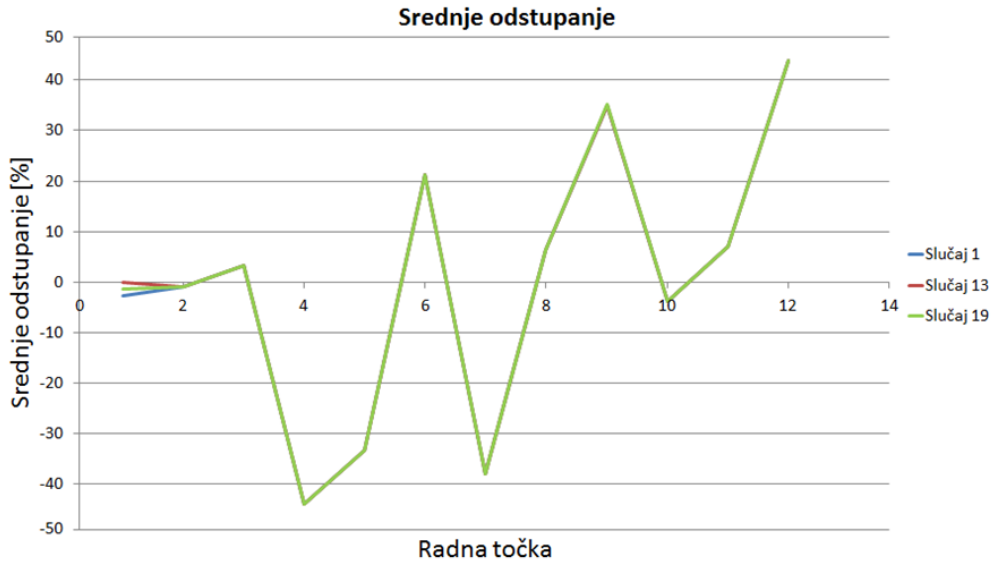
	Vrijednost parametra T_{SP} [K]
Slučaj 1	600
Slučaj 13	750
Slučaj 18	500
Slučaj 19	550
Slučaj 20	650

Kako bi odredili koja od gore navedenih vrijednosti daje najbolje poklapanje s referentnim slučajem odredit ćemo njihovo srednje odstupanje. Vrijednosti srednjih odstupanja za parametar T_{SP} dane su u tablici [19].

Tablica 19. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar T_{SP}.

	Srednje odstupanje [%]				
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 13	Slučaj 18	Slučaj 19	Slučaj 20
1	-2.629	-5.408	0	-1.301	-2.629
2	-0.972	-0.972	-0.977	-0.977	-0.977
3	3.191	3.191	3.191	3.191	3.191
4	-43.813	-43.813	-43.812	-43.812	-43.812
5	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158
6	21.167	21.167	21.167	21.167	21.167
7	-37.812	-37.812	-37.812	-37.812	-37.812
8	6.381	6.381	6.381	6.381	6.381
9	35.017	35.028	35.059	35.095	34.974
10	-3.724	-3.724	-3.724	-3.724	-3.724
11	7	7	7	7	7
12	43.087	43.852	43.879	43.849	43.857
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	238.67	241.51	236.16	237.47	238.68

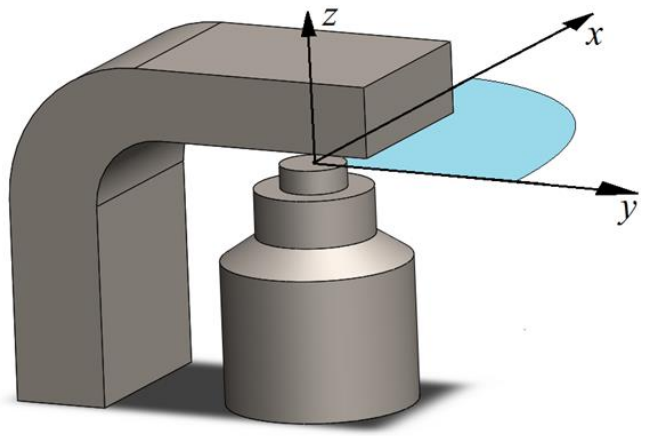
Iako su vrijednosti srednjeg odstupanja u svim slučajevima bliske što znači da promjena parametra T_{SP} nema velik utjecaj na konačan rezultat, najbolji rezultat nam daje slučaj 18, odnosno vrijednost parametra T_{SP}=500 K. Vrijednosti srednjeg odstupanja za nekoliko slučajeva prikazane su i grafički na slici [35].



Slika 35. Srednje odstupanje za različite vrijednosti parametra T_{SP}.

Parametar α :

Parametar α definira kut nastrujavanja smjese na elektrode svjećice, a profil brzine deformira električnu iskru upravo u smjeru koji je definiran ovim parametrom, te se jezgra plamena pomiče u tom smjeru. Zbog toga nam je bitno da kut ne bude definiran tako da usmjerava jezgru plamena na negativnu elektrodu svjećice. Stoga ćemo ovaj parametar mijenjati unutar kvadranta koji je prikazan na slici [36].



Slika 36. Područje u kojem ćemo varirati parametar α.

Tablica 20. Vrijednosti parametra α.

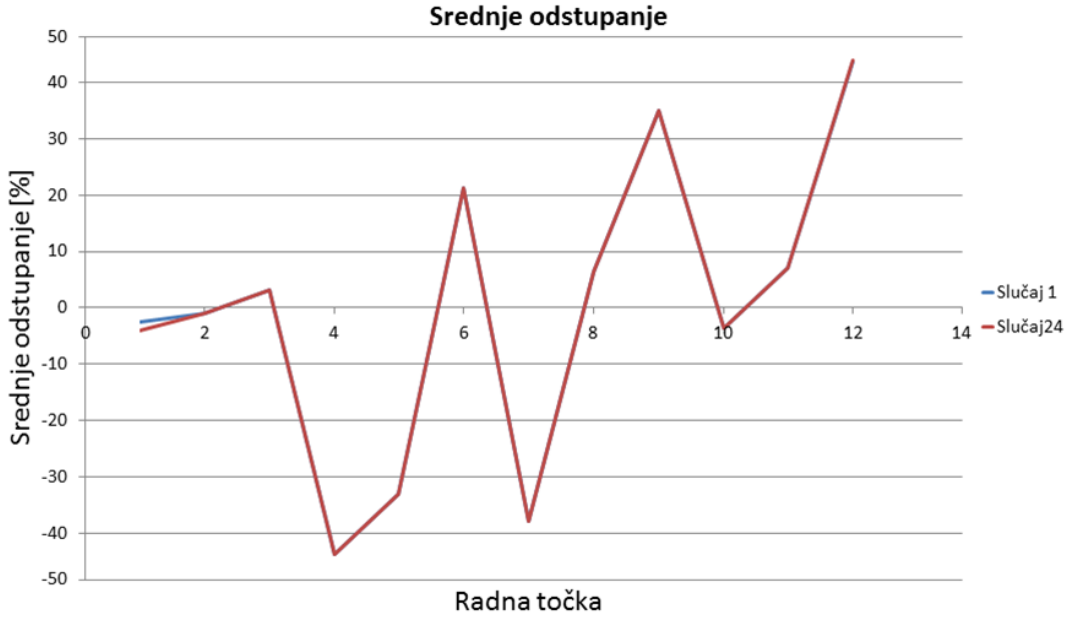
	Vrijednost parametra α [°]
Slučaj 1	0
Slučaj 24	280
Slučaj 25	295
Slučaj 26	310
Slučaj 28	340

Ponovno računamo srednje odstupanje za pojedine slučajeve. Vrijednosti srednjeg odstupanja od rezultata zakašnjenja paljenja iz profila tlakova dane su u tablici [21].

Tablica 21. Vrijednosti srednjeg odstupanja za slučajeve sa parametrom α.

	Srednje odstupanje [%]				
Radna točka	Slučaj 1	Slučaj 24	Slučaj 25	Slučaj 26	Slučaj 28
1	-2.629	-4	-2.629	-2.629	-2.629
2	-0.972	-0.972	-0.977	-0.977	-0.977
3	3.191	3.191	3.191	3.191	3.191
4	-43.813	-43.813	-43.813	-43.813	-43.813
5	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158	-33.158
6	21.167	21.167	21.167	21.167	21.167
7	-37.812	-37.812	-37.812	-37.812	-37.812
8	6.381	6.381	6.381	6.381	6.381
9	35.017	35.017	35.017	35.017	35.017
10	-3.724	-3.724	-3.724	-3.724	-3.724
11	7	7	7	7	7
12	43.087	43.853	43.845	43.885	43.881
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	238.67	240.12	238.76	238.91	238.79

Ovdje su razlike u srednjim odstupanjima između različitih slučajeva još manje izražene, a najbolji rezultat daje slučaj 1 tj. vrijednost parametra α=0°. Na slici [37] prikazane su vrijednosti srednjeg odstupanja za ovaj set slučajeva. Zbog male razlike između slučajeva prikazani su samo slučaj 1 i 24.



Slika 37. Vrijednosti srednjeg odstupanja za različite slučajeve parametra α .

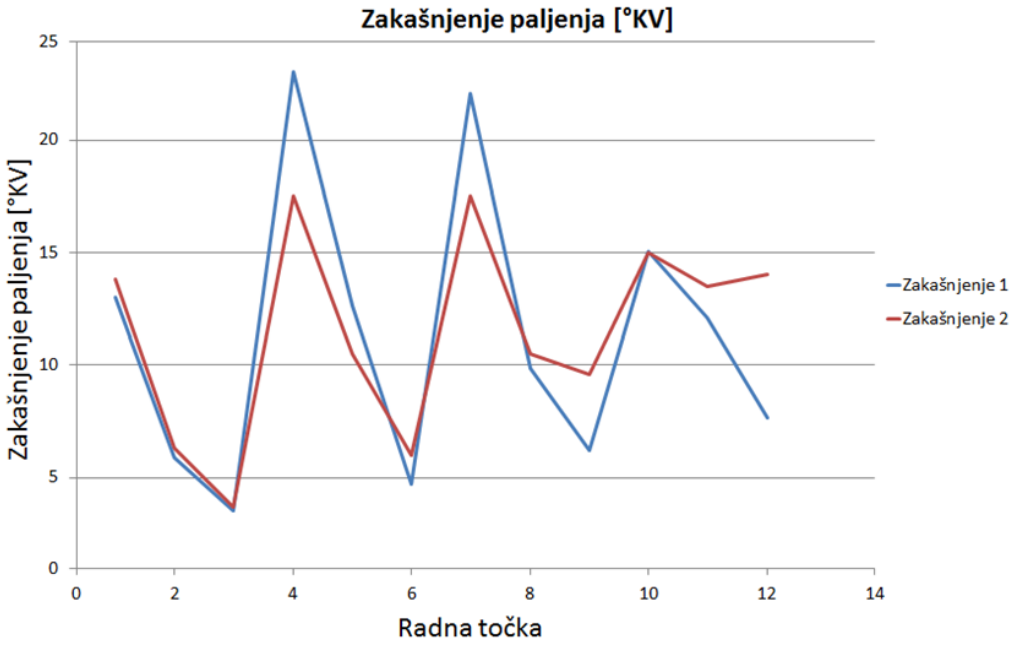
6.1. Izračun zakašnjenja paljenja pomoću kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena.

Poznavajući vrijednosti parametara koje individualno postižu najmanje srednje odstupanje, postavit ćemo vrijednosti tih parametara u jedan model, te očekujemo da taj model predstavlja najbolju kombinaciju parametara s kojima bi trebali dobiti najmanje srednje odstupanje u rezultatima u odnosu na zakašnjenje paljenja izračunato iz profila tlakova u poglavlju 4. Vrijednosti ulaznih parametara za ovaj slučaj prikazane su u tablici [22].

Tablica 22. Ulazni parametri kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena.

Parametar	Mjerna jedinica	Vrijednost
α	[°]	0
T_{SP}	[K]	500
T_Q	[K]	1600
k_w	[W/m^{2}K]	2000
E_S	[mJ]	52
L_S	[H]	20
R_S	[Ω]	20 000
B_{AKT}	[-]	40.46
$V_{A,fall}$	[V]	18.75
$V_{C,fall}$	[V]	252
C_{BD}	[V/√(J·mm)]	100 000
r_0	[mm]	5

Na slici [38] prikazani su rezultati koje smo dobili primjenom kvazi-dimenzijskog modela, a uspoređeni su sa ranije izračunatim zakašnjenjem, krivulja *Zakašnjenje 1* označava rezultate dobivene u ranijem poglavlju, a *Zakašnjenje 2* označava rezultate kvazi-dimenzijskog modela.



Slika 38. Usporedba rezultata zakašnjenja paljenja.

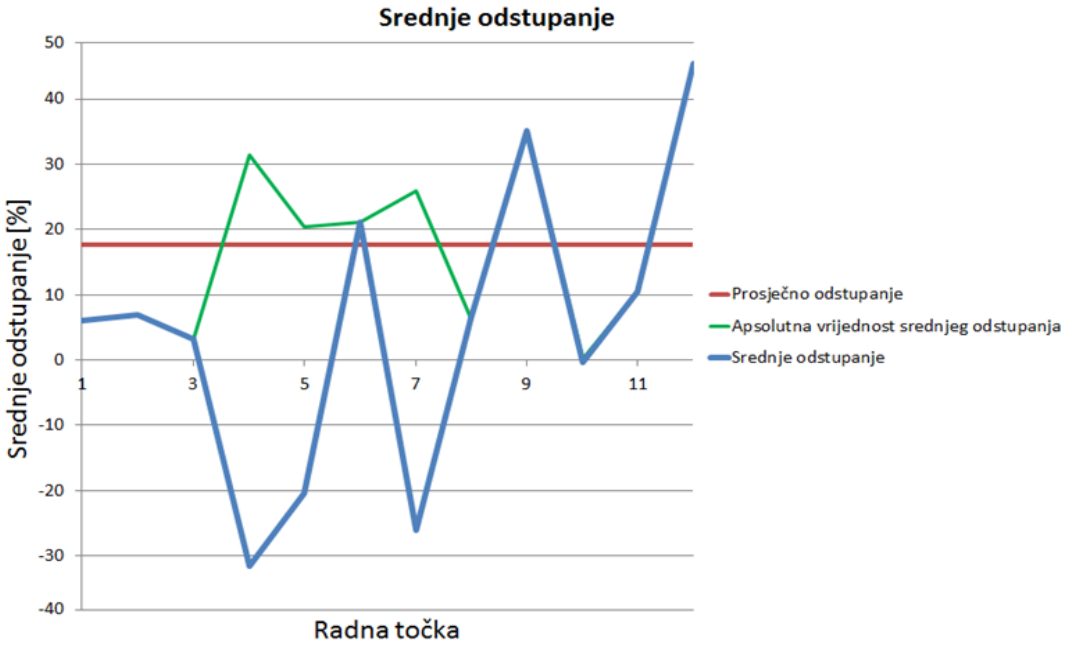
Vidimo da je u nekim točkama postignuto odlično poklapanje u rezultatima, dok su u nekim odstupanja znatnija. Načelno možemo reći da se veća odstupanja pojavljuju na točkama sa opterećenjem od 100 kPa i srednjim brzinama vrtnje (2500 i 4500 o/min) te na točkama sa maksimalnim opterećenjem i velikim brzinama vrtnje (4500 i 6000 o/min) odnosno u točkama 4, 7, 9 i 12. Rezultate je zanimljivo prikazati i preko srednjeg odstupanja kako bi vidjeli koliko iznosi odstupanje izraženo u postotcima.

Kako bi provjerili jesmo li dobili dobar rezultat u odnosnu na sve prethodne ponovno ćemo izračunati srednje odstupanje od rezultata dobivenih iz profila tlakova. Vrijednosti srednjeg odstupanja ovaj slučaj dane su dane su tablici [23] .

Tablica 23. Srednje odstupanje rezultata.

Radna točka	Srednje odstupanje [%]
1	6.022
2	6.995
3	3.191
4	-31.486
5	-20.476
6	21.167
7	-26
8	6.381
9	35.072
10	-0.267
11	10.44
12	45.455
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	212.955
Prosječno srednje odstupanje [%]	17.75

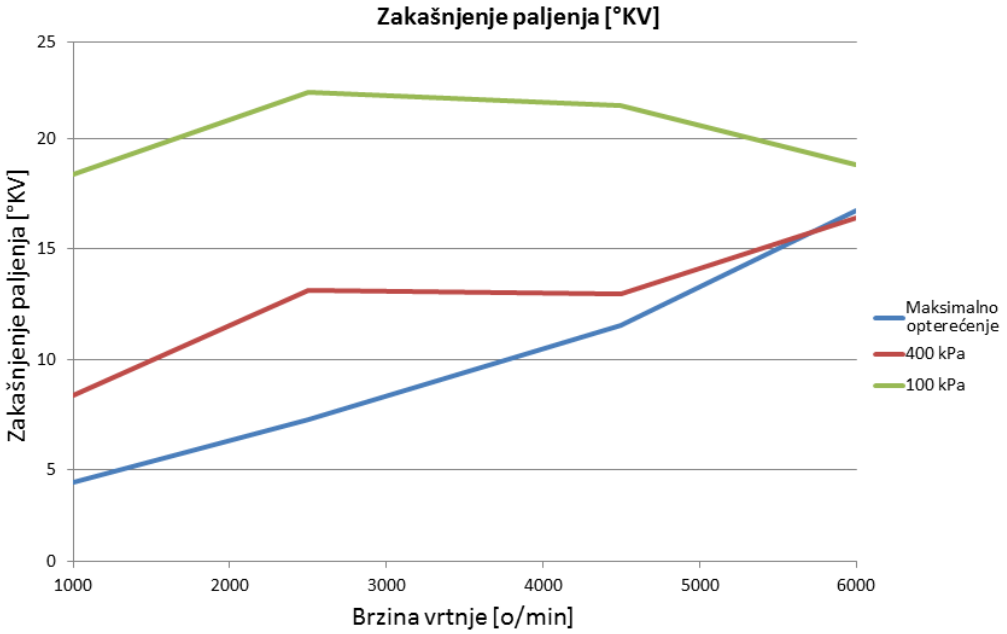
I zaista apsolutni zbroj srednjih odstupanja za ovaj slučaj pokazuje najmanju vrijednost od svih dosadašnjih slučajeva, što znači da je rezultat kvazi-dimenzijskog modela za ovaj slučaj ostvario najbolje poklapanje sa rezultatom zakašnjenja paljenja dobivenim iz profila tlakova. Srednje odstupanje dano u tablici [23] prikazano je i grafički na slici [39], a dodatno je prikazano i prosječno srednje odstupanje koje smo dobili tako da smo iznos apsolutnog zbroja srednjih odstupanja podijelili sa brojem točaka. Prosječno srednje odstupanje iznosi 17.75 %.



Slika 39. Srednje odstupanje rezultata zakašnjenja paljenja.

6.2. Analiza rezultata kvazi-dimenzijskog modela

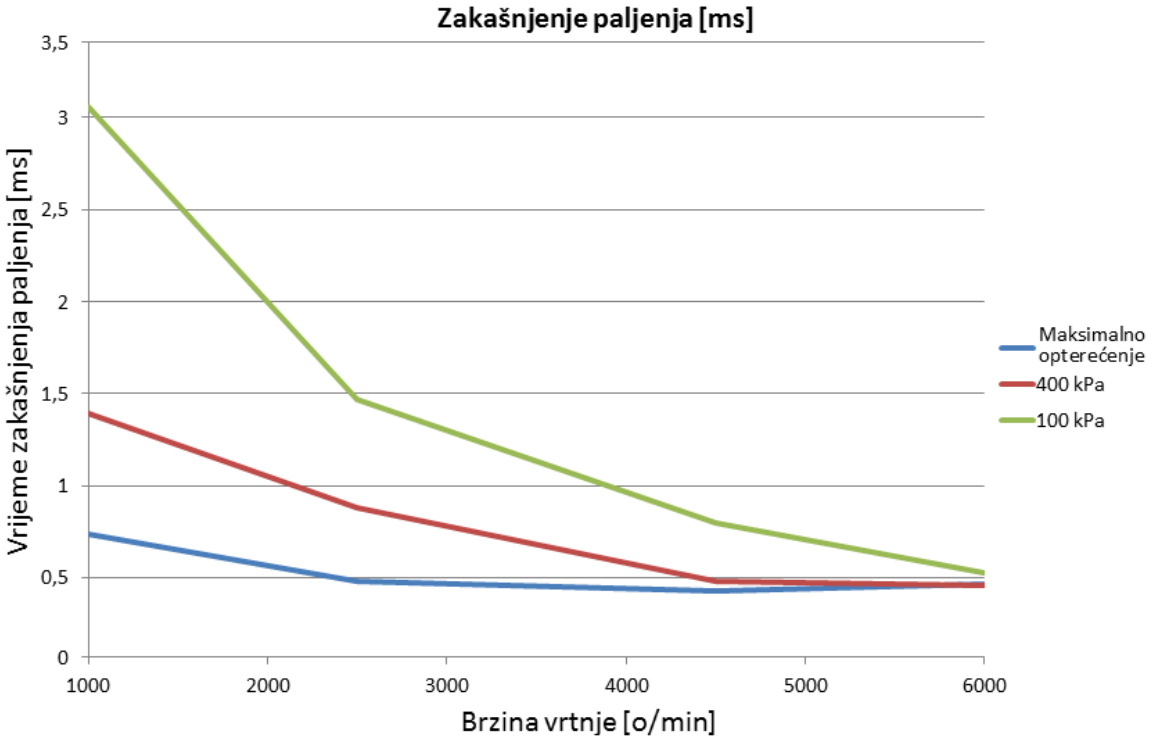
Rezultate zakašnjenja paljenja koje smo dobili primjenom kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena možemo pridružiti razini opterećenja te napraviti analizu da vidimo postoji li kakav uzorak u rezultatima te kakva je ovisnost o radnim parametrima motora i uvjetima u cilindru. Izračunat ćemo i vremensko zakašnjenje paljenja prema ranije korištenoj formuli (1.3). Na slici [40] prikazano je zakašnjenje paljenja izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila, u ovisnosti o razini opterećenja.



Slika 40. Kvazi-dimenzijsko zakašnjenje paljenja prema razini opterećenja.

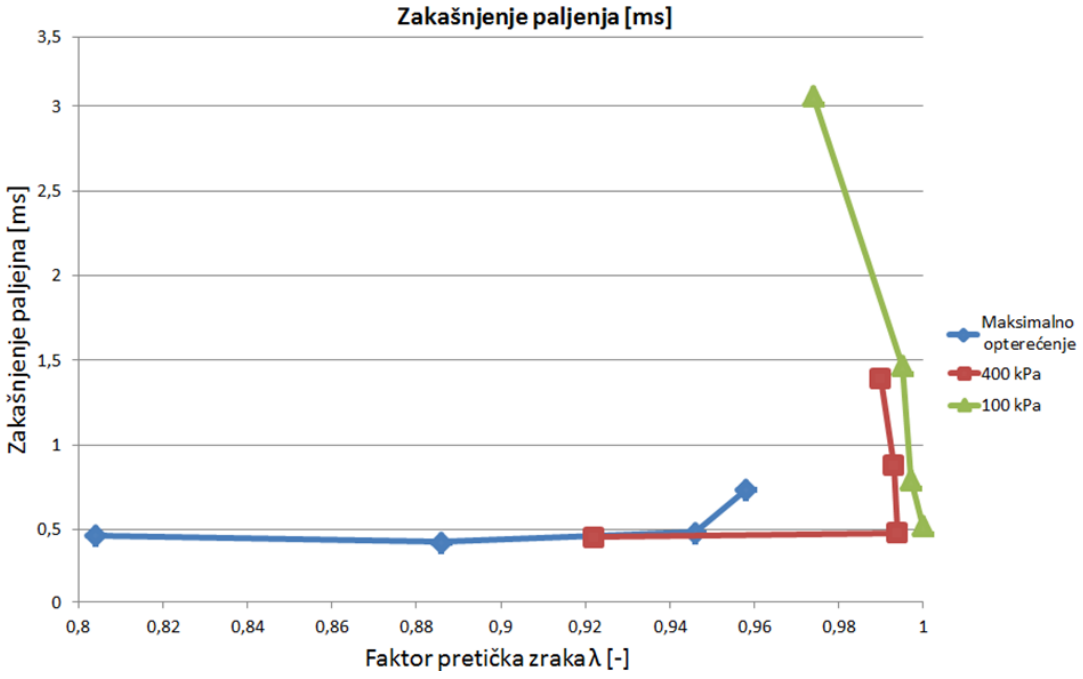
Najveće promjene u odnosu na zakašnjenje paljenja izračunato iz profila tlakova u prethodnom poglavlju su velike vrijednosti zakašnjenja pri 6000 o/min. Vidimo da je pri svim razinama opterećenja zakašnjenje pri 6000 o/min gotovo iste vrijednosti.

Prema ranije navedenim formulama možemo zakašnjenje izraženo u kutu zakreta koljenastog vratila preračunati u vremensko zakašnjenje paljenja. Vrijednosti su ostale približno jednake onima u ranijem poglavlju, do 2.5 milisekunde, no raspodjela je nešto drugačija. U ovom slučaju za maksimalnu brzinu vrtnje postiže se gotovo isto vremensko zakašnjenje za sva tri opterećenja. Možemo iz toga zaključiti da je vremenski iznos zakašnjenja paljenja za maksimalnu brzinu približno konstantan i neovisan o opterećenju motora. Kako se smanjuje brzina vrtnje motora povećava se utjecaj opterećenja motora na vremensko zakašnjenje paljenja. Vrijednosti vremenskog zakašnjenja paljenja prikazane su na slici [41].



Slika 41. Vremensko zakašnjenje paljenja dobiveno kvazi-dimenzijskim modelom.

Svi trendovi raspodjele zakašnjenja paljenja u ovisnosti o uvjetima u cilindru koji su se mogli primijetiti u prvom poglavlju ovdje su narušeni upravo zbog velikih vrijednosti zakašnjenja paljenja na brzini od 6000 o/min. Određeno pravilo u raspodjeli zakašnjenja paljenja može se primijetiti samo u ovisnosti o faktoru pretička zraka što je prikazano na slici [42].



Slika 42. Zakašnjenje paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka.

Može se reći da postoji određeni trend u raspodjeli vremenskog trajanja zakašnjenja paljenja u ovisnosti o faktoru pretička zraka, pa je tako za niže vrijednosti faktora koje znače bogatiju smjesu vremenski iznos zakašnjenja manji dok za vrijednosti faktora blizu koje su blizu stehijometrijskom omjeru vrijednosti ti iznosi pokrivaju velik spektar. Dijelom je to tako i zato što većini promatranih točaka pripada vrijednost faktora pretička zraka oko 1 (± 2%) pa je stoga u tom području velika koncentracija radnih točaka.

6.3. Analiza utjecajnosti ulaznih parametara

Općenito je poželjno da simulacijski model ovisi o što manjem broju ulaznih parametara jer to uvelike olakšava korištenje, naime točno određivanje velikog broja parametara je zahtjevno, nerijetko i nemoguće, te se stvara mogućnost pogreške. Kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena ovisi o osnovnim parametrima neophodnima za opisivanje izgaranja, a naš je cilj provjeriti koliko koji parametar utječe na ukupni rezultat. Kao što smo vidjeli ranije, promjenom različitih parametara, promjena u konačnim rezultatima nije jednaka; neki od parametra drastično mijenjaju rezultate dok neki od parametara daju jedva vidljive promjene u rezultatima. Ako znamo promjenom kojeg parametra nastaju velike promjene u rezultatima možemo reći za taj parametar da je utjecajan i posvetiti veliku pažnju njegovu točnom definiranju jer točnost krajnjeg rezultata uvelike utječe o ulaznoj vrijednosti tog parametra. S druge pak strane ako znamo da promjena nekog parametra nema gotovo nikakav utjecaj na konačan rezultat možemo manje pažnje posvetiti tom parametru.
Cilj ovoga poglavlja je napraviti poredak ulaznih parametara kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena prema njihovoj utjecajnosti. Za to ćemo koristiti vrijednosti srednjeg odstupanja za pojedine parametre izračunate u prethodnom poglavlju.

Važno je napomenuti kako ovdje ne računamo koji od provedenih slučajeva daje najbolje poklapanje sa rezultatima dobivenim u poglavlju 4 nego tražimo utjecaj promjene pojedinog parametra na rezultate kvazi-dimenzijskog modela. Srednje odstupanje u svim slučajevima računati ćemo u odnosu na slučaj 1, vrijednosti ulaznih parametara za taj slučaj dane su u tablici [24] i njega ćemo uzeti kao referentni budući da smo sve varijacije izvodili mijenjajući ovaj slučaj. Slučaj 2 nastao je tako što smo promijenili vrijednost jednog parametra u odnosu na prethodni slučaj te smo onda gledali kakav je to utjecaj imalo na konačan rezultat (vrijednost zakašnjenja paljenja). Isto smo ponovili sa svih 28 slučajeva.

Tablica 24. Ulazni parametri kvazi-dimenzijskog modela za slučaj 1.

Parametar	Mjerna jedinica	Vrijednost
α	[°]	0
T_{SP}	[K]	600
k_w	[W/m^{2}K]	2000
E_S	[mJ]	60
C_{BD}	[V/√(J·mm)]	134 000
r_0	[mm]	4.75

Metodologija izračuna utjecajnosti je sljedeća:
-za pojedini slučaj izračunati koliko je srednje odstupanje od referentnog rezultata (slučaj 1) po točkama.
-odrediti koliki je apsolutni zbroj odstupanja za pojedini slučaj, te izračunati prosječno odstupanje slučaja tako da vrijednost zbroja podijelimo s brojem slučajeva.
-odrediti koliko je prosječno odstupanje cijelog seta u kojemu smo mijenjali isti parametar.
-poredati parametre po tome koliko im je prosječno odstupanje seta.

U nastavku ćemo provesti izračun za parametre koje smo varirali.

Parametar r_0 :

Najprije ćemo vidjeti koliko je prosječno odstupanje za set slučajeva u kojem smo mijenjali parametar r_0. U tablici [25] dane su vrijednosti parametra za provedene slučajeve.

Tablica 25. Vrijednosti parametra r_0.

	Vrijednost parametra r_0 [mm]
Slučaj 1	4.75
Slučaj 2	4.5
Slučaj 3	5
Slučaj 4	5.25
Slučaj 5	4.25

Sada možemo odrediti koliko je srednje odstupanje po radnim točkama za pojedine slučajeve u odnosu na rezultate koje daje referentni slučaj, slučaj 1. Napomenimo još jednom da srednje odstupanje računamo prema izrazu:

$$S = \frac{R_i - R_1}{R_i} \cdot 100 \quad \textbf{(7)}$$

gdje je:
R_2- iznos zakašnjenja paljenja dobiven primjenom ulazni parametara za slučaj *i* [°KV] ,
R_1-iznos zakašnjenja paljenja dobiven u referentnom slučaju, slučaju 1 [°KV].

Tablica 26. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar r_0 .

	Srednje odstupanje [%]			
Radna točka	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5
1	-4.112	3.795	7.317	-10.148
2	-6.06	5.406	10.257	-12.902
3	-4.771	4.331	11.993	-10.01
4	-6.667	5.882	8.571	-14.286
5	-5.556	5	9.524	-11.765
6	-9.091	7.692	14.286	-9.091
7	-6.667	5.882	8.571	-14.286
8	-5	4.545	4.545	-16.667
9	-9.687	4.318	8.148	-15.207
10	-3.571	3.33	6.451	-11.538
11	-4	3.704	7.143	-8.33
12	-7.087	6	11.12	-10.731

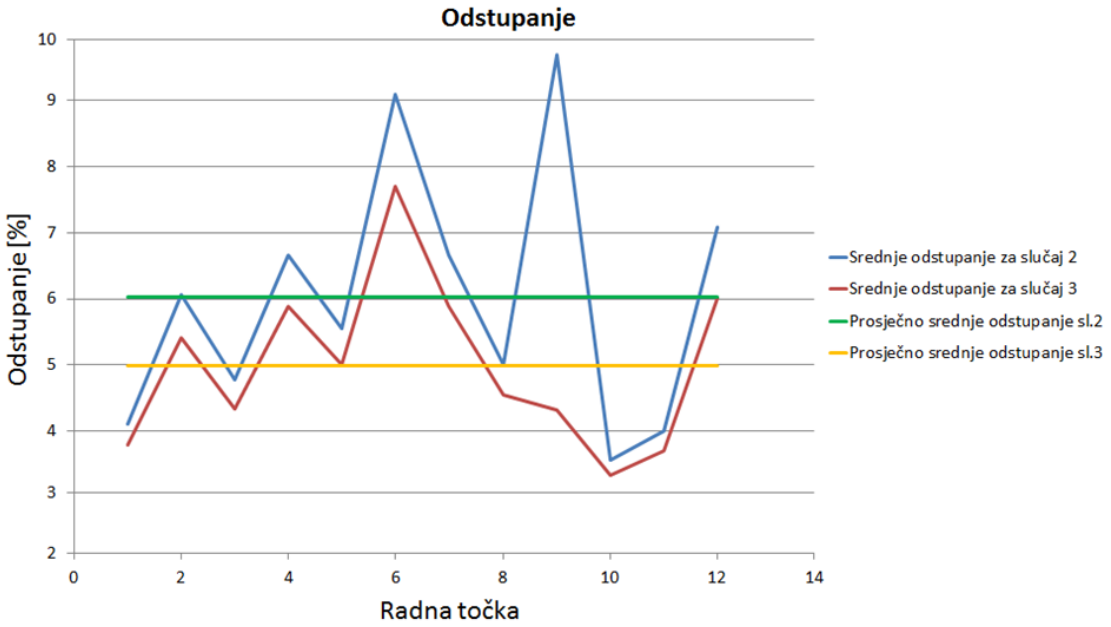
Sada ćemo odrediti koliko iznosi apsolutni zbroj odstupanja za pojedine slučajeve, nakon toga ćemo taj zbroj podijeliti sa brojem točaka i dobiti prosječno odstupanje za svaki slučaj. To je prikazano u tablici [27].

Tablica 27. Prosječno odstupanje po slučajevima za parametar r_0.

	Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja
Slučaj 2	72.269	6.022
Slučaj 3	59.897	4.991
Slučaj 4	107.924	8.994
Slučaj 5	144.964	12.08

Na kraju možemo izračunati prosječnu vrijednost srednjeg odstupanja za cijeli set tako da zbroj prosječnih odstupanja za sve slučajeve podijelimo sa brojem slučajeva. Dobivamo da je prosječna vrijednost srednjeg odstupanja za set u kojem smo mijenjali parametar r_0 **8.022%.**

Za bolju ilustraciju postupka prikazati ćemo grafički apsolutnu vrijednost srednjeg odstupanja po točkama i prosječno srednje odstupanje za slučajeve 2 i 3 na slici [43].



Slika 43. Srednje odstupanje i prosječno srednje odstupanje za pojedine slučajeve seta r_0.

Parametar E_S :

Parametar E_S je drugi bitan parametar koji opisuje energiju koju električni sustav svjećicom prenosi na smjesu i formira električnu iskru, a onda posljedično i jezgru plamena. Također očekujemo velik utjecaj ovog parametra na konačan rezultat. Vrijednosti ovog parametra za pojedini slučaj prikazane su u tablici [28].

Tablica 28. Vrijednosti parametra E_S.

	Vrijednost parametra E_S [mJ]
Slučaj 1	60
Slučaj 15	30
Slučaj 16	100
Slučaj 17	45
Slučaj 22	52

Ponovno ćemo sve rezultate koji su nam bitni za izračun utjecajnosti prikazati u jednoj tablici zbog jednostavnosti. Vrijednosti srednjeg odstupanja i njihove prosječne vrijednosti prikazane su u tablici [29].

Tablica 29. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar E_S .

	Srednje odstupanje [%]			
Radna točka	Slučaj 15	Slučaj 16	Slučaj 17	Slučaj 22
1	9.521	-8.571	4.995	1.294
2	14.634	-12.895	5.406	5.406
3	8.325	-4.771	4.331	0
4	13.514	-18.519	5.882	3.03
5	17.391	-11.765	9.524	5
6	14.286	0	7.692	0
7	15.789	-10.345	8.571	3.03
8	12.5	-16.667	4.545	0
9	11.561	-9.696	7.873	4.228
10	12.121	-7.407	3.33	0
11	16.129	-8.333	7.143	3.703
12	15.189	-11.024	5.643	2.925
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	160.961	119.994	74.94	28.618
Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja	13.413	9.99	6.245	2.385

Prosječna vrijednost cijelog seta slučajeva u kojem smo mijenjali parametar E_S iznosi **8.01%**, a dobili smo ju tako to smo zbrojili prosječne vrijednosti parametara za pojedine slučajeve i podijelili sa brojem slučajeva.

Parametar C_{BD}:

Sada ćemo isti postupak ponoviti za parametar C_{BD} kako bi utvrdili kolika je njegova utjecajnost. Podsjetimo da parametar C_{BD} predstavlja konstantu za proboj električne iskre i utječe na inicijalnu energiju u jezgri, pa očekujmo poprilično velik utjecaj ovog parametra na konačan rezultat. Vrijednosti korištene u raznim slučajevima prikazane su u tablici [30].

Tablica 30. Vrijednosti parametra C_{BD}.

	Vrijednost parametra C_{BD}
Slučaj 1	134 000
Slučaj 6	100 000
Slučaj 7	80 000
Slučaj 8	150 000
Slučaj 9	165 000
Slučaj 21	120 000

Utjecaj promjene parametra na rezultat opet ćemo ispitati računanjem srednjeg odstupanja. Zbog jednostavnosti u istoj tablici odmah ćemo prikazati i apsolutni zbroj vrijednosti srednjeg odstupanja za pojedine točke kao i prosječnu vrijednost za pripadajući slučaj. Sve navedene vrijednosti za set slučajeva u kojem mijenjamo parametar C_{BD} prikazane su u tablici [31].

Tablica 31. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar C_{BD}.

	Srednje odstupanje [%]				
Radna točka	Slučaj 6	Slučaj 7	Slučaj 8	Slučaj 9	Slučaj 21
1	0	1.294	0	0	0
2	-2.934	-6.06	2.778	2.778	0
3	-4.771	-15.799	0	4.434	-0.01
4	0	0	0	0	0
5	0	-5.556	0	0	0
6	-9.091	-9.091	0	7.692	0
7	-3.226	-3.226	0	0	0
8	-5	-10.526	0	0	-5
9	-9.62	-21.568	-0.149	-0.211	-4.681
10	-3.571	-3.571	0	0	0
11	0	-4	0	3.704	0
12	-3.040	-11.05	-0.181	0	-3.127
Apsolutni zbroj srednjih odstupanja	41.255	91.74	3.11	18.993	12.816
Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja	3.438	7.645	0.259	1.583	1.068

Ako prosječne vrijednosti srednjeg odstupanja zbrojimo i onda taj zbroj podijelimo s brojem provedenih slučajeva (pet) dobit ćemo prosječno srednje odstupanje za set slučajeva u kojem smo mijenjali parametar C_{BD} , koje iznosi **2.799 %**.

Parametar T_{SP} :

Parametrom T_{SP} definirana je temperatura elektrodi svjećice, a taj podatak je bitan za izračun topline koja prelazi sa jezgre plamena na svjećicu. Vrijednosti ovog parametra za pojedine slučajeve dane su u tablici [32].

Tablica 32. Vrijednosti parametra T_{SP}.

	Vrijednost parametra T_{SP} [K]
Slučaj 1	600
Slučaj 13	750
Slučaj 18	500
Slučaj 19	550
Slučaj 20	650

Srednje odstupanje za pojedine točke, apsolutni zbroj srednjih odstupanja po slučajevima te prosječne vrijednosti istih za ovaj set u kojem je mijenjan parametar T_{SP} prikazani su u tablici [33].

Tablica 33. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar T_{SP}.

	Srednje odstupanje [%]			
Radna točka	Slučaj 13	Slučaj 18	Slučaj 19	Slučaj 20
1	-2.708	2.562	1.293	0
2	0	-0.005	-0.005	-0.005
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0.01778	0.066	0.121	-0.066
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0.08	0.129	0.075	0.089
Apsolutni zbroj srednjih vrijednosti	2.806	2.762	1.495	0.161
Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja	0.234	0.23	0.124	0.013

Vidimo da je utjecaj ovog parametra značajno manji od parametara koje smo do sad promatrali. Prosječna srednja vrijednost odstupanja za ovaj set slučajeva je **0.151%**.

Parametar k_w :

Parametar k_w označava koeficijent prijelaza topline sa jezgre plamena na elektrode svjećice te nam kao i prethodni parametar služi za izračun topline koju predaje jezgra plamena. Vrijednosti ovog parametra za različite slučajeve prikazane su u tablici [34].

Tablica 34. Vrijednost parametra k_w.

	Vrijednost parametra k_w [W/m^{2}K]
Slučaj 1	2000
Slučaj 10	1000
Slučaj 11	1500
Slučaj 12	2500

Srednje odstupanje rezultata za pojedine slučajeve, njihove apsolutne zbrojeve i prosječne rezultate za ovaj set slučajeva prikazat ćemo u tablici [35].

Tablica 35. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar k_w.

	Vrijednost srednjeg odstupanja [%]		
Radna točka	Slučaj 10	Slučaj 11	Slučaj 12
1	-16.93	-7.045	6.17
2	-12.902	-6.06	10.257
3	-4.771	-4.771	4.331
4	-3.226	0	0
5	0	0	5
6	0	0	0
7	0	0	0
8	-5	0	0
9	-4.743	0.021	0.039
10	0	0	0
11	0	0	0
12	-3.313	0	-0.041
Apsolutni zbroj srednjih vrijednosti	50.885	17.91	25.838
Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja	4.24	1.49	2.153

Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja za ovaj set slučajeva iznosi **2.629%** pa možemo reći i za ovaj parametar da nema velik utjecaj na konačan rezultat kvazi-dimenzijskog modela.

Parametar α :

U prethodnom poglavlju rezultati apsolutnog zbroja srednjih odstupanja su za parametar α bili vrlo bliski u svim slučajevima pa ne očekujemo veliku utjecajnost ovog parametra. Vrijednosti parametra α za pojedine slučajeve prikazane su u tablici [36].

Tablica 36. Vrijednosti parametra α.

	Vrijednost parametra α [°]
Slučaj 1	0
Slučaj 24	280
Slučaj 25	295
Slučaj 26	310
Slučaj 28	340

Vrijednosti srednjeg odstupanja za i prosječne vrijednosti odstupanja po slučajevima dani su u tablici [37].

Tablica 37. Vrijednosti srednjeg odstupanja za parametar α .

	Srednje odstupanje [%]			
Radna točka	Slučaj 24	Slučaj 25	Slučaj 26	Slučaj 28
1	-1.336	0	0	0
2	0	-0.00514	-0.00514	-0.00514
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0.0534	0.07	0.236	0.0753
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0.0822	0.0675	0.1379	0.132
Apsolutni zbroj srednjih vrijednosti	1.472	0.143	0.379	0.212
Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja	0.123	0.012	0.0316	0.018

Vrijednosti srednjih odstupanja za slučajeve u kojima smo mijenjali parametar α su minimalne, u velikoj većini točaka su nula što znači da promjena kuta nastrujavanja nema gotovo nikakvog utjecaja na konačni rezultat. Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja za ovaj set slučajeva je **0.0459%**.

Sada nam još ostaje poredati ove setove prema njihovu utjecaju na rezultate kvazi-dimenzijskog modela. U tablici [38] poredani su setovi slučajeva u kojima smo mijenjali vrijednosti pojedinih parametara prema prosječnoj vrijednosti, od najveće prema najmanjoj.

Tablica 38. Prosječne vrijednosti srednjeg odstupanja za setove prema parametrima.

Parametar	Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja za set slučajeva [%]
r_0	8.022
E_S	8.011
C_{BD}	2.799
k_w	2.629
T_{SP}	0.151
α	0.0459

Možemo zaključiti da na konačan rezultat kvazi-dimenzijskog modela najviše utjecaja ima parametar r_0, a vrlo sličnu utjecajnost ima i parametar E_S. Na rezultat još značajnije utječu parametri C_{BD} i k_w, a parametri T_{SP} i α nemaju gotovo nikakav utjecaj.

Iako smo pažljivo birali vrijednosti parametara za slučajeve tako da one budu fizikalne, ovakav način izračuna utjecaja može u sebi nositi grešku. Naime kada bismo odabrali vrijednost nekog parametra daleko izvan realnih okvira, taj slučaj bi nam davao privid velike utjecajnosti parametra zbog povećanog srednjeg odstupanja. Upravo stoga provest ćemo dodatnu analizu tako što ćemo usporediti postotak promjene vrijednosti parametra u odnosu na referentnu vrijednost parametra i promjene u rezultatima koju ona uzrokuje. Očekujemo jednak poredak parametara po utjecajnosti.
Način izračuna pokazat ćemo na setu slučajeva u kojemu smo mijenjali parametar r_0, Najprije moramo izračunati koliko iznosi postotna promjena vrijednosti parametra za pojedini slučaj. Nakon toga možemo izračunati i kolika je prosječna promjena za sve slučajeve s istim parametrom tako što pojedine postotke zbrojimo i onda to podijelimo sa brojem slučajeva.

Referentni slučaj u odnosu na koji računamo promjene je slučaj 1, a referentna vrijednost parametra za taj slučaj je r_0=4.75mm. Rezultati su prikazani u tablici [39].

Tablica 39. Postotak promjene vrijednosti parametara r_0.

	Vrijednost parametra [mm]	Postotak promjene [%]
Slučaj 2	4.5	5.263
Slučaj 3	5	5.263
Slučaj 4	5.25	10.526
Slučaj 5	4.25	10.526
Zbroj postotaka promjene		31.578
Prosječna vrijednost postotka promjene		7.8945

Prosječna vrijednost postotka promjene vrijednosti parametra u setu u kojem smo varirali parametar r_0 je 7.8945%. Nije teško izračunati da se u ovom setu slučajeva za 1% promjene u ulaznim parametrima prosječna srednja vrijednost odstupanja u rezultatima promjeni za 1.016 %.

Isti postupak proveden je i za sve ostale setove slučajeva, a rezultati su prikazani u tablici[40].

Tablica 40. Utjecaj postotne promjene ulaznih parametara na konačni rezultat.

Parametar	Prosječna vrijednost postotka promjene parametra	Prosječna vrijednost srednjeg odstupanja za set slučajeva [%]	Promjena srednjeg odstupanja za promjenu ulaznih parametara od 1%
r_0	7.895	8.022	1.016
E_S	38.75	8.011	0.2067
C_{BD}	22.239	2.799	0.1258
k_w	33.33	2.629	0.0789
T_{SP}	14.583	0.150	0.0103
α	14.583	0.0459	0.00315

Vidimo da je poredak utjecajnosti ulaznih parametara, kao što smo i očekivali, ostao isti. Zadnji stupac u tablici [40] govori nam kolika je promjena u konačnom rezultatu kvazi-dimenzijskog modela ako se pojedini parametar promjeni za 1%.
Prema rezultatima analize možemo ulazne parametre kvazi-dimenzijskog modela poredati prema utjecaju na rezultat, počevši od najutjecajnijeg prema manje utjecajnim ovako:

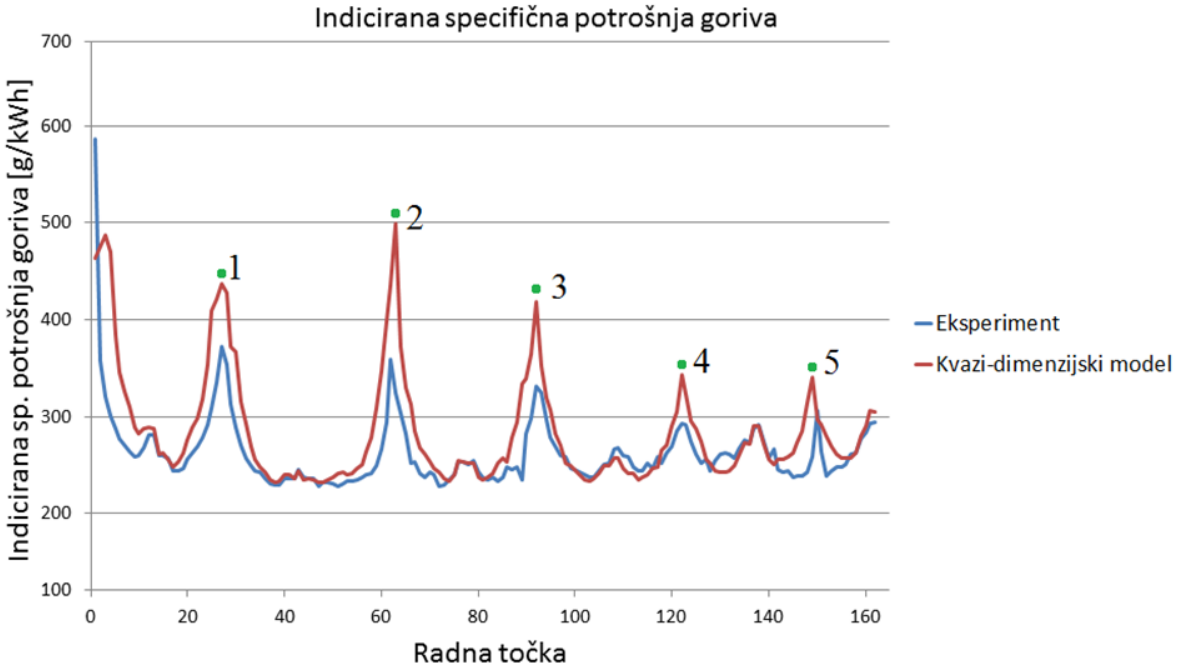
$\boldsymbol{r_0}$- radijus jezgre plamena kod kojega se prekida izračun rasta jezgre plamena [mm] ,
$\boldsymbol{E_S}$- inicijalna energija sekundarnog strujnog kruga [J] ,
$\boldsymbol{C_{BD}}$- konstanta proboja električne iskre[V/√(J·mm)] ,
$\boldsymbol{k_w}$- koeficijent prijelaza topline [W/m^{2}K] ,
$\boldsymbol{T_{SP}}$- temperatura svjećice [K] ,
$\boldsymbol{\alpha}$- kut nastrujavanja smjese na elektrode svjećice [°] .

6.4. Usporedba rezultata početnog i kvazi-dimenzijskog modela

Poznavajući kombinaciju ulaznih parametara koji daju najbolje rezultate u 12 ranije definiranih točaka, možemo te iste parametre iskoristiti da provedemo simulaciju kroz sve 162 točke za koje imamo eksperimentalne podatke. Svakoj točki dodijeljen je i identifikacijski broj i to tako da je točki definiranoj brzinom vrtnje od 1000 o/min i najmanjim opterećenjem dodijeljen broj 1, a točki definiranoj brzinom vrtnje od 6000 o/min i najvećim opterećenjem dodijeljen je broj 162. To nam omogućuje da rezultat koji nas zanima prikažemo u jednom grafu za sve promatrane točke.
Usporedit ćemo podatke dobivene eksperimentalnim putem i rezultate koje daje kvazi-dimenzijski model, a usporedit ćemo rezultate koji dodatno opisuju proces izgaranja i to:
-Indiciranu specifičnu potrošnju goriva,
-CA5, trenutak u kojem je izgorilo 5% mase goriva,
-CA50, težište izgaranja, trenutak u kojem je izgorilo 50 % mase goriva.

6.4.1. Specifična efektivna potrošnja goriva

Indicirana specifična potrošnja goriva dobar je pokazatelj potrošnje radnih tvari jer ne ovisi o veličini motora ni o brzini vrtnje. Izražava se u g/kWh, a usporedba između podataka dobivenih eksperimentom i rezultata kvazi-dimenzijskog modela dana je na slici [45].



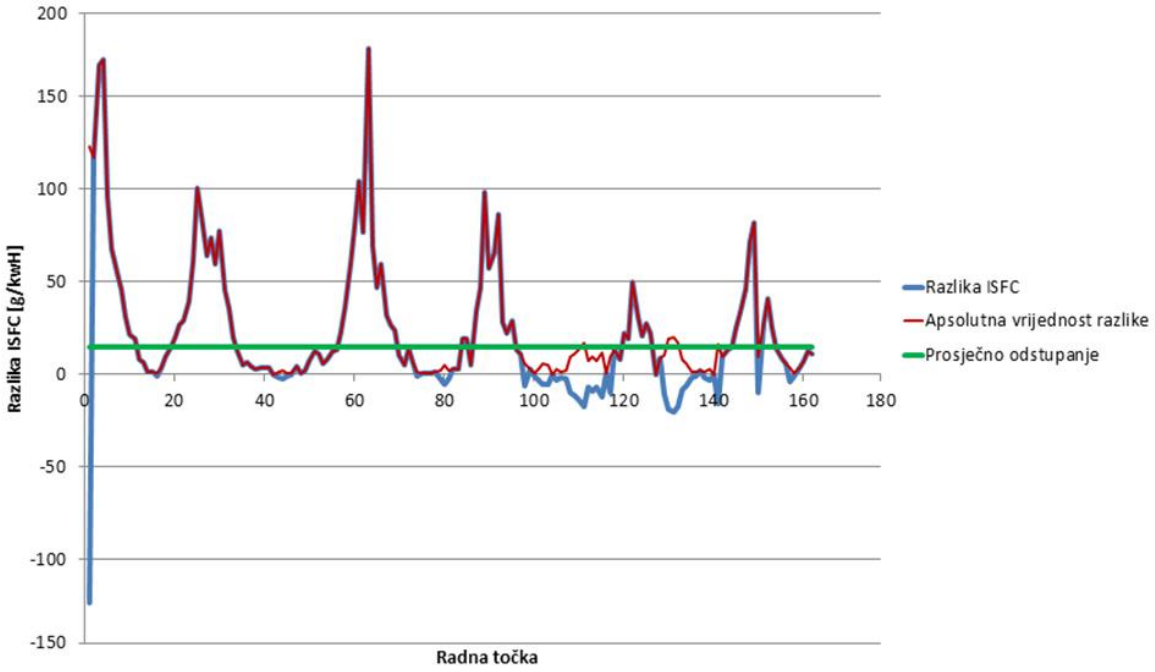
Slika 44. Usporedba indicirane specifične potrošnje goriva.

Vidimo da je poklapanje u rezultatima poprilično dobro, a na slici su dodatno označene brojevima 1 do 5 točke sa nešto većim odstupanjima. Utvrdili smo da je u svim točkama riječ o najmanjoj razini opterećenja za pripadajuću brzinu vrtnje, što može značiti da simulacijski model s ovakvim postavkama ima problema s preciznijim opisivanjem jako niskih opterećenja. Također možemo primijetiti velike vrijednosti koje daje eksperiment za najranije točke što upućuje na problem s eksperimentalnim rezultatima za najranije točke. Vrijednosti koje definiraju točke sa velikim odstupanjima, na slici [45] označene zelenim točkama, dane su u tablici. I točke neposredno prije i poslije navedenih točaka također imaju nisko opterećenje, a posljedično i velika odstupanja.

Tablica 41. Vrijednosti točaka sa velikim odstupanjem.

Broj točke na slici	Identifikacijski broj točke	Brzina vrtnje [o/min]	Srednji efektivni tlak [kPa]
1	27	1500	52
2	62	2500	50
3	92	3500	50
4	122	4500	50
5	149	5500	50

Prikazat ćemo i razliku između podataka dobivenih eksperimentom i rezultata koji daje simulacijski model. Također korisno je izračunati prosječno odstupanje u indiciranoj specifičnoj potrošnji, ono u ovom slučaju iznosi 15.11 [g/kWh]. U izračunu prosječnog odstupanja u rezultatima izostavili smo vrijednosti koje daju 5 točaka navedenih u tablici [41]. Rezultati su prikazani na slici [45].

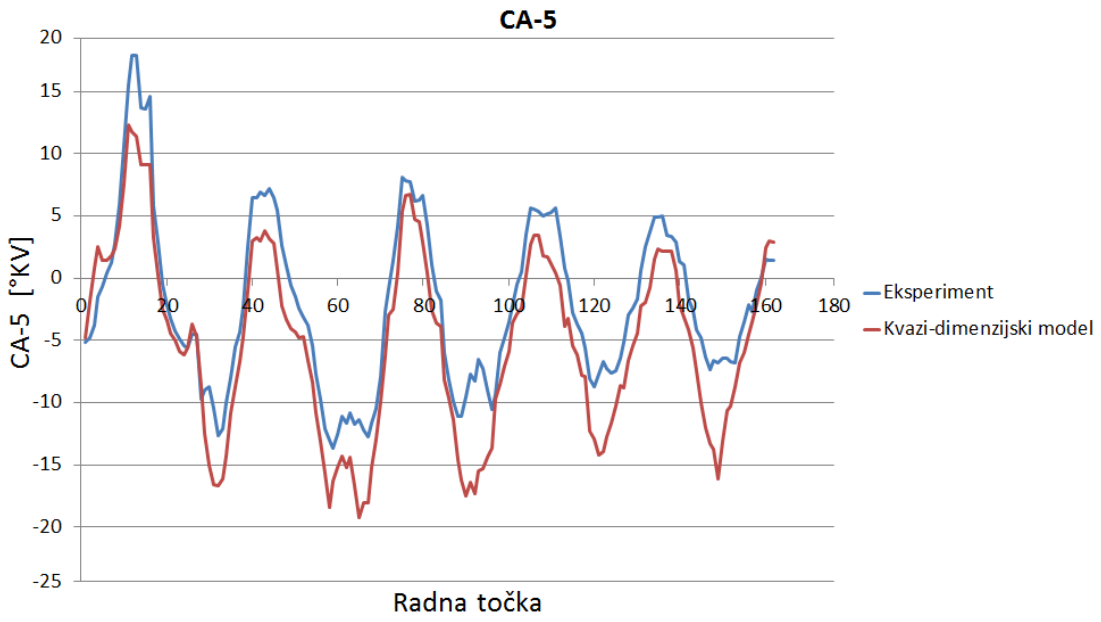


Slika 45. Razlika između eksperimentalnih i kvazi-dimenzijskih rezultata za ISFC te prosječna vrijednost odstupanja.

Prosječno odstupanje u rezultatima možemo izraziti i u postotku, a to ćemo dobiti ako odredimo postotno odstupanje za svaku točku, zbrojimo vrijednosti za sve točke i podijelimo s ukupnim brojem točaka. Na ovaj način dobili smo da je prosječno odstupanje indicirane specifične potrošnje između rezultata kvazi-dimenzijskog modela i eksperimentalnih podataka **5.51%**.

6.4.2. CA5

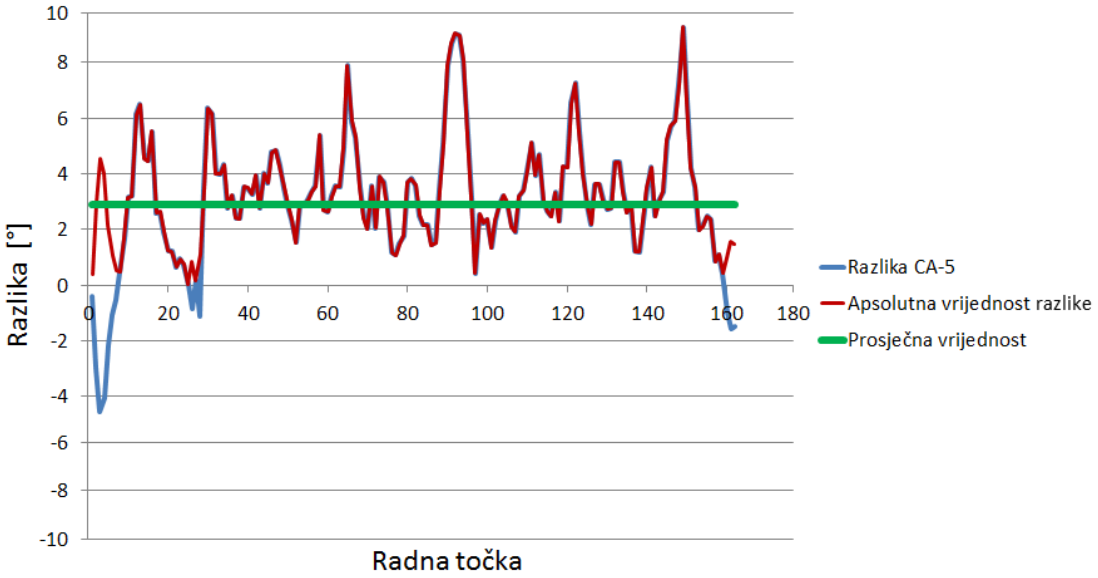
Podatak CA5 predstavlja kut zakreta koljenastog vratila kod kojeg je izgorilo 5% ukupne mase goriva u cilindru. Ugrubo bi ovaj podatak mogao označavati početak turbulentnog izgaranja. Na slici [46] uspoređene su vrijednosti CA5 dobivene kvazi-dimenzijskim modelom sa podacima iz eksperimenta.



Slika 46. Usporedba CA5.

Vidimo da su rezultati podudarni, a veća od stupanja prisutna su na istim točkama kao i kod specifične potrošnje goriva, pa ih možemo pripisati već spomenutim problemima kada je opterećenje motora premalo. Možemo još prikazati i razliku gore prikazanih krivulja, te izračunati prosječno odstupanje u rezultatima.

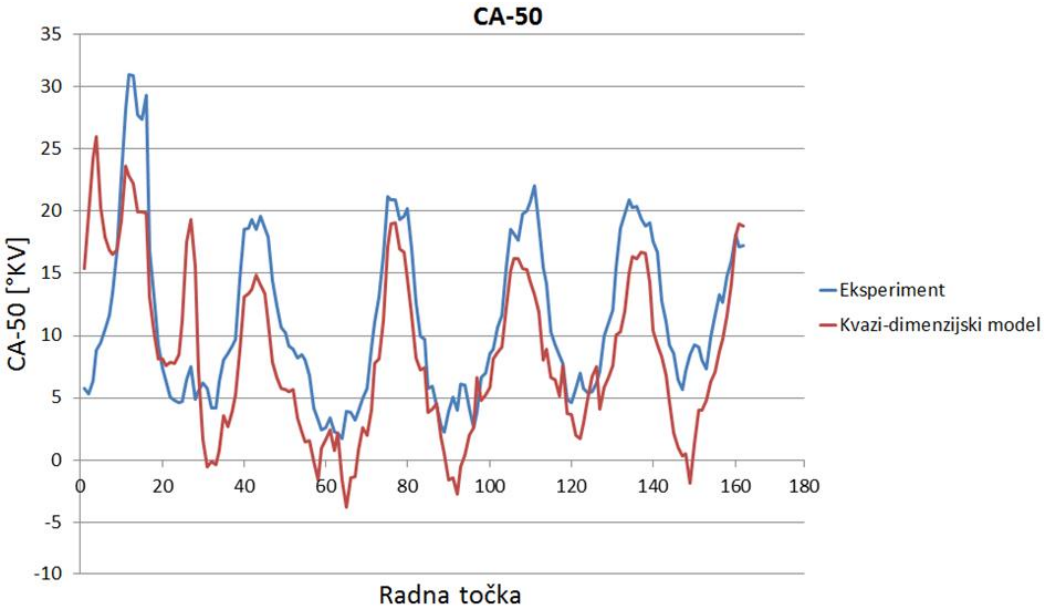
Prosječno odstupanje odredit ćemo tako da zbrojimo apsolutne vrijednosti razlike dviju krivulja za sve 162 točke pa onda tu vrijednost zbroja podijelimo sa brojem točaka. Ako izuzmemo ranije spomenute točke koje su problematične dobijemo prosječnu vrijednost odstupanja od **2.88**°. Razlika između eksperimentalnih podataka i podataka koje daje kvazi-dimenzijski model kao i prosječno odstupanje u rezultatima prikazani su na slici [47].



Slika 47. Razlika između kvazi-dimenzijskih i eksperimentalnih podataka za CA5 te prosječna vrijednost.

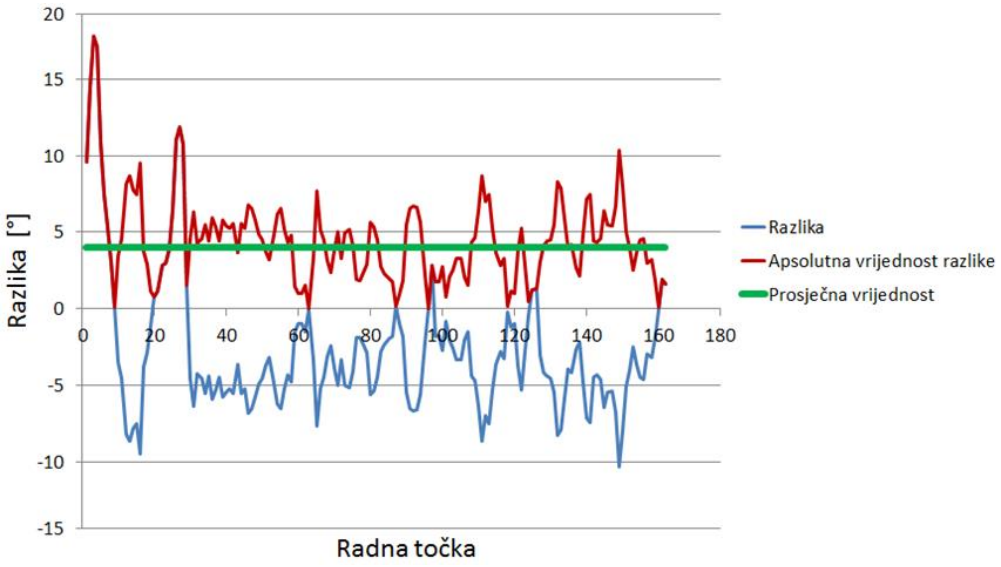
6.4.3. CA50

Podatak CA50 predstavlja kut zakreta koljenastog vratila pri kojem je izgorilo 50% mase goriva u cilindru, naziva se još i težištem izgaranja. Iskustveno znamo da bi najbolje bilo da je kod Ottovih motora težište izgaranja oko 10° iza gornje mrtve točke jer je tada indicirani rad procesa najveći. Usporedba eksperimentalnih podataka za CA50 i podataka dobivenih kvazi-dimenzijskim modelom prikazana je na slici [48].



Slika 48. Usporedba CA50.

Ponovno je u točkama sa niskim opterećenjem odstupanje povećano. Prikazat ćemo još, na slici [49], razliku i prosječno odstupanje u rezultatima koje iznosi 3.9°.



Slika 49. Razlika između kvazi-dimenzijskih i eksperimentalnih podataka za CA50.

7. Zaključak

U ovom radu analizirali smo fizikalno zakašnjenje paljenja, pojavu vezanu za proces izgaranja u Ottovom motoru. Poznavanje fizikalnog zakašnjenja paljenja važno je zbog optimizacije procesa izgaranja, a kao rezultat u poboljšanju procesa izgaranja očekujemo manju potrošnju goriva, manje štetnih emisija te povećano iskorištenje kapaciteta motora. Kao presudan alat u optimizaciji koriste se računalne simulacije, a ovome radu koristili smo simulacijski paket AVL BOOST^{TM} u kojem smo izradili model odabranog motora te primijenili pod-model rasta jezgre plamena koji se koristi za detaljno opisivanje procesa izgaranja. Iz simulacijskih rezultata izračunali smo zakašnjenje paljenja na dva načina; iz profila tlakova u cilindru i kao gotov rezultat modela rasta jezgre plamena. Zatim smo proveli analizu ulaznih parametara kvazi-dimenzijskog pod-modela kako bi dobili najbolju kombinaciju parametara, time i najmanje odstupanje od zakašnjenja izračunatog iz profila tlakova.
Pokazalo se da je kvazi-dimenzijski model rasta jezgre plamena, uz pravilno postavljene ulazne parametre, odličan alat za opisivanje procesa izgaranja jer značajno olakšava izračun i smanjuje vrijeme potrebno za izračun. Na kraju smo rezultate kvazi-dimenzijskog modela usporedili sa eksperimentalnim podacima. Prosječna odstupanja koja dobijemo primjenom računalnih simulacija prihvatljiva su, te možemo reći da primijenjene modele poželjno koristiti u opisivanju i optimiranju procesa u motorima sa unutarnjim izgaranjem, zbog njihovih mogućnosti i prihvatljive cijene.

Neka od odstupanja u rezultatima navest ćemo još jednom na kraju:

Prosječno odstupanje kvazi-dimenzijskog modela rasta jezgre plamena u odnosu na rezultate zakašnjenja paljenja dobivene iz profila tlakova je **17.75%** uz mogućnost drastičnog poboljšanja ako bi sve promatrane točke bile dobro opisane.

Prosječno odstupanje kvazi-dimenzijskog rezultata u odnosu na rezultate indicirane specifične potrošnje dobivene eksperimentalnim putem je **5.51%**.

Prosječno odstupanje kvazi-dimenzijskog rezultata u odnosu na rezultate CA5 dobivene eksperimentalnim putem je **2.88°**.

Prosječno odstupanje kvazi-dimenzijskog rezultata u odnosu na rezultate CA5 dobivene eksperimentalnim putem je **3.9°**.

Možemo zaključiti da je primjena simulacija u razvoju i optimiranju motora sa unutarnjim izgaranjem odličan način da se uštedi vrijeme i novac, ali i da se postigne napredak koji bez njih ne bi bio moguć.

LITERATURA

[1] Momir Sjerić: *New physically based sub-models for the cycle-simulation of spark-ignition engine.* Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, 2014.Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.

[2] Sjerić ,Kozarac , Tatschl: *Modelling of early flame kernel growth towards a better understanding of cyclic combustion variability in SI engines.* Energy Convers. Manage., 103, 895–909, 2015.

[3] Sjerić, Taritaš, Kozarac:Effect of Spark Plug Geometry on the Cyclic Combustion Variability and Fuel Consumption of Gasoline Engines. Energy Conversion and Management 103 (2015) 895–909

[4] Mahalec, Lulic, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, 2016.