

# Numerička analiza utjecaja geometrijskih i radnih parametara na pojavu detonacije u Ottovom motoru

---

**Savović, Borna**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:235:630045>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Borna Savović

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Student:

Borna Savović

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru, prof. dr. sc. Darku Kozarcu koji me svojim znanjem vodio kroz pisanje završnog rada, ukazivao mi na greške, sugerirao poboljšanja te motivirao i davao korisne savjete.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i bližnjima koji su mi bili podrška, kako emocionalno tako i financijski u svim trenucima kada je bilo dobrih ali i loših trenutaka kroz moj studij.

Borna Savović



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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum: 02-02-2018  | Prilog |
| Klasa: 602-01/18-G/3   |        |
| Ur.broj: 15-1703-18-86                                       |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Borna Savović**

Mat. br.: 0035194446

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza utjecaja geometrijskih i radnih parametara na pojavu detonacije u Ottovom motoru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of influence of design and operating parameters on occurrence of knock in a spark ignited engine**

Opis zadatka:

Numeričke simulacije postale su sastavni dio svakog razvoja motora i mogu se između ostalog koristiti za analizu utjecaja raznih parametara na promjene značajki rada motora.

U ovom radu potrebno je primjenom simulacijskog alata istražiti utjecaj geometrijskih i radnih parametara Ottovog motora na sklonost pojavi detonaciji. U radu je potrebno primijeniti cikličke simulacije u kojima se strujanje radnog medija van cilindra razmatra tzv. 1D CFD proračunom dok se promjene stanja unutar cilindra razmatraju 0D proračunom. U analizu je potrebno uključiti utjecaj kompresijskog omjera, temperature rashladnog medija, nabijanja, početka izgaranja, opterećenja te brzine vrtnje motora.

U radu je potrebno:

- napraviti pregled literature iz područja detonacije Ottovih motora,
- odabrati motor na kojem će se provesti analiza,
- izraditi model odabranog motora u programskom paketu AVL Boost™,
- verificirati osnovni model i provesti proračun za raspon brzina vrtnje i opterećenja,
- parametrizirati model na način da omogući promjenu željenih geometrijskih i radnih parametara,
- provesti zadane simulacije,
- analizirati dobivene rezultate i izvesti zaključke.

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

Zadatak zadan:  
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:  
1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

**SADRŽAJ:**

|  |      |
|--|------|
| SAŽETAK .....  | VIII |
| 1. Uvod .....  | 1    |
| 1.1. Motori s unutarnjim izgaranjem .....                                    | 1    |
| 1.2. Izgaranje .....   | 1    |
| 1.3. Izgaranje u Ottovom motoru .....  | 2    |
| 1.4. Detonacija .....  | 3    |
| 1.5. Cilj rada .....   | 5    |
| 2. Proračunski model .....   | 6    |
| 2.1. Programski paket AVL Boost .....  | 6    |
| 2.1.1. Opće značajke proračunskog modela u AVL Boostu .....                  | 6    |
| 2.1.2. Vibeov dvozonski model izgaranja .....                                | 8    |
| 2.1.3. Model detonacija .....  | 9    |
| 3. Modeliranje i ispitivanje .....   | 11   |
| 3.1. Postava ispitivanja .....   | 11   |
| 3.2. Rezultati dobiveni na motoru bez promjene parametara .....              | 11   |
| 3.3. Parametri u Boostu koji će opisivati promjenu traženih parametara ..... | 12   |
| 3.4. Promjena parametara .....   | 13   |
| 4. Rezultati .....   | 14   |
| 4.1. Promjena kompresijskog omjera .....                                     | 14   |
| 4.2. Promjena kuta pretpaljenja .....  | 23   |
| 4.3. Promjena temperature stijenke cilindra .....                            | 32   |
| 4.4. Nabijanje .....   | 40   |
| 5. Zaključak .....   | 48   |
| 6. Literatura .....  | 49   |

**POPIS SLIKA:**

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Ovisnost porasta tlaka o kutu zakreta koljenastog vratila prilikom izgaranja .....                                      | 2  |
| Slika 2. Prikaz turbulentnog pred-miješanog plamena .....  | 3  |
| Slika 3. Sastav smjese prilikom izgaranja.....   | 3  |
| Slika 4. Detonantno izgaranje .....  | 4  |
| Slika 5. Shema modela u programu .....   | 7  |
| Slika 6. Utjecaj promjene značajke izgaranja na udio izgorene mase goriva (lijevo) i na brzinu oslobađanja topline (desno) ..... | 9  |
| Slika 7. Izraz za računanje oktanskog broja.....   | 10 |
| Slika 8. Krivulje efektivne snage za sva opterećenja bez promjene parametara .....   | 11 |
| Slika 9. Krivulje efektivnog momenta za sva opterećenja bez promjene parametara .....  | 12 |
| Slika 10. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 100% opterećenja .....                      | 14 |
| Slika 11. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 100% opterećenja.....                | 15 |
| Slika 12. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na.....                            | 15 |
| Slika 13. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja .....                       | 16 |
| Slika 14. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja.....                 | 17 |
| Slika 15. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja.....     | 17 |
| Slika 16. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja .....                       | 18 |
| Slika 17. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja.....                 | 19 |
| Slika 18. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja.....     | 19 |
| Slika 19. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja .....                       | 20 |

---

|  |    |
|--|----|
| Slika 20. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja.....             | 20 |
| Slika 21. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja..... | 21 |
| Slika 22. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja.....                    | 21 |
| Slika 23. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja.....             | 22 |
| Slika 24. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja..... | 22 |
| Slika 25. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja.....                      | 23 |
| Slika 26. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja.....               | 24 |
| Slika 27. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja.....          | 24 |
| Slika 28. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja.....                       | 25 |
| Slika 29. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja.....                | 25 |
| Slika 30. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja.....    | 26 |
| Slika 31. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja.....                       | 26 |
| Slika 32. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja.....                | 27 |
| Slika 33. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja.....           | 27 |
| Slika 34. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja.....                       | 28 |



|  |    |
|--|----|
| Slika 35. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja .....                         | 29 |
| Slika 36. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja .....             | 29 |
| Slika 37. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja .....                                | 30 |
| Slika 38. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja .....                         | 30 |
| Slika 39. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja .....             | 31 |
| Slika 40. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 100% opterećenja.....                    | 32 |
| Slika 41. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 100% opterećenja.....             | 32 |
| Slika 42. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 100% opterećenja.....        | 33 |
| Slika 43. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja.....                     | 33 |
| Slika 44. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja.....              | 34 |
| Slika 45. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja ..... | 34 |
| Slika 46. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja.....                     | 35 |
| Slika 47. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja .....             | 36 |
| Slika 48. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja.....  | 36 |
| Slika 49. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja.....                     | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 50. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja .....            | 37 |
| Slika 51. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja..... | 38 |
| Slika 52. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja.....                    | 38 |
| Slika 53. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja .....            | 39 |
| Slika 54. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja..... | 39 |
| Slika 55. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja .....   | 40 |
| Slika 56. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja ....   | 40 |
| Slika 57. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja .....                            | 41 |
| Slika 58. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja .....  | 41 |
| Slika 59. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja .....   | 42 |
| Slika 60. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja .  | 42 |
| Slika 61. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja .....  | 43 |
| Slika 62. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja .....   | 44 |
| Slika 63. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja .....                             | 44 |
| Slika 64. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja .....  | 45 |
| Slika 65. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja .....   | 45 |
| Slika 66. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja .....                             | 46 |
| Slika 67. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja .....  | 46 |
| Slika 68. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja .....   | 47 |
| Slika 69. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja .....                             | 47 |

## **POPIS TABLICA:**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Karakteristike motora.....                       | 7  |
| Tablica 2. Promjena radnih i geometrijskih parametara ..... | 13 |

**POPIS OZNAKA:**

| Oznaka       | Jedinica                 | Opis   |
|--------------|--------------------------|--|
| $\alpha$     | [°KV]                    | Kut zakreta KV   |
| $\Theta$     | [°C]                     | Temperatura  |
| $\lambda$    | $[\frac{kg_{zr}}{kg_s}]$ | Faktor pretička zraka  |
| D            | [mm]                     | Promjer klipa  |
| $g_e$        | $[\frac{g}{kWh}]$        | Specifična efektivna potrošnja goriva                        |
| H            | [mm]                     | Hod klipa  |
| $H_d$        | [kJ/kg]                  | Donja ogrjevna vrijednost goriva                             |
| $H_s$        | [kJ/kg]                  | Ogrjevna vrijednost gorive smjese                            |
| M            | [Nm]                     | Okretni moment   |
| $m_G(t)$     | [kg]                     | Masa goriva koje je izgorjelo od t=0 do promatranog trenutka |
| $m_{G,proc}$ | [kg]                     | Ukupna količina goriva koje izgori po procesu                |
| n            | $[\frac{1}{min}]$        | Brzina okretaja  |
| P            | [W]                      | Snaga  |
| $p_e$        | [Pa]                     | Efektivni tlak   |
| T            | [-]                      | Broj taktova   |
| t            | [s]                      | Vrijeme koje je proteklo od početka izgaranja                |
| $t_{izg}$    | [s]                      | Ukupno trajanje izgaranja                                    |
| $x(\alpha)$  | $[\frac{kg}{kg}]$        | Udio izgorjele mase goriva u ovisnosti o kutu zakreta KV     |
| $V_H$        | $[mm^3]$                 | Radni volumen  |
| z            | [-]                      | Broj cilindara   |
| $Z_0$        | $[\frac{kg_z}{kg_G}]$    | Stehiometrijska količina zraka za izgaranje                  |

## SAŽETAK

Detonacija je neželjeni način izgaranja koji se najčešće javlja na motorima s Ottovim procesom izgaranja. Intenzitet detonacija može biti blaže prirode i očitovati se vibracijama u motoru i pojačanim zagrijavanjem komponenata, a može biti i intenzivnije prirode što u vrlo kratkom periodu može dovesti do havarije motora.

Na pojavu detonacije u radu Ottovih motora utječu razni geometrijski i radni parametri. Najvažniji su trenutak prepaljenja, kompresijski omjer i faktor pretička zraka.

U svrhu numeričke analize utjecaja promjene geometrijskih i radnih parametara na pojavu detonacije u Ottovom motoru korišten je programski paket AVL Boost. Sva ispitivanja su provedena za pet različitih opterećenja (20, 40, 60, 80 i 100%) na modelu motora koji je prethodno napravljen. Analizira se utjecaj promjene kompresijskog omjera, početka izgaranja, temperature rashladnog medija, nabijanja, opterećenja te brzine vrtnje motora na povećavanje, odnosno smanjenje sklonosti pojave detonacije u radu Ottovog motora.

Ključne riječi: detonacija, geometrijski i radni parametri, numerička analiza.

## **SUMMARY**

A knock is an unwanted type of combustion which usually occurs in engines with Otto cycle process. The intensity of knock can be smaller and cause vibrations and overheating or, in case of its higher intensity, it can be potentially devastating and cause failure of the engine in a very short time.

The occurrence of the knock is influenced by various geometrical and working parameters. The most important of them are: time of ignition, compression ratio and air to fuel ratio.

For the purpose of the numerical analysis of the influence of changing geometrical and working parameters on the occurrence of the knock in Otto engines, the computer program AVL Boost has been used. All tests have been made for five different loads of engine (20, 40, 60, 80 i 100%) on model of engine which had previously been made. The influence of changing of compression ratio, start of ignition, temperature of cooling liquid, supercharging, load of engine, rotation speed on the increase or decrease in the chance of the knock is analysed.

Keywords: knock, geometrical and working parameters, numerical analysis.

# 1. Uvod

## 1.1. Motori s unutarnjim izgaranjem

U današnje vrijeme su cestovna vozila neizostavan dio svakodnevice. Većina cestovnih vozila su pogonjena motorima s unutarnjim izgaranjem u kojima se vođenjem procesa izgaranja kemijska energija sadržana u gorivu izgaranjem pretvara u toplinu te se ta toplina pretvara u mehanički rad. Goriva koja se uglavnom koriste za pokretanje motora s unutarnjim izgaranjima su motorni benzin, dizel i ukapljeni naftni plin te se prema tome motori dijele na motore sa stranim izvorom paljenja gorive smjese (Otto motori) i na motore sa samozapaljenjem gorive smjese (Dieselovi motori). Tema ovog završnog rada će biti motori sa stranim izvorom paljenja gorive smjese te granica opteretivosti istih kod koje je rad motora još uvijek miran.

## 1.2. Izgaranje

Motorni benzin je gorivo koje se uglavnom sastoji od ugljika (C) i vodika (H) koji se nalaze u ugljikovodičnim spojevima. Osim ugljikovodičnih spojeva u gorivu se nalaze u manjem omjeru razni aditivi za poboljšanje karakteristika goriva.

Proces izgaranja je proces oksidacije goriva. Ulaganjem toplinske energije u lance ugljikovodika dolazi do njihovog kidanja te ugljik i vodik oksidiraju u produkte izgaranja – ugljikov dioksid i vodu. Samom oksidacijom se kemijska energija sadržana u molekulama pretvara u toplinsku energiju. Dio oslobođene toplinske energije se pretvara u koristan rad motora dok ostatak služi sa savladavanje gubitaka u motoru ili se odvodi kroz hlađenje motora.

Svi elementi teže potpunom izgaranju u procesu izgaranja što zbog raznih uvjeta nije ostvareno. U ispuhu uvijek ima elemenata koji nisu u potpunosti oksidirali poput ugljikovog monoksida (CO) i neizgorjelih ugljikovodika (HC) koji su otrovni te štetni za okoliš. Do potpunog izgaranja ne dolazi zbog toga što kemijske pretvorbe za vrijeme izgaranja nikad nisu izravne. Od početnog elementa do njegovog konačnog rezultata izgaranja se vodi veći broj parcijalnih kemijskih reakcija s većim brojem sudionika izgaranja. Ako element završi u području uz stijenku cilindra s graničnim slojem u kojem je temperatura niža ili ako se kemijske reakcije vode pri kraju procesa izgaranja, okolina nema dovoljno visoku temperaturu pri kojoj bi sudionici izgaranja mogli sagorjeti u svoje konačne produkte.

Količina energije koja se može osloboditi izgaranjem goriva je određena donjom ogrjevnom vrijednosti gorive smjese  $H_s$ . To je podatak koji govori koliko se energije može osloboditi izgaranjem 1 kg smjese. On ovisi o količini zraka u gorivu i ogrjevnoj vrijednosti samog goriva  $H_d$ . Količina zraka u gorivoj smjesi je izražena preko faktora pretička zraka  $\lambda$ . Ogrjevna vrijednost smjese se računa pomoću izraza:

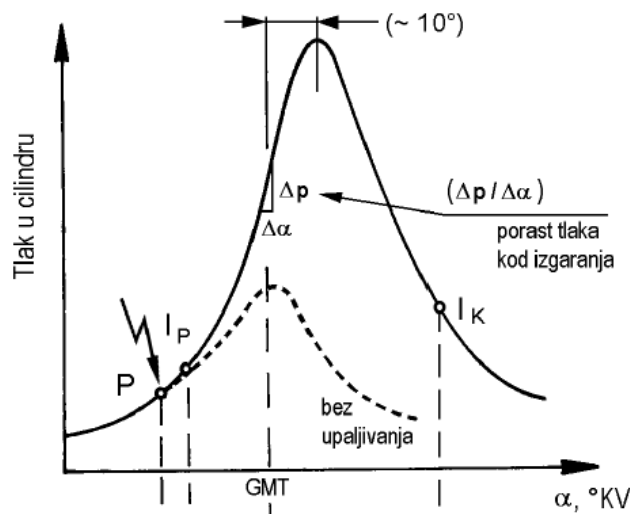
$$\text{za } \lambda \geq 1 \quad H_s = \frac{H_d}{1+\lambda \cdot Z_0}, \text{ kJ/kg gorive smjese} \quad (1)$$

$$\text{za } \lambda < 1 \quad H_s = \frac{H_d \cdot \lambda}{1+\lambda \cdot Z_0}, \text{ kJ/kg gorive smjese} \quad (2)$$

$Z_0 \left[ \frac{\text{kgZ}}{\text{kgG}} \right]$  - Stehiometrijska količina zraka za izgaranje

### 1.3. Izgaranje u Ottovom motoru

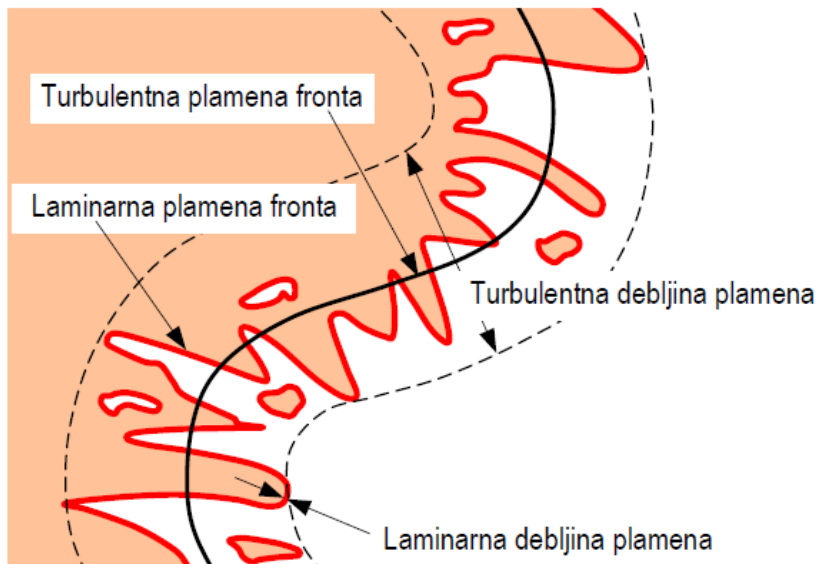
Zbog korištenja katalizatora motori teže radu sa stehiometrijskim omjerom zraka. To je uvjet za pravilan rad trokomponentnog katalizatora koji je preduvjet za ekološki prihvatljiv rad motora. Gorivo se kroz sapnice ubrizgava u usisani zrak te se miješa s njim u što je moguće više homogenu smjesu. To se postiže tako da se gorivo u zrak ubrizgava u obliku usitnjenih kapljica i ravnomjerno se širi kroz usisani zrak te smjesa ulazi u takvom obliku u cilindar u taktu usisa.



Slika 1. Ovisnost porasta tlaka o kutu zakreta koljenastog vratila prilikom izgaranja

Pri kraju takta kompresije kada smjesa ima već povećani tlak i temperaturu dolazi do preskakanja iskre na svjećici u cilindru. Svjećice su smještene na mjestu u cilindru gdje im je omogućen direktan i pouzdan pristup gorivoj smjesi. Trenutak preskakanja iskre se naziva kut prepaljenja. Njen položaj u odnosu na gornju mrtvu točku ovisi o brzini vrtnje motora, opterećenju i temperaturi motora. Nakon preskakanja iskre dolazi do zakašnjenja paljenja. U toj fazi gori samo smjesa u neposrednoj blizini svjećice i time stvara jezgru izgaranja. U točki  $I_p$  (prema slici 1.) dolazi do početka izgaranja. To je točka u kojoj dolazi do osjetnog porasta tlaka u odnosu na porast tlaka koji bi se dogodio da nema izgaranja. Plamen se kroz cilindar širi u obliku takozvanog turbulentnog pred-miješanog plamena te sam proces izgaranja završava u trenutku kada više nema dovođenja topline uslijed izgaranja (točka  $I_k$ , slika 1.). Turbulentni pred-miješani plamen se sastoji od laminarne fronte i turbulentne fronte koje su opisane laminarnom debljinom plamena i turbulentnom debljinom plamena kao što je prikazano na slici 2.

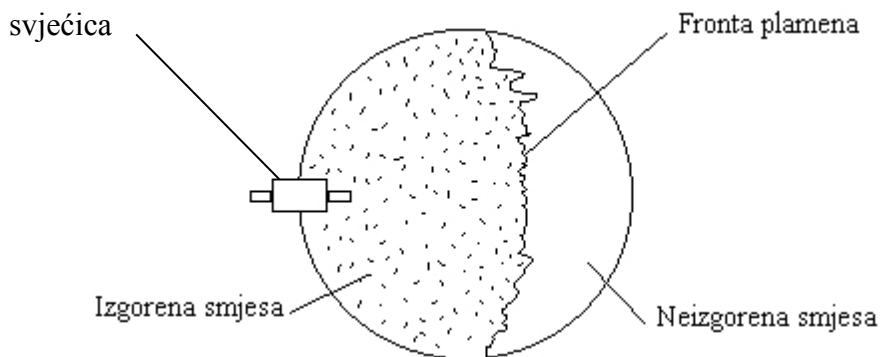




Slika 2. Prikaz turbulentnog pred-miješanog plamena

## 1.4. Detonacija

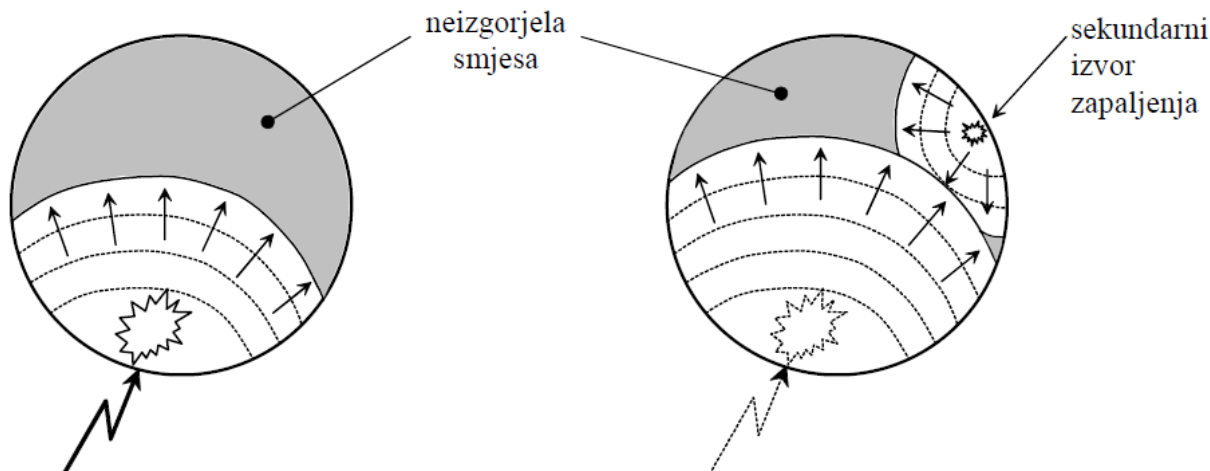
Prilikom izgaranja u cilindru se nalaze dva različita medija: neizgorjela masa i produkti izgaranja (slika 3.).



Slika 3. Sastav smjese prilikom izgaranja

Fronta plamena se širi iz smjera jezgre izgaranja stvorene preskakanjem iskre na svjećici prema neizgorjeloj masi i svojim širenjem provodi proces oksidacije molekula u neizgorjelom dijelu. Širenjem fronte plamena se povišuju tlak i temperatura u neizgorjelom dijelu i nakon završetka takta kompresije. Ako neizgorjeli dio dosegne temperaturu samozapaljenja dolazi do formiranja nove jezgre izgaranja iz koje se širi nova fronta plamena prema preostalom neizgorjelom dijelu smjese goriva. Obično su mjesta formiranja novih jezgri izgaranja područja s povećanom temperaturom poput zagrijanog ispušnog ventila, usijane gareži u motoru ili usijane elektrode svjećice. Pojava novih jezgri izgaranja višestruko ubrzava proces izgaranja što za posljedicu ima lokalno povišenje tlakova i pojavu tlačnih valova koji se šire prostorom izgaranja

i uzrokuju vibracije u motoru sudaranjem sa stijenka cilindara. Takav način izgaranja naziva se detonantno izgaranje. Velikom porastom tlaka za vrijeme detonantnog izgaranja dolazi i do velikog porasta temperature te toplinskog opterećenja stijenki koje omeđuju prostor izgaranja. Stijenke cilindra time nisu previše pogođene dok je klip koji je izrađen od lakših legura iznimno toplinski opterećen te je u opasnosti od progorijevanja. Zbog povećanja razvijenog tlaka je opterećena i klipnjača koja preuzima opterećenje koje izaziva taj tlak i može doći do deformacije ili pucanja ali to je rjeđa posljedica detonantnog izgaranja. Na povećanje ili smanjenje sklonosti motora prema detonantnom izgaranju utječu razni geometrijski ili radni parametri.



Slika 4. Detonantno izgaranje

### Parametri koji povećavaju mogućnost pojave detonacije

- Visok kompresijski omjer
- Povećano opterećenje motora
- Veliki kut prepaljenja
- Temperatura stijenki cilindra, ispušnog ventila
- Tlak zraka na usisu (nabijanje)
- Komore s dugim putem izgaranja motora
- Čađa
- Položaj svjeće
- Malen oktanski broj goriva

Visok kompresijski omjer povećava početni tlak i temperaturu iz kojeg kreće proces izgaranja. Fronta plamena u tom slučaju povećava već dodatno povećani tlak u neizgorenom dijelu smjese i veća je mogućnost dosezanja kritičnog iznosa tlaka, a samim time i dosezanje kritične temperature samozapaljenja.

Povećano opterećenje motora povećava mogućnost pojave detonacije zato što se povisuje temperatura u neizgorenom dijelu smjese goriva i zraka. Povećuje se početni tlak smjese i prilikom izgaranja smjesa lakše doseže kritičnu temperaturu samozapaljenja.

Povećavanjem kuta pretpaljenja se približava položaj težišta izgaranja T gornjoj mrtvoj točki. U tom slučaju imamo povećanje tlaka u smjesi zbog komprimiranja smjese klipom motora i rapidno povećanje tlaka zbog izgaranja. To dovodi do izrazito povećane temperature u neizgorenom dijelu smjese.

Temperatura stijenki cilindra mora biti što niža zato što se širenjem fronte plamena povećava temperatura neizgorene smjese. Ukoliko bi bilo loše odvođenje topline sa stijenki cilindara tada bi temperatura narasla u pojedinim područjima ploha koje omeđuju prostor izgaranja i dodatno bi zagrijavalo neizgorenu smjesu što može rezultirati dosezanjem kritične temperature samozapaljenja.

Prednabijanje utječe na detonaciju na isti način kao i kompresijski omjer. Daljnjom analizom u radu će biti utvrđeno koji od ta dva parametra više utječe na pojavu detonacije.

Komore s duljim putem izgaranja produžuju proces izgaranja i tako dolazi do povećanja temperature u neizgorenom dijelu smjese.

Čađa ima svojstvo isijavanja topline te zagrijava svoju okolinu.

Položaj svjećice može produljiti ili skratiti put izgaranja.

Oktanski broj određuje koliko je neko gorivo otporno na detonaciju. Veći oktanski broj znači i veću otpornost.

## 1.5. Cilj rada

Cilj ovoga rada je provesti numeričku analizu utjecaja promjene radnih i geometrijskih parametara na sklonost pojave detonacije u Ottovom motoru prilikom rada na raznim opterećenjima motora te pri različitim brzinama vrtnje. Analiza se provodi u programskom paketu AVL Boost. Analizira se utjecaj promjene kompresijskog omjera, temperature rashladnog medija, nabijanja, početka izgaranja, opterećenja te brzine vrtnje motora.

## 2. Proračunski model

### 2.1. Programski paket AVL Boost

Računalne simulacije su u današnje vrijeme neizostavan dio svakog procesa konstruiranja. One služe za to da se u ranim fazama razvoja nekog sustava uoče i otklone potencijalne greške. Izrada odgovarajućih modela sustava te provođenje simulacija može otkriti greške u ranim fazama konstruiranja koje bi se bez primjene simulacija otkrile tek u kasnijim fazama izrade prototipa. Otkrivanje i uklanjanje grešaka u ranim fazama značajno pojeftinjuje i ubrzava proces konstruiranja bilo kojeg proizvoda.

Računalne simulacije se temelje na matematičkim modelima te služe za razumijevanje procesa, identifikaciju ključnih varijabli, predviđanje ponašanja, kao racionalna baza za inovacije i za regulaciju. Prema načinu vođenja proračuna, simulacije se dijele se na MKE – Metodu konačnih elemenata, CFD – Računalnu dinamika fluida, rane metode rješavanja sustava diferencijalnih jednadžbi (dinamika) i na termodinamičke proračune (0D-CFD)

AVL Boost je baziran na metodi konačnih volumena za strujanje radnog medija (1-D) i na termodinamičkim proračunima procesa izgaranja i izmjene topline s okolinom (0-D). Termodinamički procesi se dalje dijele na jednozonske ili višezonske, tema ovog rada će konkretno biti dvozonska podjela o kojoj će riječ biti kasnije.

#### 2.1.1. Opće značajke proračunskog modela u AVL Boostu

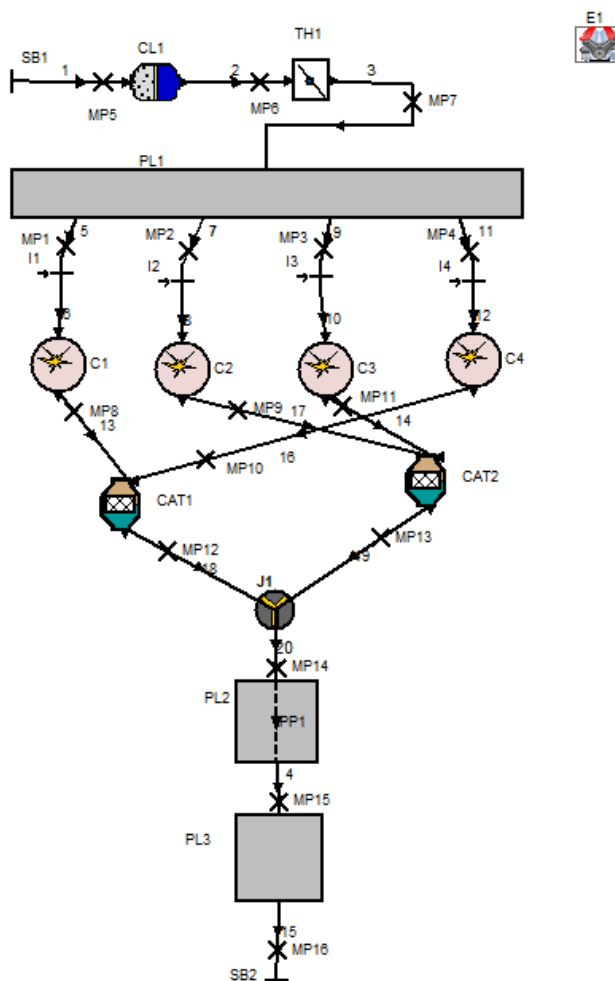
Kao početnu arhitekturu za izradu modela je uzet N46B20 Ottov motor od BMW-a. Radi se o četverocilindarskom rednom motoru s Valvetronic sustavom razvodnog mehanizma.

Regulacija opterećenja u ovom motoru se vodi skraćivanjem trajanjem usisa te se tako smanjuje površina razvodnog dijagrama. Prednost takvog načina je što u usisnoj cijevi ne nastaje podtlak koji nastaje u motorima s usisnom zaklopkom na djelomičnom opterećenju. Nepostojanje podtlaka u usisnoj cijevi smanjuju gubitke i povećava učinkovitost motora.

Kao što je prethodno navedeno, model izgaranja je Vibeov Dvozonski.

Tablica 1. Karakteristike motora

|                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Radni volumen            | 1995 cm <sup>3</sup>              |
| Hod klipa                | 90 mm                             |
| Promjer klipa            | 84 mm                             |
| Razmak između cilindara  | 91 mm                             |
| Izlazna snaga            | 105 kW pri 6000 okretaja u minuti |
| Izlazni moment           | 200 Nm pri 3750 okretaja u minuti |
| Maksimalna brzina vrtnje | 6500 1/min                        |
| Kompresijski omjer       | 10                                |
| Ventila po cilindru      | 4                                 |
| Promjer usisnog ventila  | 32 mm                             |
| Promjer ispušnog ventila | 29 mm                             |
| Težina motora            | 138 kg                            |
| Duljina motora           | 490 mm                            |



Slika 5. Shema modela u programu

### 2.1.2. Vibeov dvozonski model izgaranja

Ovaj model izgaranja se temelji na tome da je prostor izgaranja podijeljen na 2 dijela: prostor koji sadrži izgorjelu smjesu zraka i goriva i prostor s neizgorenom smjesom.

Proračunski parametri u Vibeovom modelu izgaranja su značajka izgaranja  $m$  i trajanje izgaranja  $\alpha_{izg}$ .

Utrošak mase goriva tijekom procesa izgaranja opisuje se Vibeovom funkcijom  $x$ . Ta funkcija prikazuje koliko je u svakom trenu procesa izgaranja potrošeno goriva i definira se izrazom:

$$x(t) = \frac{m_G(t)}{m_{G,proc}} = 1 - e^{-C\left(\frac{t}{t_{izg}}\right)} \quad (3)$$

$m_G(t)$  – masa goriva koje je izgorjelo od  $t=0$  do promatranog trenutka

$m_{G,proc}$  – ukupna količina goriva koje izgori po procesu

$C$  – konstanta određena na temelju definiranog kraja izgaranja

$t$  – vrijeme koje je proteklo od početka izgaranja

$t_{izg}$  – ukupno trajanje izgaranja

Brzina oslobađanja topline  $\frac{dQ_f}{d\alpha}$  je definirana značajkom izgaranja  $m$  i duljinom izgaranja  $\alpha_{izg}$  u ovisnosti o utrošku mase goriva:

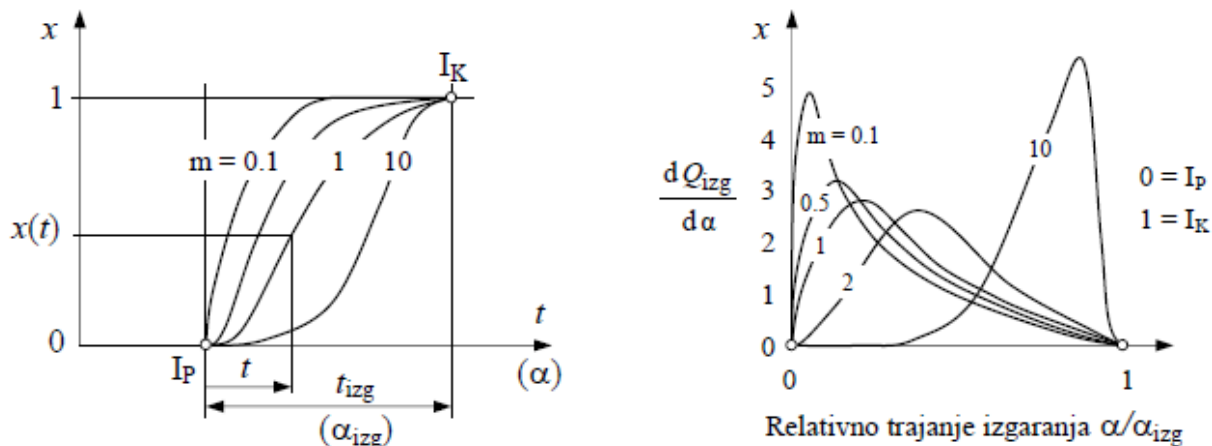
$$\frac{dQ_f}{d\alpha} = H_d * m_{G,proc} * \frac{dx}{d\alpha} \left[ \frac{J}{\text{°KV}} \right] \quad (4)$$

$\alpha$  [°KV] – kut zakreta KV

$x(\alpha)$   $\left[ \frac{kg}{kg} \right]$  – udio izgorjele mase goriva u ovisnosti o kutu zakreta KV

$H_d$   $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  – donja ogrjevna vrijednost goriva

$m_{G,proc}$  [kg] – masa goriva u cilindru po jednom odrađenom procesu



**Slika 6. Utjecaj promjene značajke izgaranja na udio izgorjene mase goriva (lijevo) i na brzinu oslobađanja topline (desno)**

Prednost korištenja Vibeovog modela je to što korisnik određuje samo dva parametra ( $m$  i  $\alpha_{izg}$ ) koji se mogu pronaći u AVL Boostovom priručniku za korisnike. Proračun se vrši brzo, jedina mana je što na tok i brzinu oslobađanja topline prostor izgaranja nema nikakvog utjecaja.

### 2.1.3. Model detonacija

Korišteni model detonacija je osnovni model za analizu detonacija iz programskog paketa. Analiza se provodi na temelju zakašnjenja upaljivanja smjese u odnosu na kraj procesa izgaranja. Zakašnjenje paljenja je vrijeme koje prođe od preskakanja iskre na svjećici u cilindru do početka izgaranja. Nakon preskakanja iskre se stvara jezgra samo u uskoj zoni oko svjećice te nakon dosezanja kritične temperature kreće fronta plamena. To vrijeme je otprilike konstantno te se proteže, ovisno o brzini vrtnje koljenastog vratila, preko manjeg ili većeg kuta zakreta. Zakašnjenje paljenja ovisi o tlaku i temperaturi na kraju kompresije, omjeru goriva i zraka, opterećenju motora te o oktanskom broju goriva koje se koristi u motoru. Ako je vrijeme trajanja zakašnjenja zapaljenja kratko onda raste opasnost od detonacije uslijed samozapaljenja smjese.

AVL Boost potreban oktanski broj goriva računa u ovisnosti o zakašnjenju zapaljenja prema izrazu:

$$\text{ON} = 100 \cdot \left( \frac{1}{A} \int_{t_{\text{SOC}}}^{t_{85\% \text{MBF}}} \left[ \left( \frac{P}{P_{\text{Ref}}} \right)^n \cdot \exp\left(-\frac{B}{T_{\text{UBZ}}}\right) \right] dt \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

**Slika 7. Izraz za računanje oktanskog broja**

ON predstavlja potreban oktanski broj za miran rad motora u zadanim uvjetima i režimima rada. Integral u prikazanom izrazu predstavlja vrijeme zakašnjenja paljenja te se dijeli s konstantom A koja predstavlja referentno vrijeme zakašnjenja zapaljenja. Referentni tlak predstavlja koliko je tlak na kraju kompresije veći ili manji od tlaka potrebnog za miran rad motora, te se ta vrijednost množi sa eksponentnom zagradom koja je vrijednost zadana od proizvođača.

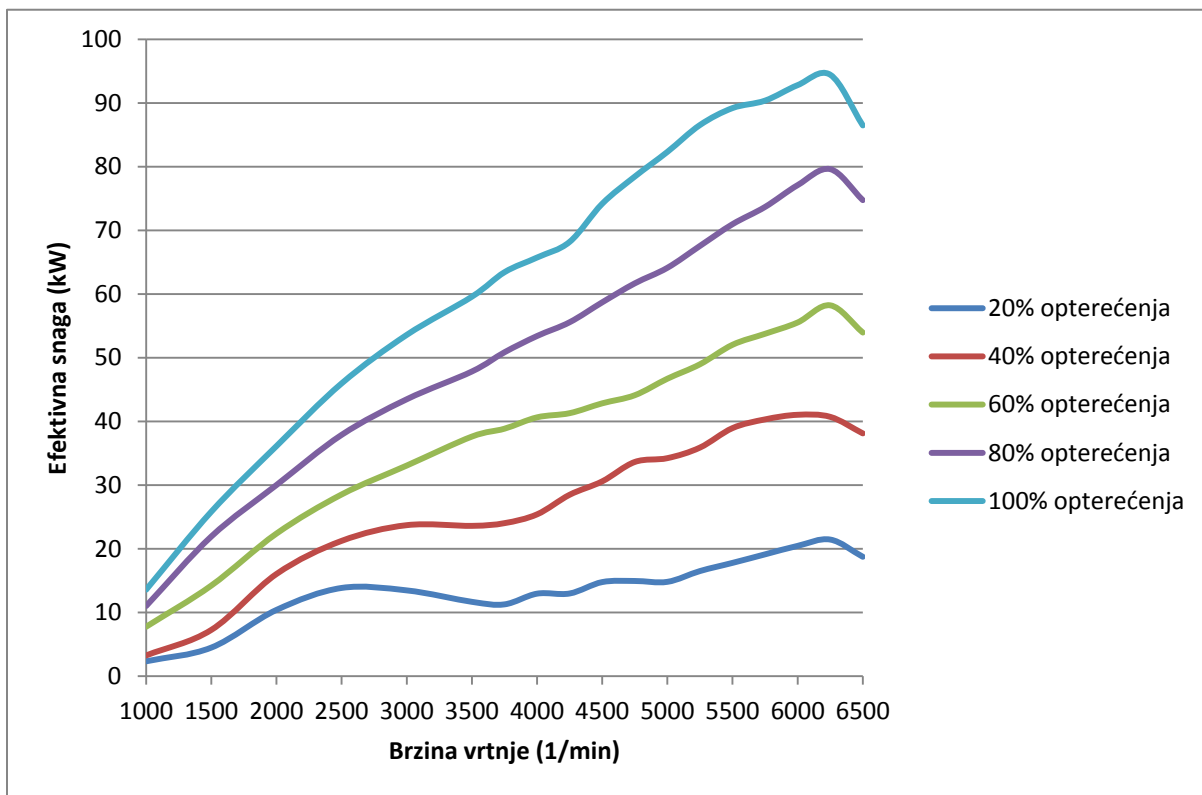


### 3. Modeliranje i ispitivanje

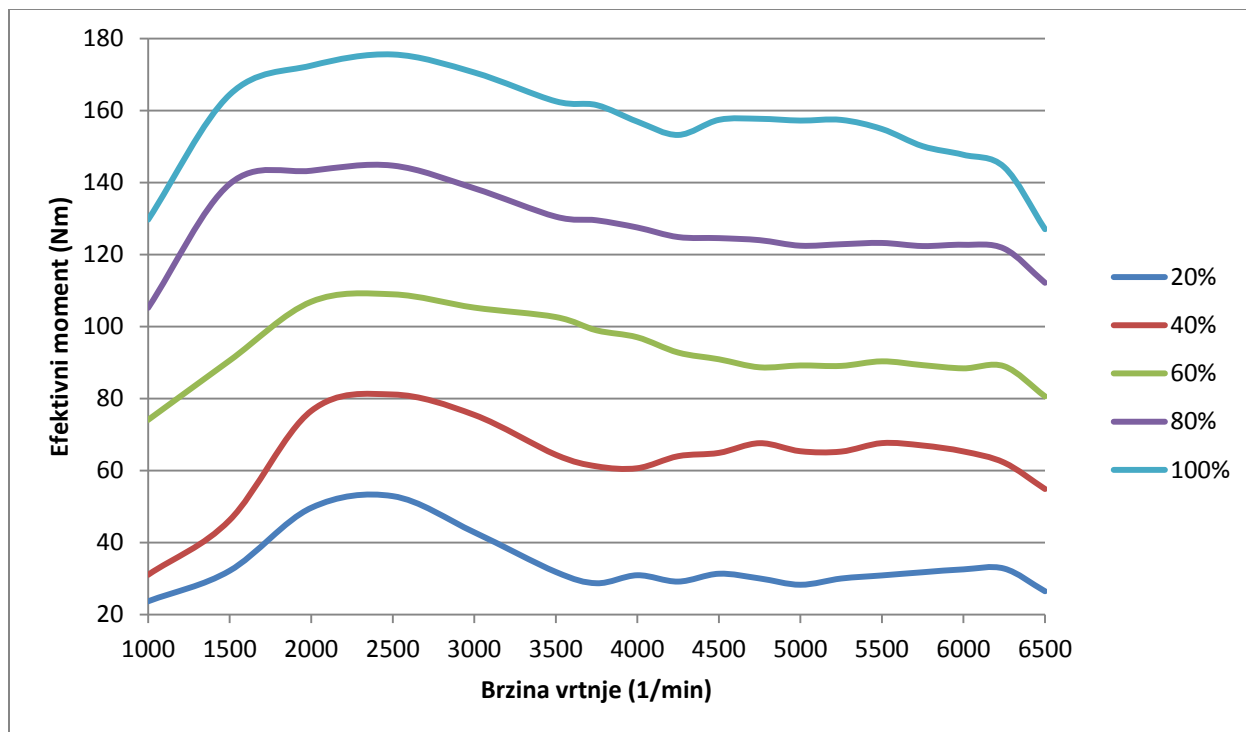
#### 3.1. Postava ispitivanja

U radu je potrebno istražiti utjecaj promjene geometrijskog parametra (promjene kompresijskog omjera) i radnih parametara (temperature rashladnog medija, nabijanja, početka izgaranja, opterećenja te brzine vrtnje motora) na sklonost pojave detonacije u motoru. Prvo je izrađen model motora prema arhitekturi motora N46B20 koji je na 5 različitih opterećenja (20, 40, 60, 80 i 100%) pri cijelom rasponu brzina vrtnje ( $1000\text{-}6500\text{ min}^{-1}$ ) radio s potrebnim oktanskim brojem manjim od 95. Uzeto je gorivo s oktanskim brojem 95 zato što je to najčešće gorivo koje se prodaje na benzinskim pumpama na ovim prostorima. Opterećenje motora je regulirano duljinom otvaranja usisnog ventila. Skraćivanjem duljine otvaranja usisnog ventila se smanjuje stupanj punjenja cilindra te se na taj način smanjuje i efektivna snaga. Nakon definirane duljine otvaranja usisnog ventila, skraćivanjem duljine otvaranja su dobivene krivulje efektivnog momenta i snage za smanjena opterećenja.

#### 3.2. Rezultati dobiveni na motoru bez promjene parametara



Slika 8. Krivulje efektivne snage za sva opterećenja bez promjene parametara



Slika 9. Krivulje efektivnog momenta za sva opterećenja bez promjene parametara

### 3.3. Parametri u Boostu koji će opisivati promjenu traženih parametara

Promjena kompresijskog omjera će biti izvršena u cilindru motora. Utjecaj temperature rashladnog medija će se razmatrati promjenom temperature stijenki cilindra. Utjecaj promjene početka izgaranja će se razmatrati promjenom kuta pretpaljenja u cilindru, a nabijanje povećanjem tlaka na usisu. Utjecaj promjene opterećenja i brzine vrtnje je prikazan u izradi osnovnog modela.

### 3.4. Promjena parametara

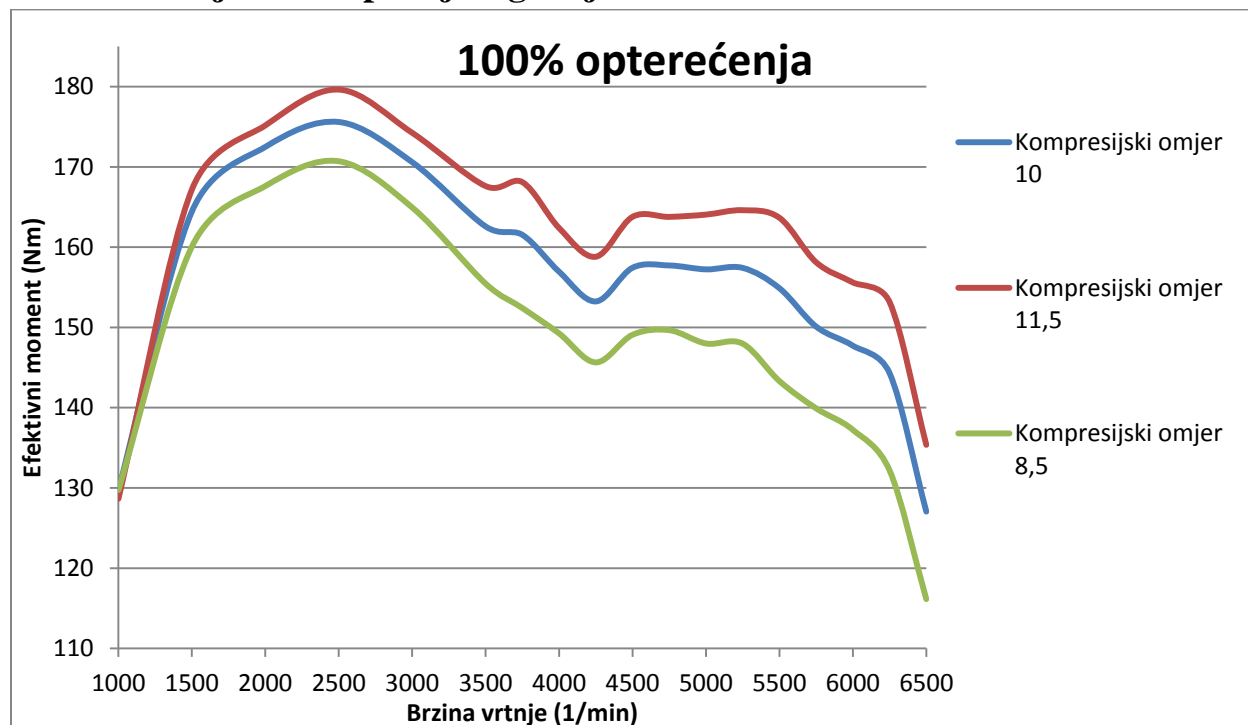
**Tablica 2. Promjena radnih i geometrijskih parametara**

|  | Početna vrijednost  | Povećana vrijednost  | Smanjena vrijednost  |
|--|---|--|--|
| Kompresijski omjer $\varepsilon$                             | 10  | 11,5   | 8,5  |
| Kut pretpaljenja $\alpha_{pp}$                               | 1000,1500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -5^\circ$<br>1500-6500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -16^\circ$ | 1000,1500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -5,75^\circ$<br>1500-6500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -18,4^\circ$ | 1000,1500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -4025^\circ$<br>1500-6500 okretaja u minuti - $\alpha_{pp} = -13,6^\circ$ |
| Temperatura stijenke cilindra $\vartheta$                    | 200 °C  | 230 °C   | 170 °C   |
| Temperatura glave cilindra $\vartheta$                       | 170 °C  | 195,5 °C   | 144,5 °C   |
| Temperatura stijenke cilindra kada je klip u GMT $\vartheta$ | 150 °C  | 172,5 °C   | 127,5 °C   |
| Temperatura stijenke cilindra kada je klip u DMT $\vartheta$ | 100 °C  | 115 °C   | 85 °C  |
| Okolišni tlak p  | 1 bar   | 1,15 bar   |  |

## 4. Rezultati

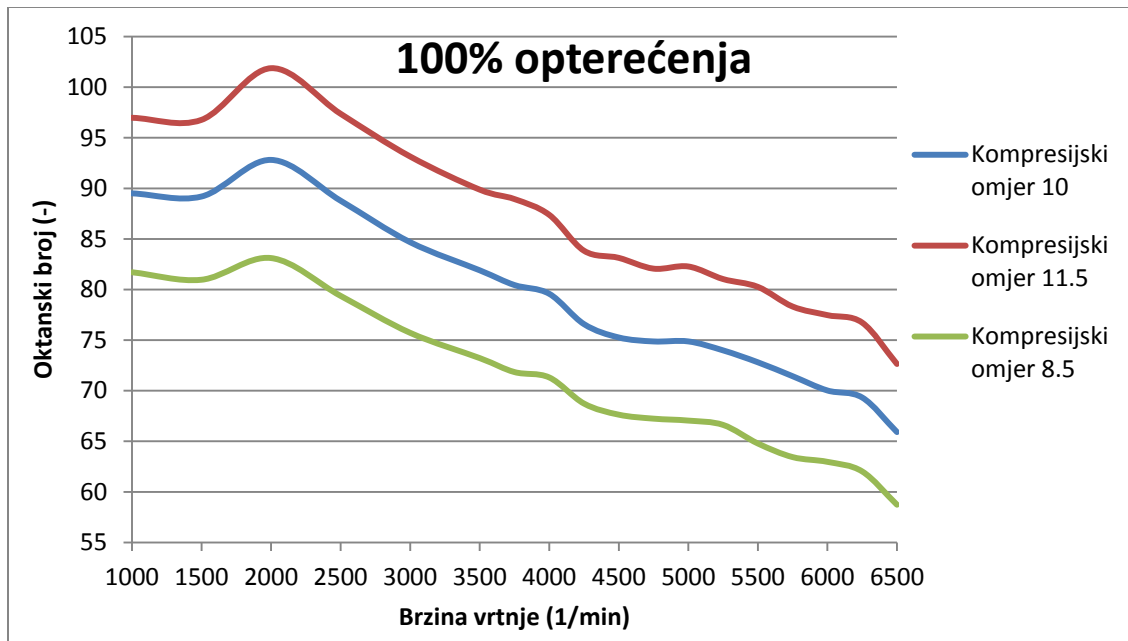
U rezultatima će se uspoređivati promjene dobivenih snaga, potrebnih oktanskih brojeva za miran rad motora te promjene u specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva. Rezultati će biti podijeljeni posebno za svaki iznos opterećenja.

### 4.1. Promjena kompresijskog omjera



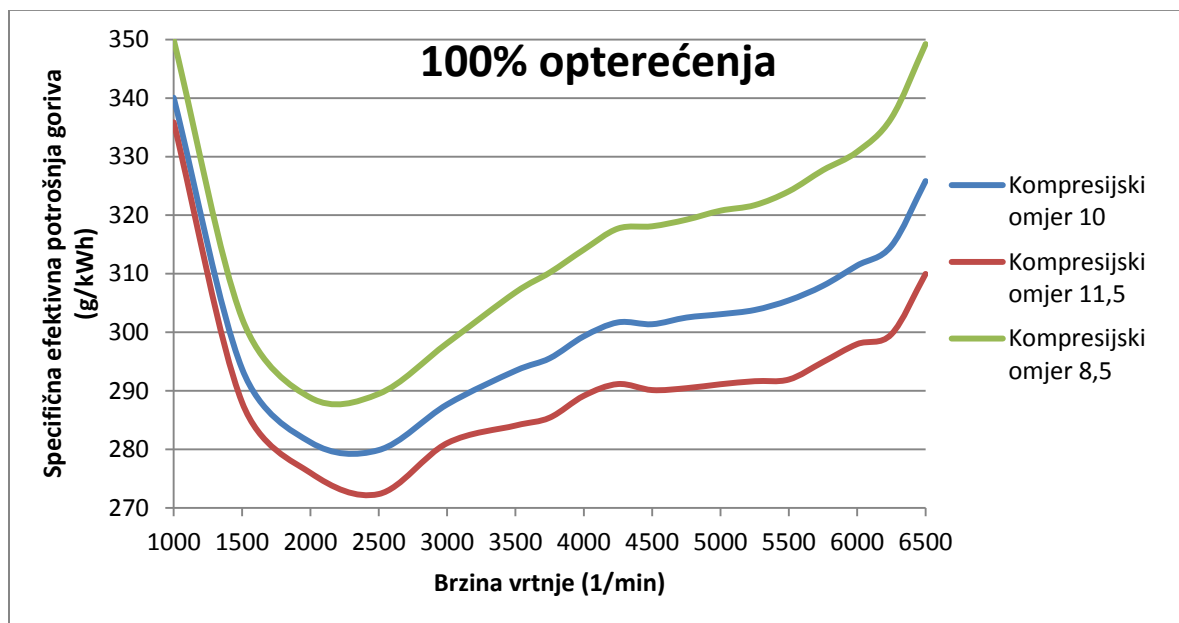
**Slika 10. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 100% opterećenja**

Povećanjem kompresijskog omjera dolazi do povećanja efektivnog momenta, a smanjenjem dolazi do smanjenja efektivnog momenta. Utjecaj promjene je slabije izražen na manjim brzinama vrtnje i iznosi otprilike 3% dok pri većim brzinama vrtnje dolazi do porasta efektivnog momenta od otprilike 7% na više ili na manje, ovisno o tome dali se kompresijski omjer povećavao ili smanjivao.



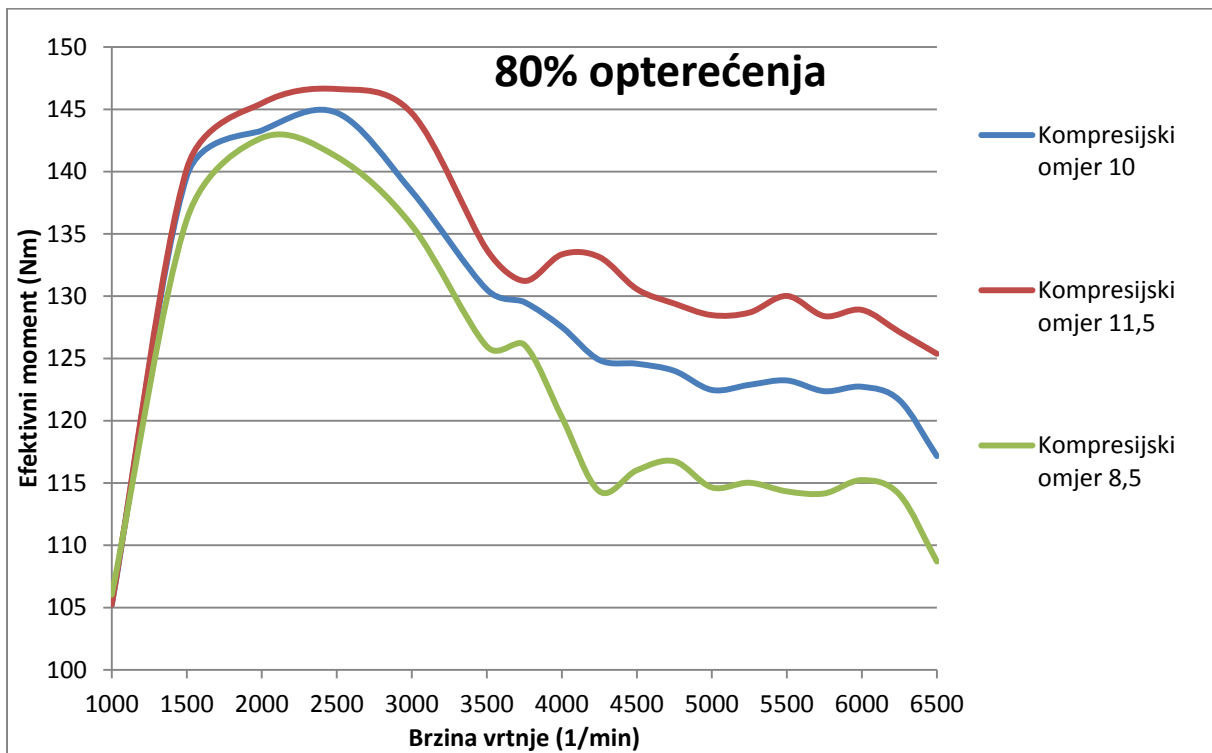
**Slika 11. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 100% opterećenja**

Povećavanjem kompresijskog omjera znatno raste iznos potrebnog oktanskog broja za miran rad motora dok smanjenjem kompresijskog omjera dolazi do značajnog pada potrebnog oktanskog broja. Razlika je otprilike 10%.



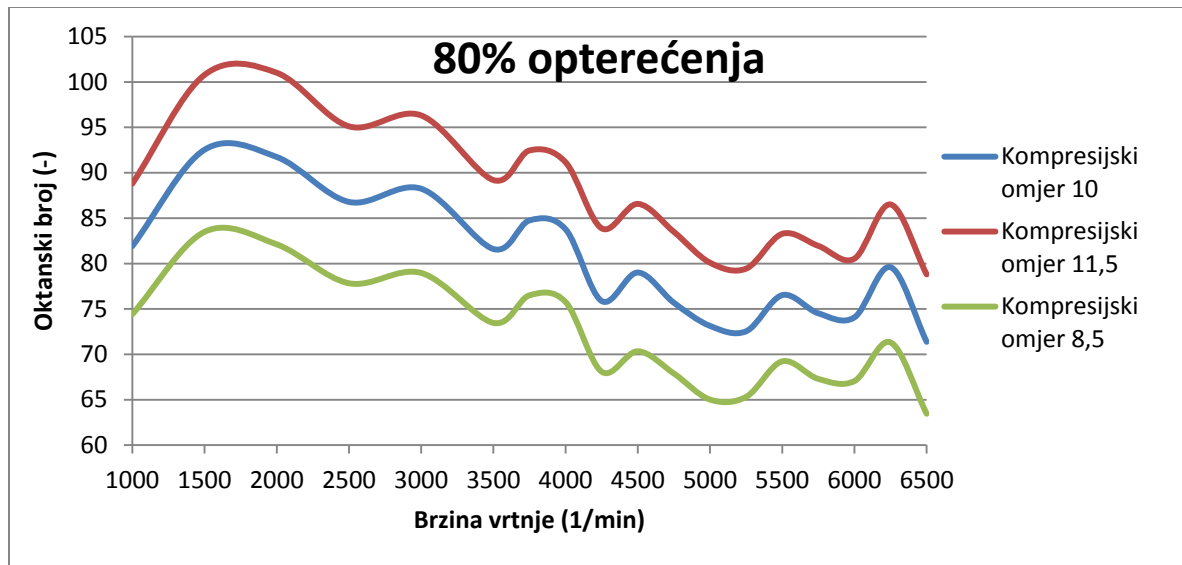
**Slika 12. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 100% opterećenja**

Smanjenjem kompresijskog omjera raste specifična efektivna potrošnja goriva. Taj porast je najizraženiji na većim brzinama vrtnje, dok povećanjem kompresijskog omjera u istom omjeru specifična efektivna potrošnja pada.



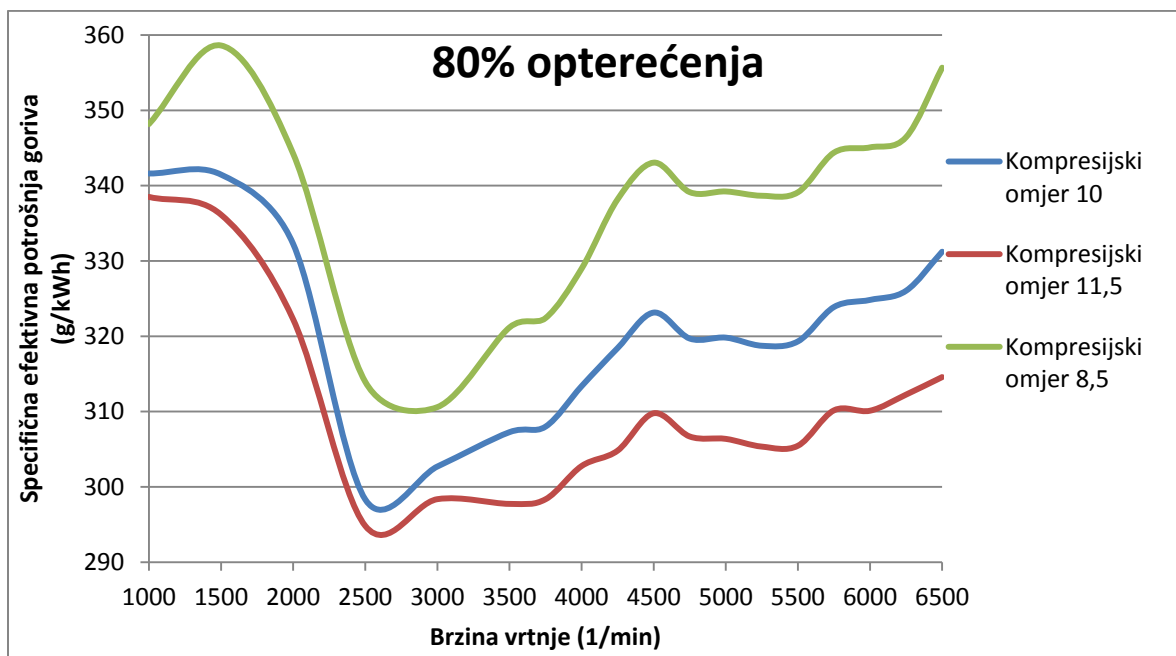
**Slika 13. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja**

Pri smanjenom opterećenju je promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera manje izražena nego na 100% opterećenja. Na manjim brzinama vrtnje do 3500 okretaja u minuti promjene se kolebaju u okviru od par posto promjene. Na većim brzinama vrtnje dolazi do promjene iznosa efektivnog momenta od otprilike 6%.



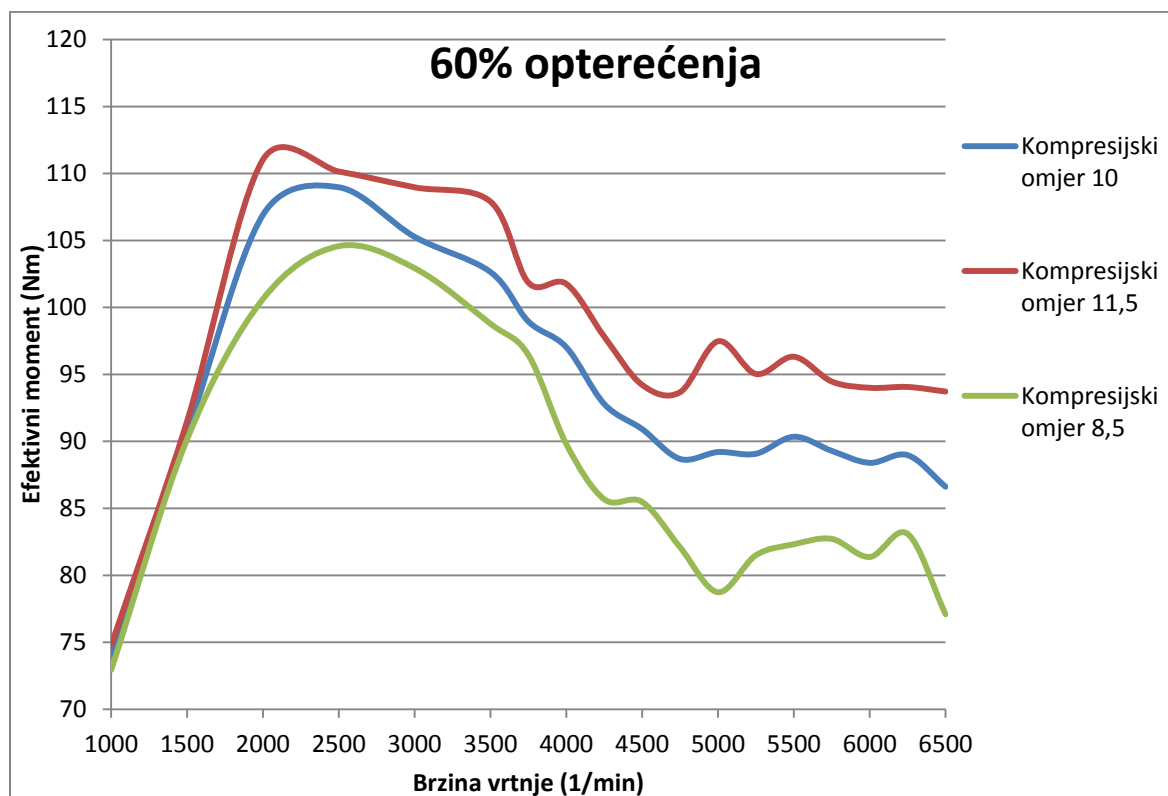
**Slika 14. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja**

Promjenom kompresijskog omjera na 80% opterećenja se mijenja potrebni oktanski broj u istom omjeru kao i na 100% opterećenja i to u iznosu od otprilike 10%. To je nepovoljno u pogledu povećanja kompresijskog omjera jer za manji iznos povećanja izlazne snage (efektivnog momenta) traženi oktanski broj više raste. U pogledu smanjenog kompresijskog omjera to je pozitivna promjena zato što gubitkom 6% efektivnog momenta traženi oktanski broj pada za otprilike 15%.



**Slika 15. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 80% opterećenja**

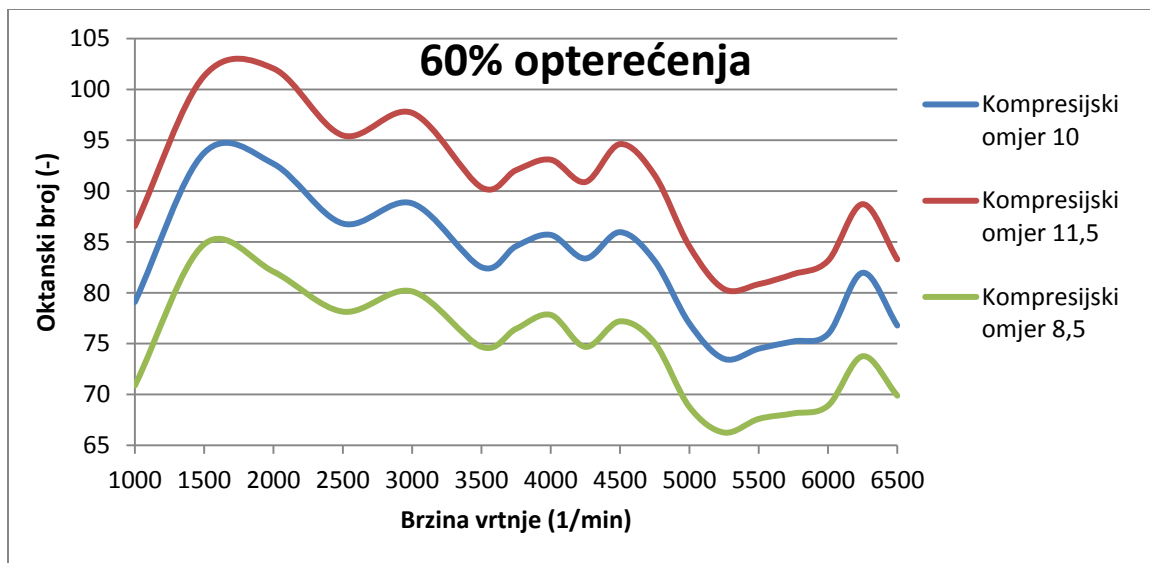
Smanjenjem kompresijskog omjera ponovno raste specifična efektivna potrošnja goriva dok rastom kompresijskog omjera ona pada. Promjena u slučaju smanjenog opterećenja je manje izražena nego na punom opterećenju motora i iznosi otprilike 2%. To je zanemariva razlika u potrošnji te u ovom slučaju još više dolazi do izražaja utjecaj smanjenja kompresijskog omjera zato što je opadanje izlazne snage i povećanje specifične efektivne potrošnje u gotovo zanemarivom iznosu u odnosu na smanjenje traženog oktanskog broja u svrhu mirnog rada motora.



**Slika 16. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja**

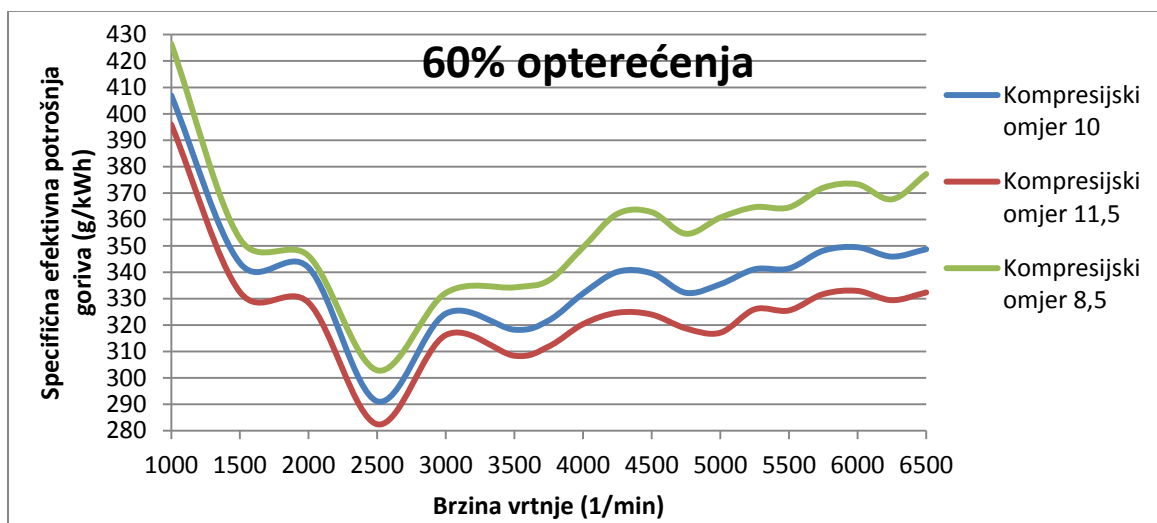
Kao i u slučaju s 80% opterećenja, promjena efektivnog momenta se očituje samo na većim brzinama vrtnje motora (više od 3500). Promjena iznosi otprilike 7% što je vrlo mali iznos.





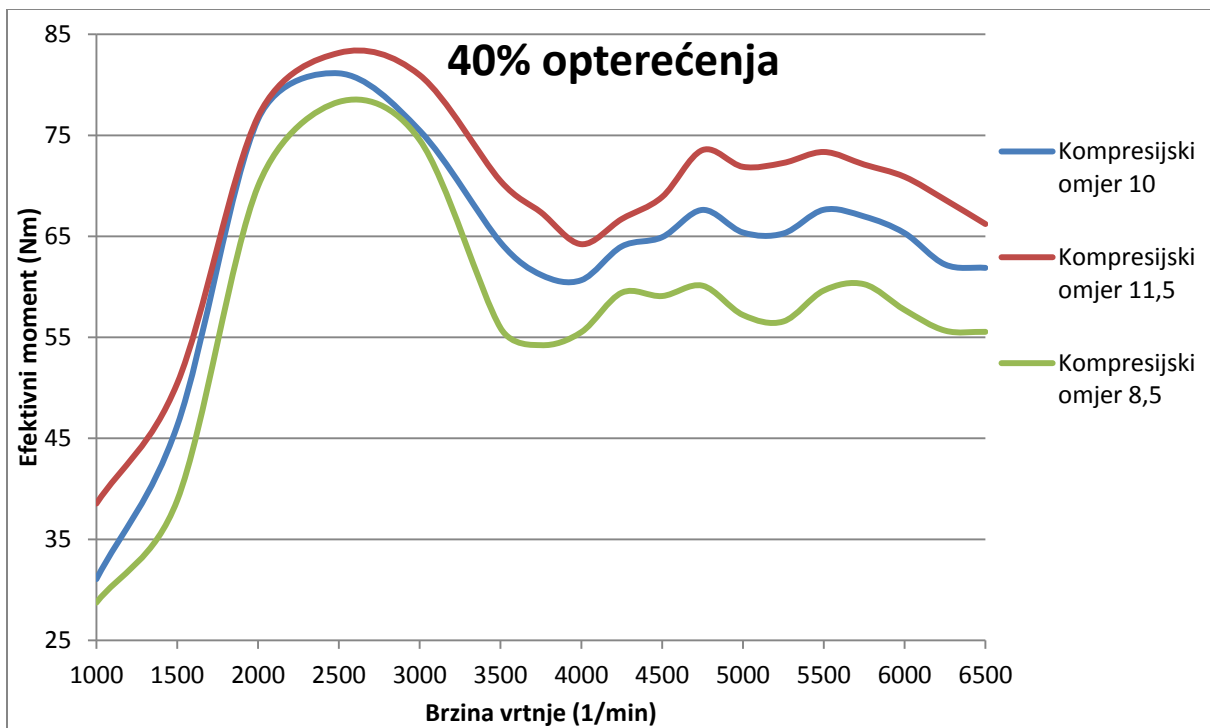
**Slika 17. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja**

Potrebni oktanski broj i u ovom slučaju se promjenom kompresijskog omjera mijenja za otprilike 15% što je i ovom slučaju pozitivna promjena jer smanjenjem kompresijskog omjera snaga gotovo neznatno opada dok se potrebni oktanski broj smanjuje u velikoj mjeri.



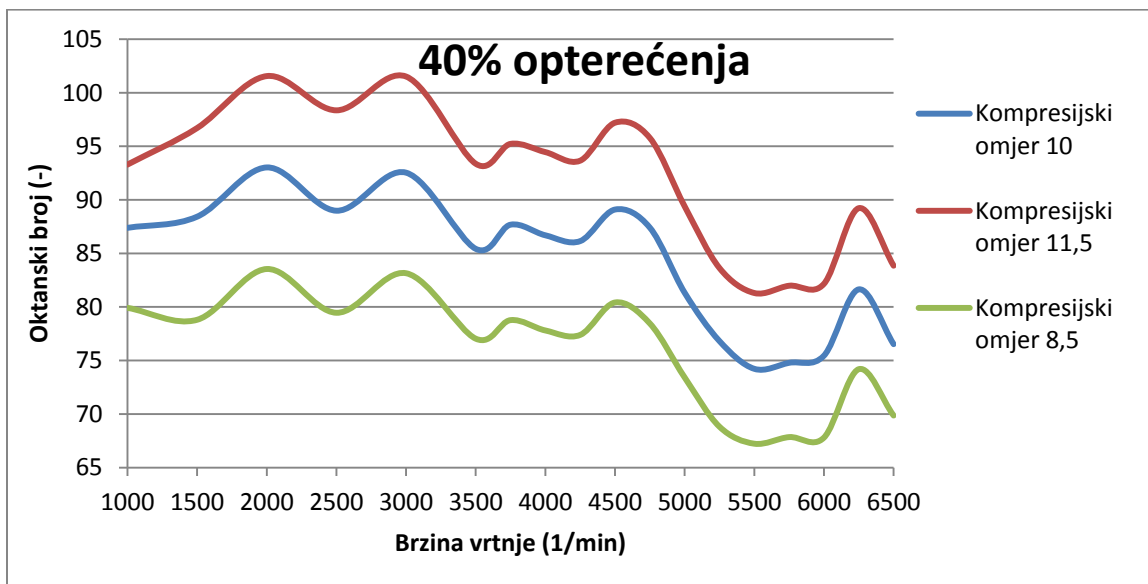
**Slika 18. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 60% opterećenja**

Smanjenjem kompresijskog omjera dolazi do značajnijeg povećanja specifične efektivne potrošnje goriva na 60% opterećenja, dok u istom omjeru povećanjem kompresijskog omjera specifična efektivna potrošnja pada. Ta promjena je najizraženija na brzinama vrtnje većim od 3500 okretaja u minuti i iznosi otprilike 6% što je i dalje zanemarivi utjecaj u odnosu na smanjenje potrebnog oktanskog broja.



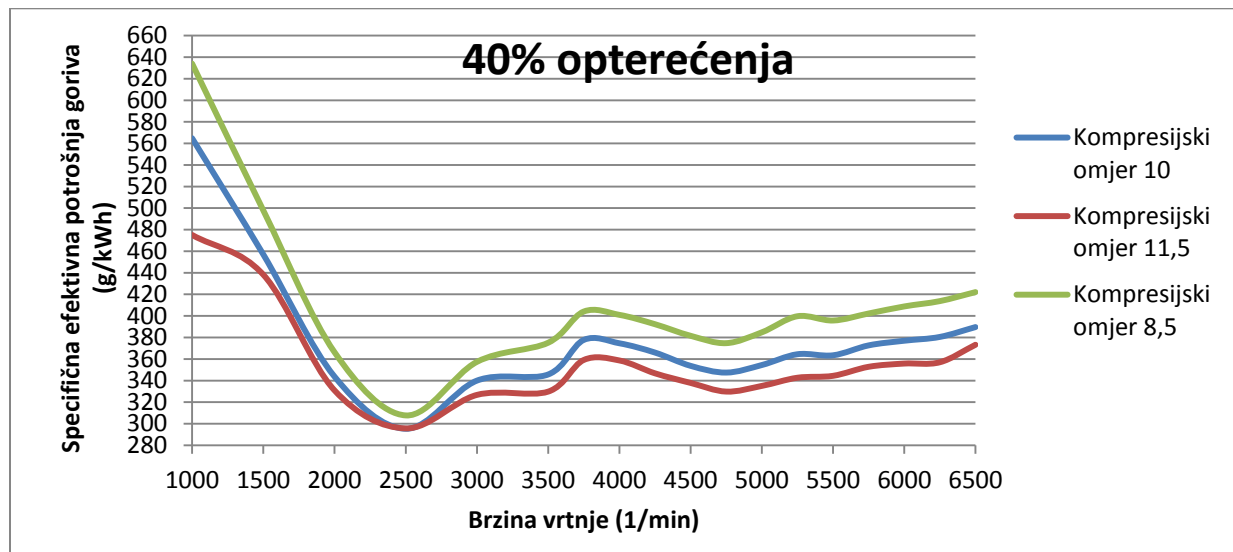
**Slika 19. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja**

Kao i u prethodna 2 slučaja, efektivni moment se mijenja u istom omjeru te ta promjena dolazi do izražaja na brzinama vrtnje većim od 3500 okretaja u minuti.



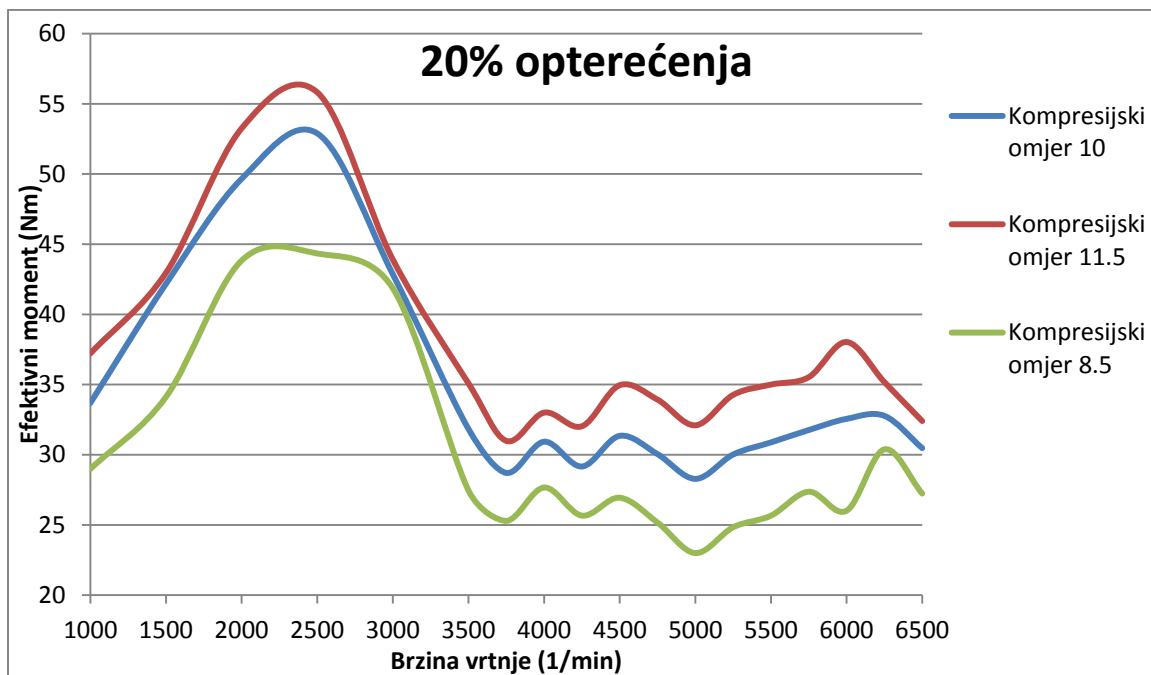
**Slika 20. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja**

Potrebni oktanski broj za miran rad motora se mijenja u istom omjeru kao i na 60 i 80% opterećenja.



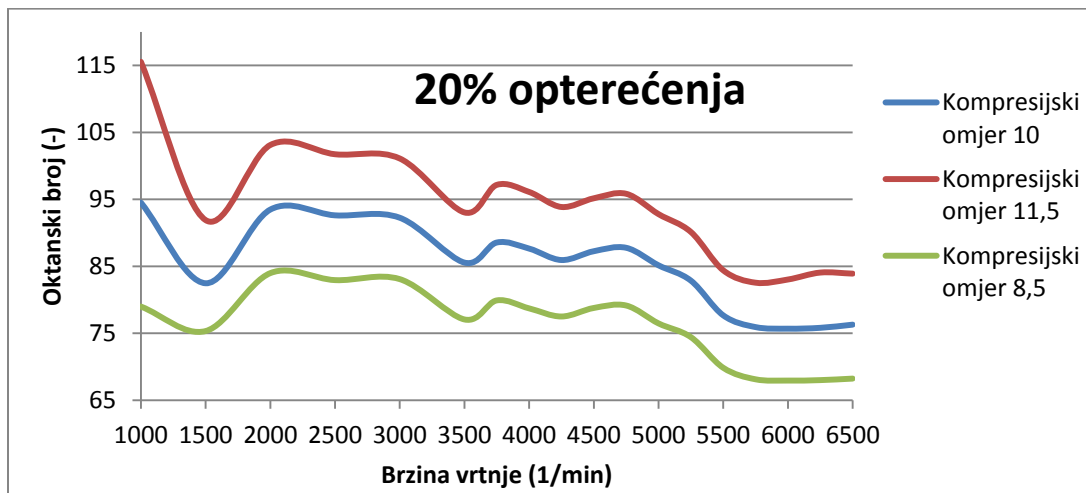
Slika 21. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 40% opterećenja

Specifična efektivna potrošnja goriva se i u slučaju 40% opterećenja mijenja u istom omjeru kao i na 60% opterećenja te vrijede isti zaključci.



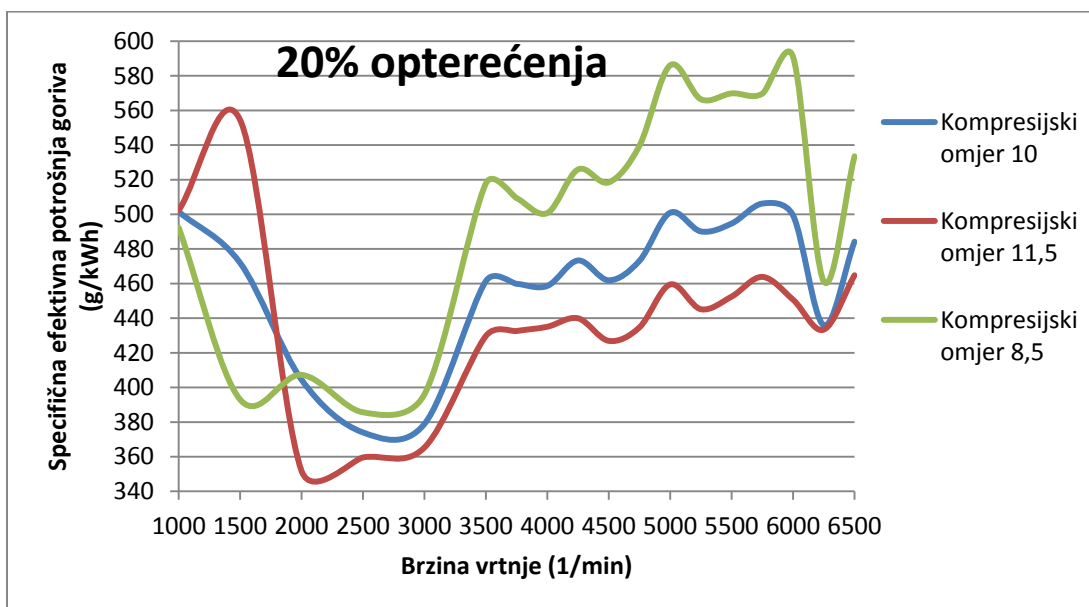
Slika 22. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja

Promjenom kompresijskog omjera na 20% opterećenja dolazi do neznatne promjene u efektivnom momentu i te promjene iznose svega 3%, ovisno o povećanju ili smanjenju kompresijskog omjera.



Slika 23. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja

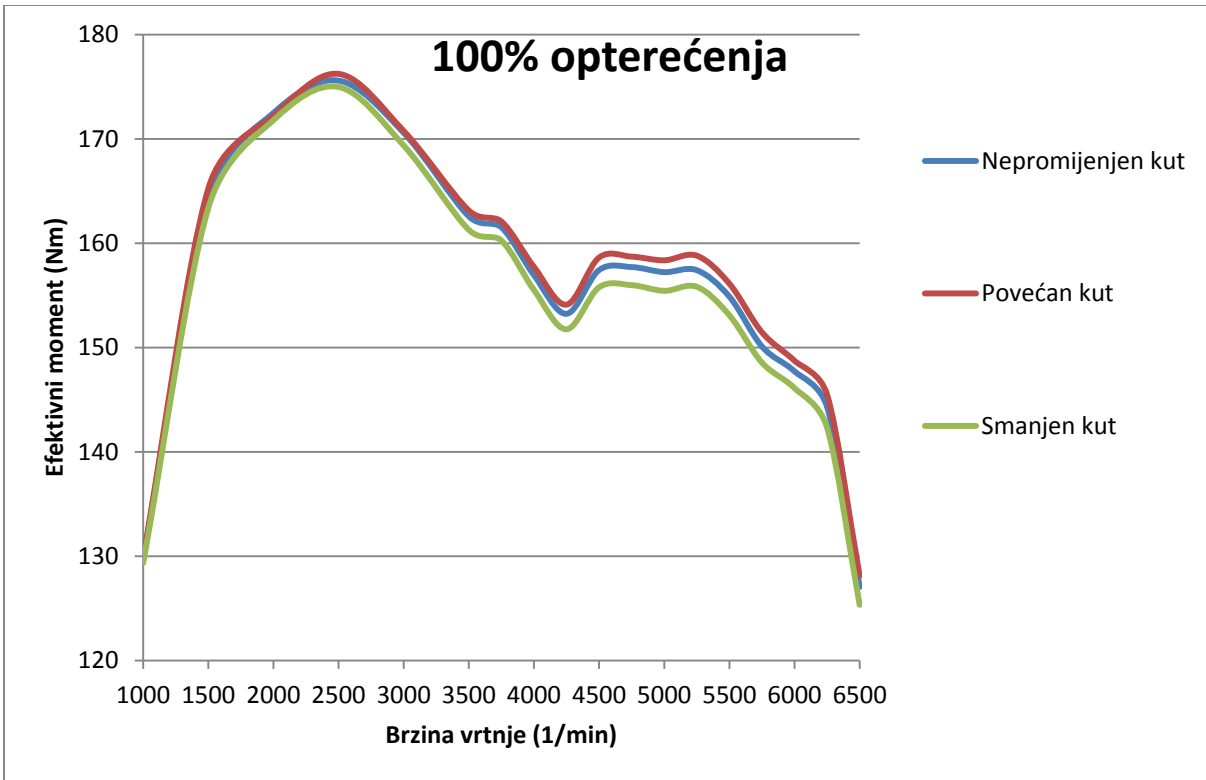
Na 20% opterećenja promjenom kompresijskog omjera dolazi do promjene u potrebnom oktanskom broju za 10%. Smanjenjem kompresijskog omjera efektivni moment neznatno pada dok se potrebni oktanski broj smanjuje za otprilike 10%.



Slika 24. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kompresijskog omjera na 20% opterećenja

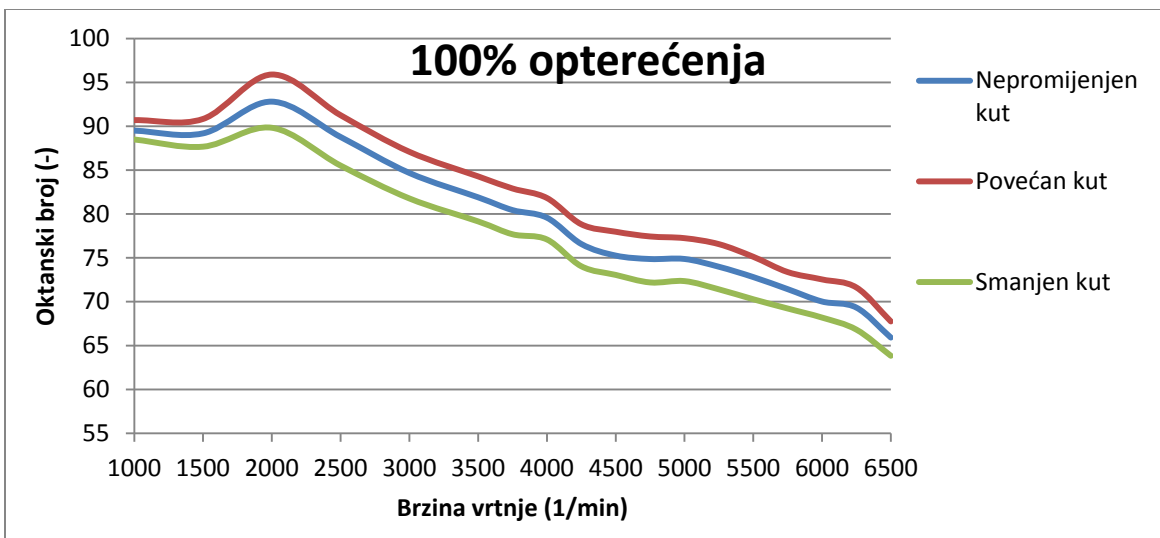
Smanjenjem kompresijskog omjera specifična efektivna potrošnja značajno raste u iznosu od otprilike 18% na brzinama vrtnje većim od 3500 okretaja u minuti. Povećanjem kompresijskog omjera specifična efektivna potrošnja opada u manjoj mjeri od otprilike 11%.

#### 4.2. Promjena kuta pretpaljenja



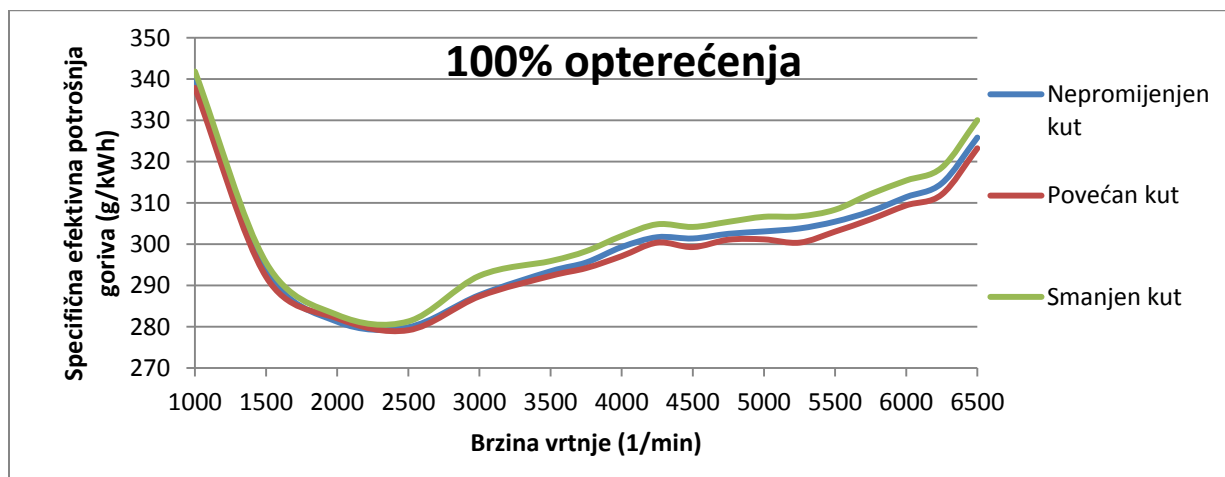
**Slika 25. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja**

Promjenom kompresijskog omjera efektivni moment se mijenja za svega 0,5% posto. Povećanjem kuta pretpaljenja snaga raste, a smanjenjem kuta pretpaljenja snaga pada.



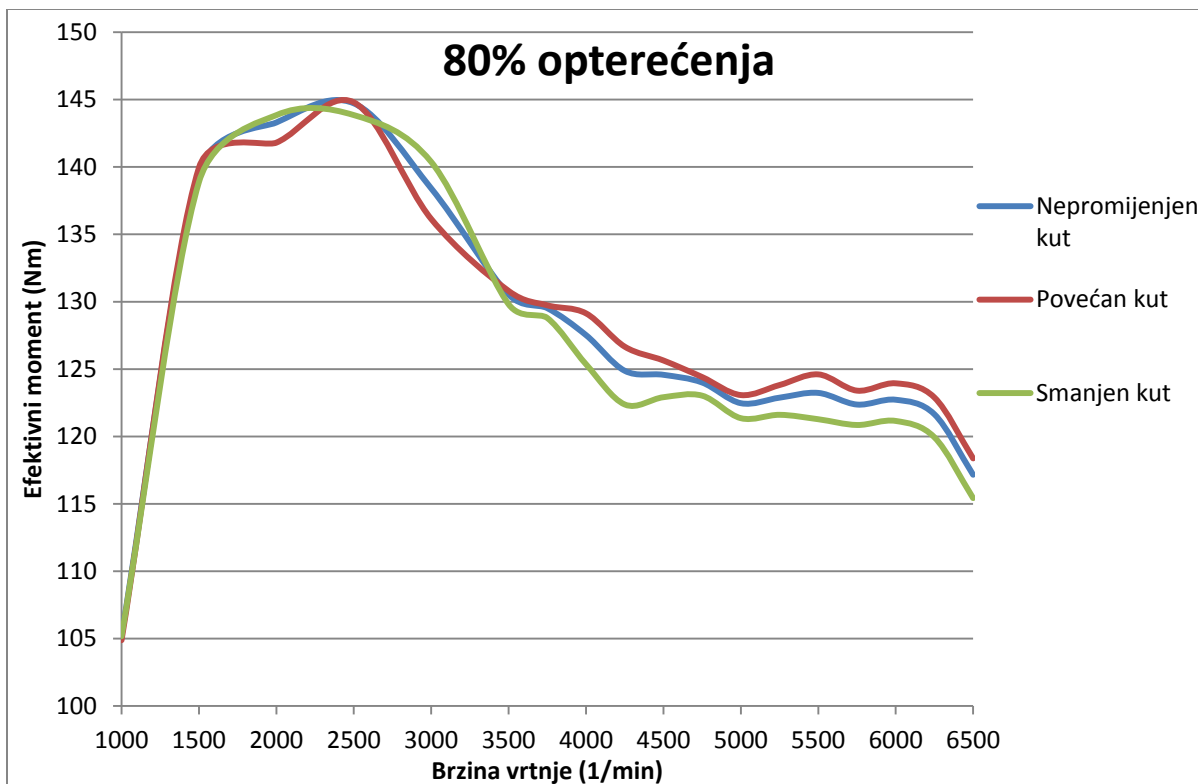
**Slika 26. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja**

Smanjenjem kuta pretpaljenja potreban oktanski broj pada za 3%, a povećanjem raste za isti iznos. S obzirom na to da je promjena efektivnog momenta manja od 1%, promjenom kuta pretpaljenja u većem omjeru se može smanjiti potreban oktanski broj za miran rad motora bez pojave detonacije.



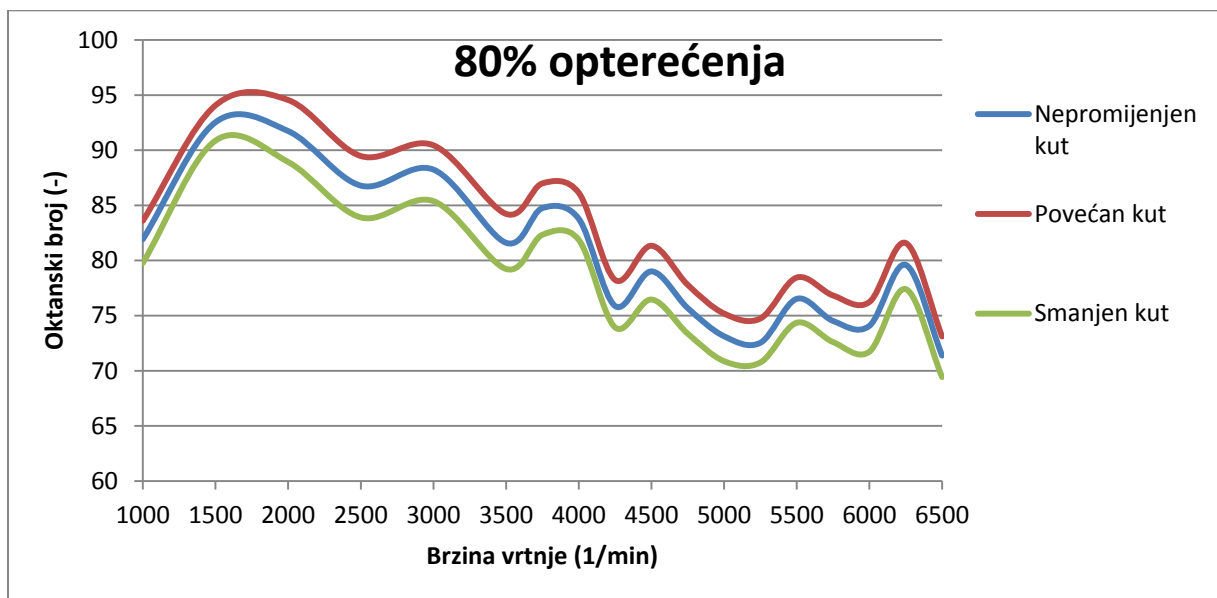
**Slika 27. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 100% opterećenja**

Smanjenjem kuta pretpaljenja specifična efektivna potrošnja goriva raste za otprilike 1,5%. Do te razlike dolazi na brzinama vrtnje većim od 2500 okretaja u minuti. Ako uzmemo u obzir da je potreban oktanski broj smanjen za otprilike 3%, a promjena u efektivnom momentu zanemariva, može se zaključiti da je i povećanje potrošnje u manjem omjeru izraženo u odnosu na promjenu traženog oktanskog broja. Povećanjem kuta pretpaljenja se potrošnja smanjuje u neznatnom omjeru u odnosu na početni model na kojem nisu bili mijenjani parametri.



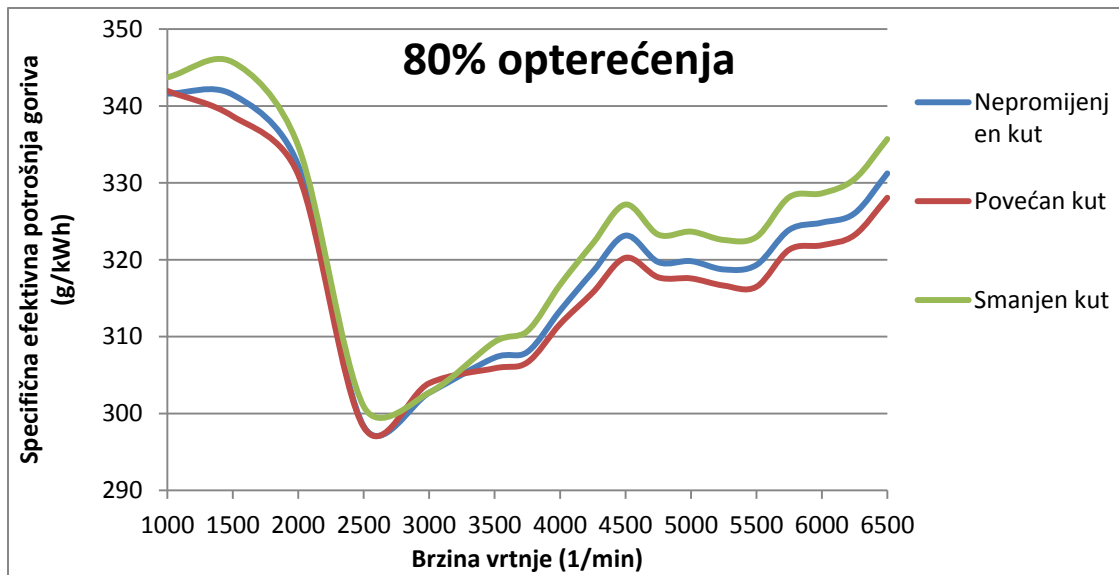
**Slika 28. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja**

Kao i u slučaju na 100% opterećenja, promjena efektivnog momenta je manja od 1%.



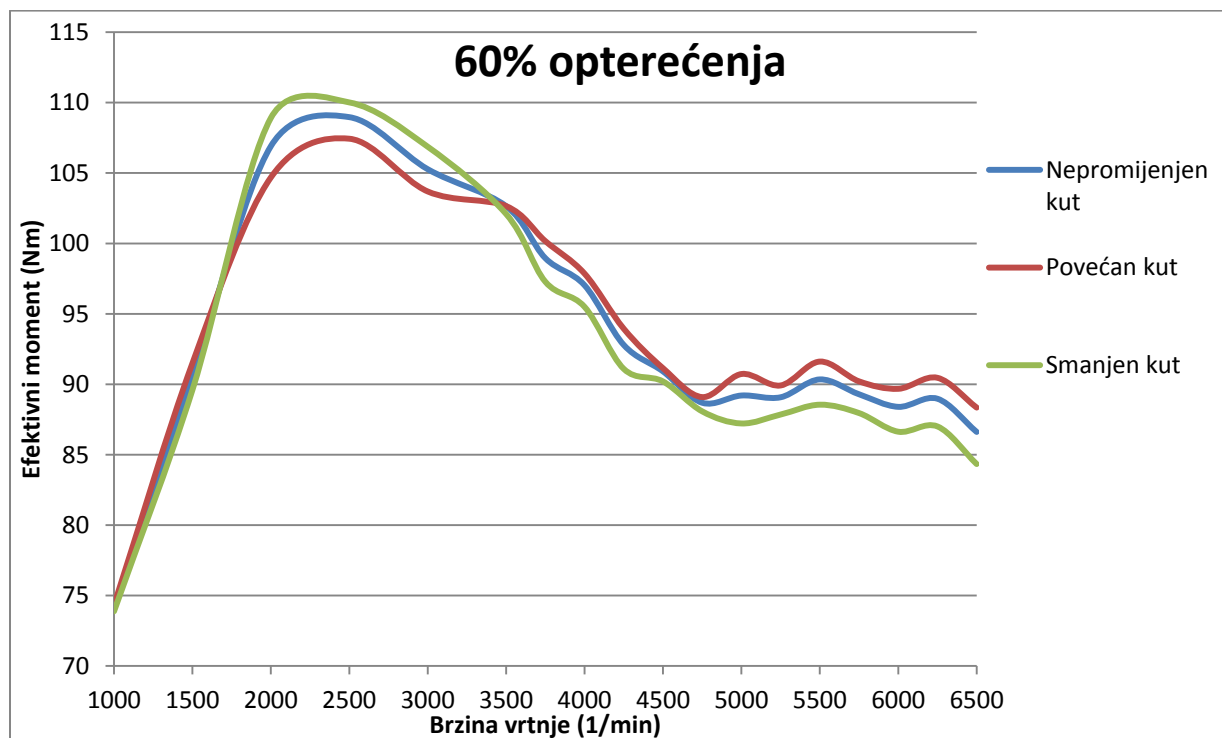
**Slika 29. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja**

Za promjenu oktanskog broja vrijede isti iznosi kao i na 100% opterećenja.



Slika 30. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 80% opterećenja

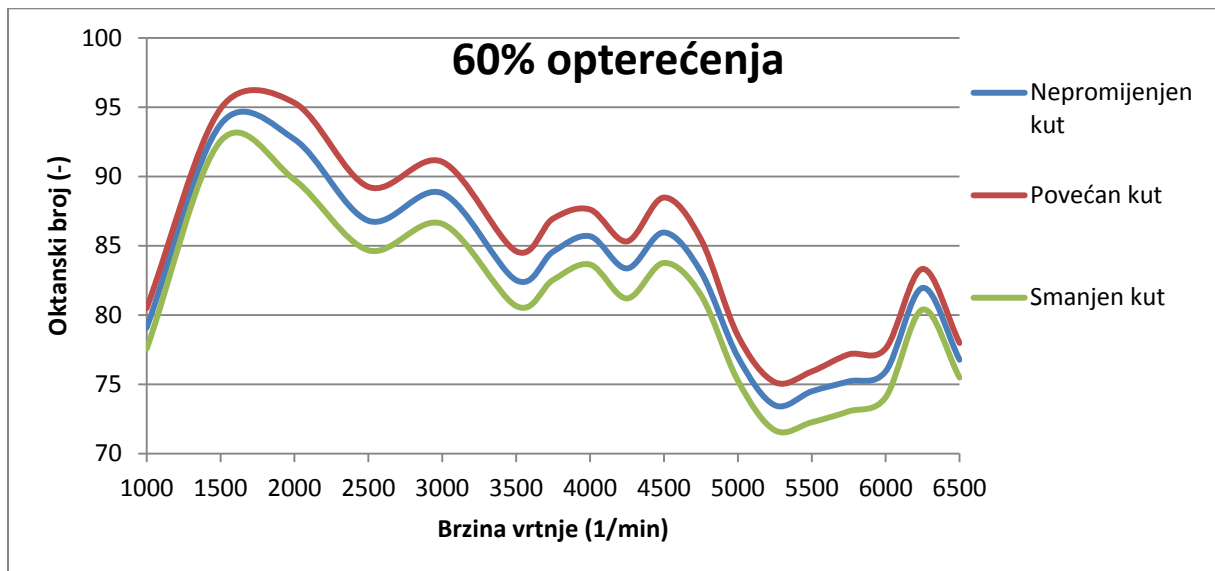
Smanjenjem kuta pretpaljenja u istom omjeru raste specifična efektivna potrošnja goriva kao i na 100% opterećenja, dok je promjena neznatna povećanjem kuta pretpaljenja.



Slika 31. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja

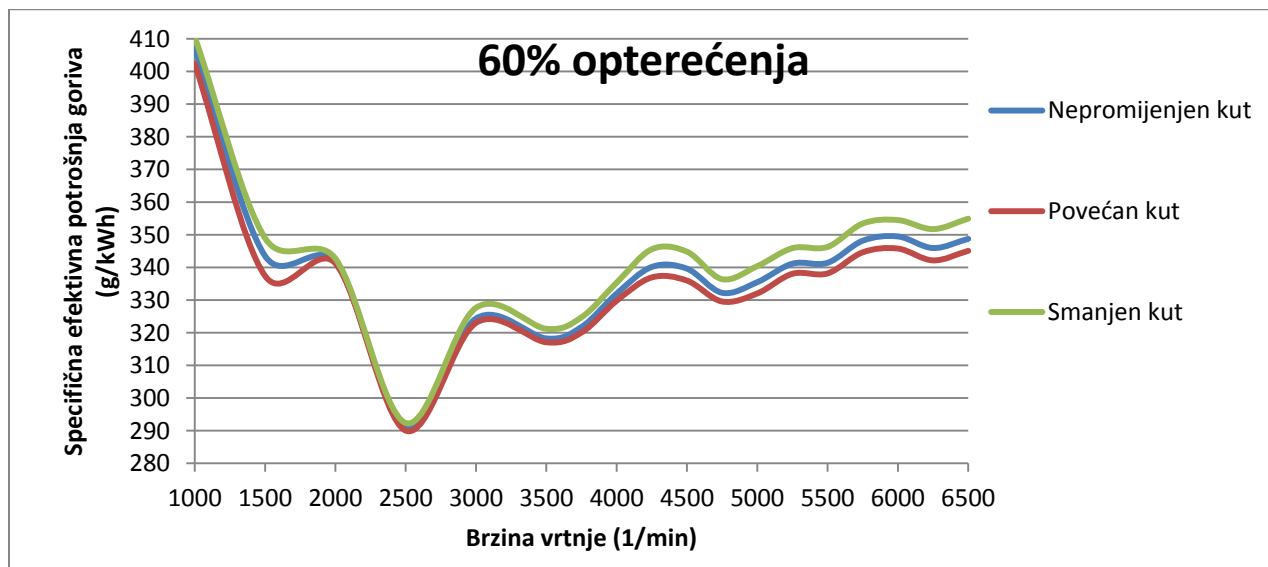


Na 60% opterećenja promjena efektivnog momenta je kao i na 80 i 100% opterećenja manja od 1% što je i dalje zanemariva promjena.



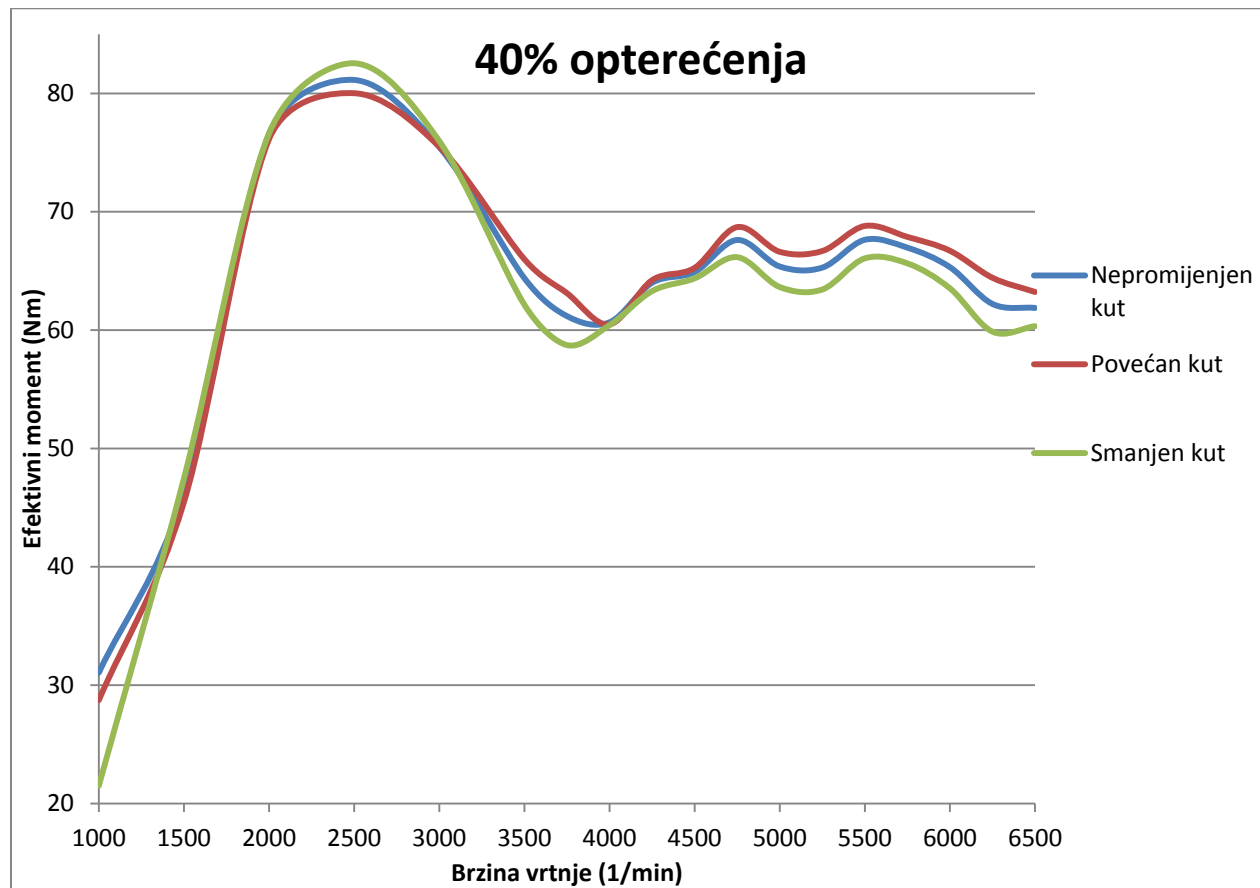
**Slika 32. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja**

Promjena potrebnog oktanskog broja je u istom omjeru kao i u prethodna 2 slučaja te iznosi otprilike 3%. Uzevši u obzir činjenicu da promjena u efektivnom momentu gotovo i nema, ova promjena dolazi do velikog značaja.



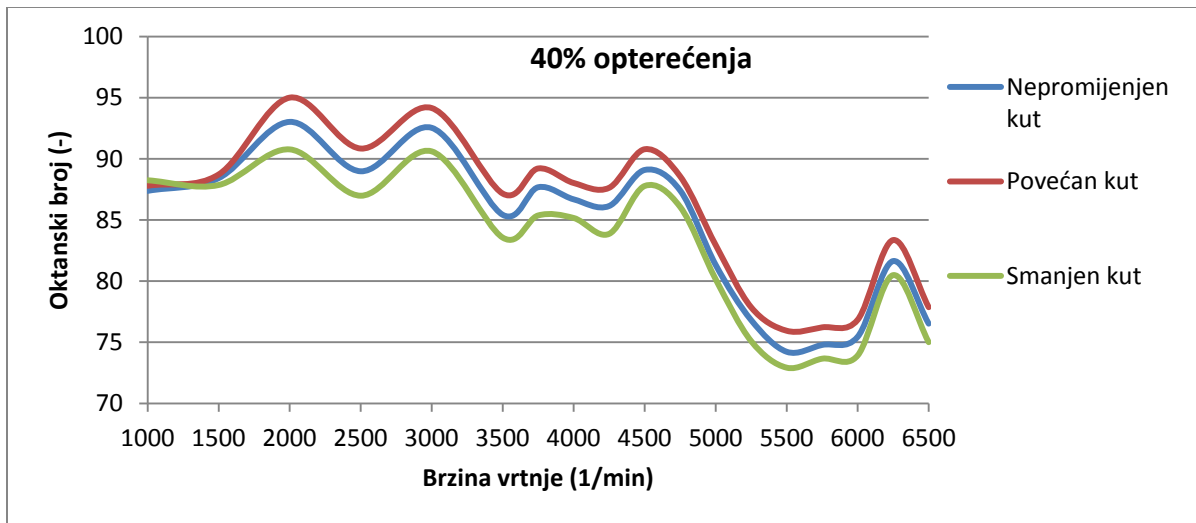
**Slika 33. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 60% opterećenja**

Na 60% opterećenja specifična efektivna potrošnja goriva se mijenja u istom omjeru kao i na ostalim opterećenjima koji su se dosad analizirali u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja.



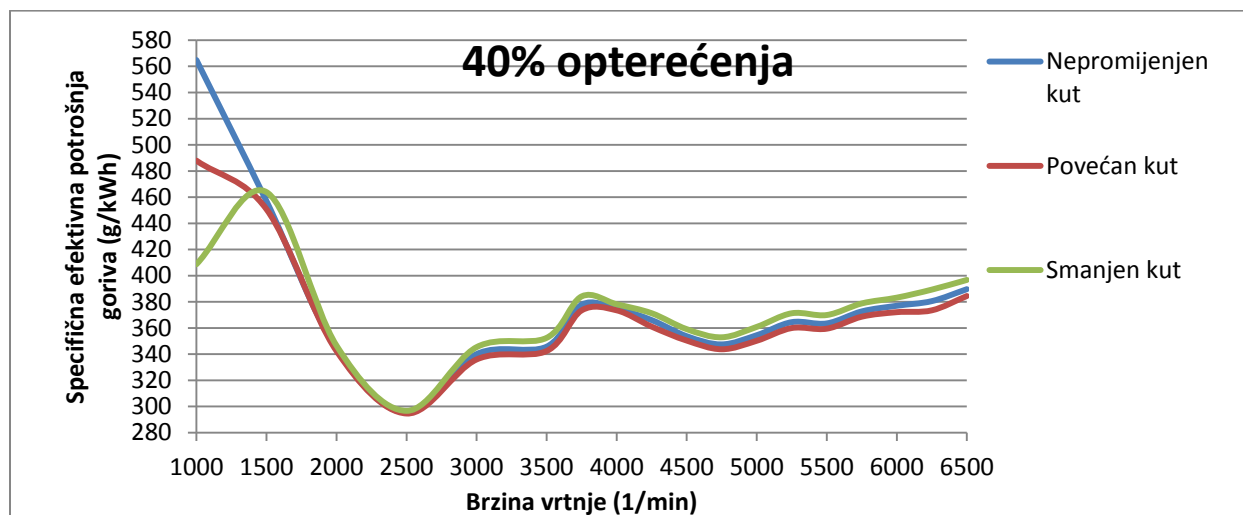
**Slika 34. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja**

U slučaju s 40% opterećenja, na nižim brojevima okretaja efektivni moment je gotovo identičan u sva tri slučaja ovisno o tome dali je kut pretpaljenja povećavan ili smanjivan. Na većim brojevima okretaja smanjenje kuta pretpaljenja ima značajniji utjecaj, efektivni moment pada za otprilike 1%.



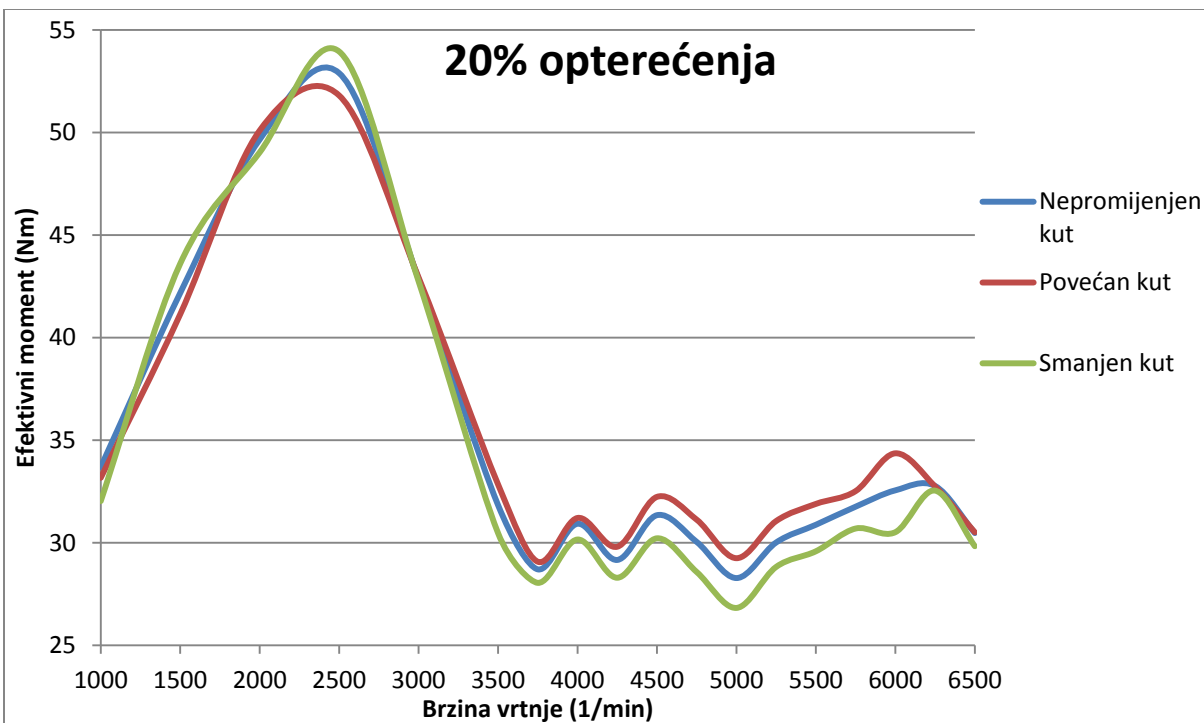
**Slika 35. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja**

Na 40% opterećenja se traženi oktanski broj mijenja u istom omjeru kao i na 60, 80 i 100% opterećenja.

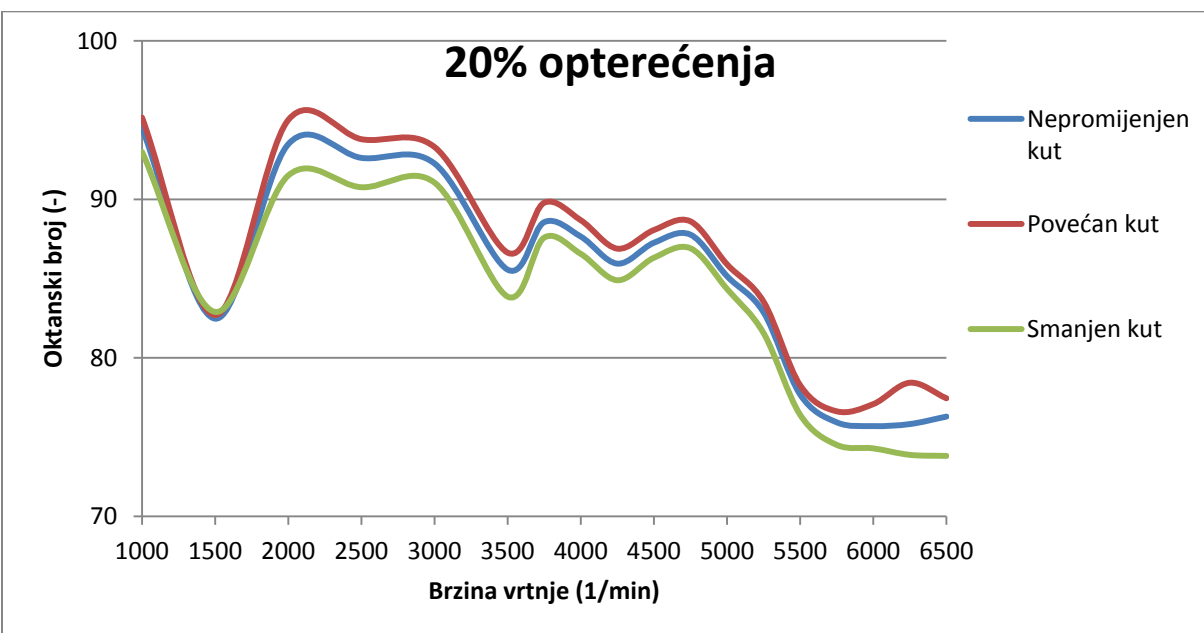


**Slika 36. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 40% opterećenja**

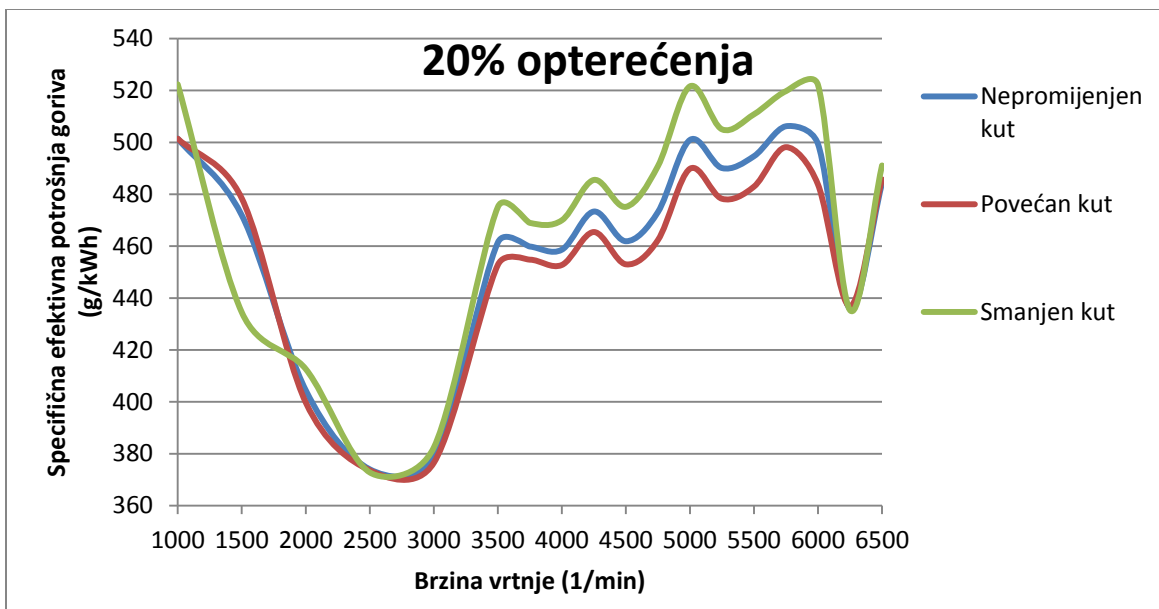
Promjena specifične efektivne potrošnje goriva na 40% opterećenja iznosi svega 1%. Padom kuta pretpaljenja ono raste, a smanjenjem pada. To je, kao i promjena snage, zanemarivi iznos u odnosu na promjenu potrebnog oktanskog broja kojem smanjenjem kuta pretpaljenja iznos pada za otprilike 3%.



Slika 37. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja



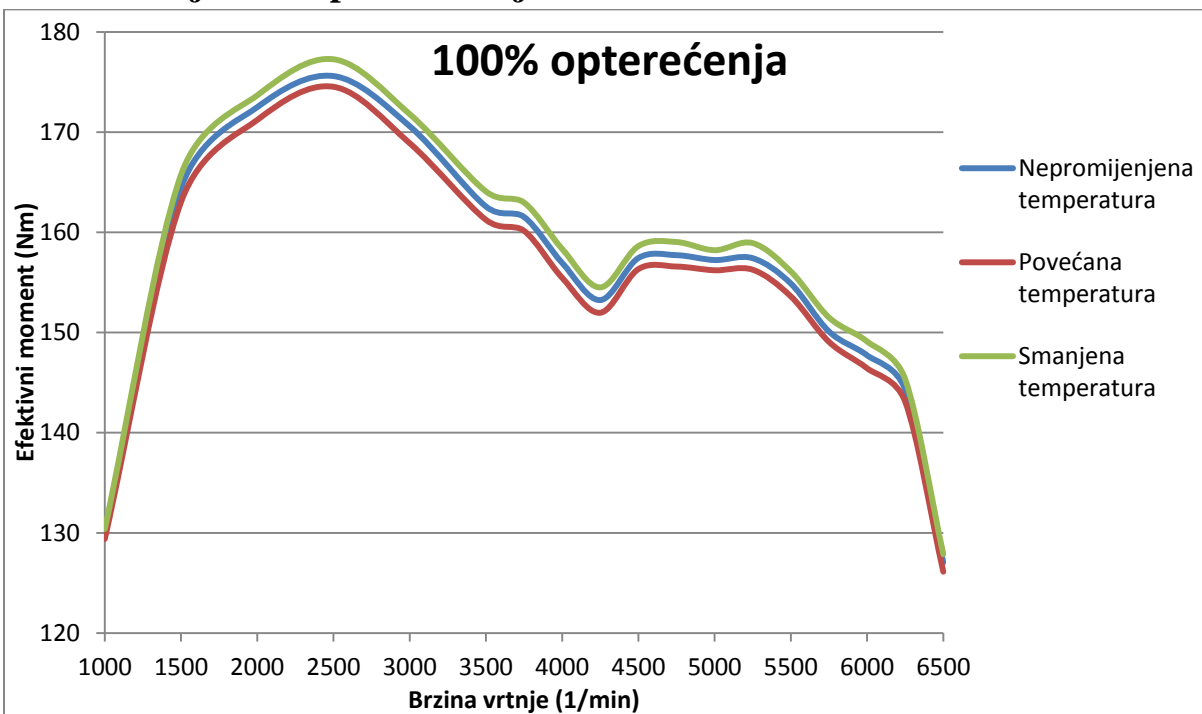
Slika 38. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja



**Slika 39. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni kuta pretpaljenja na 20% opterećenja**

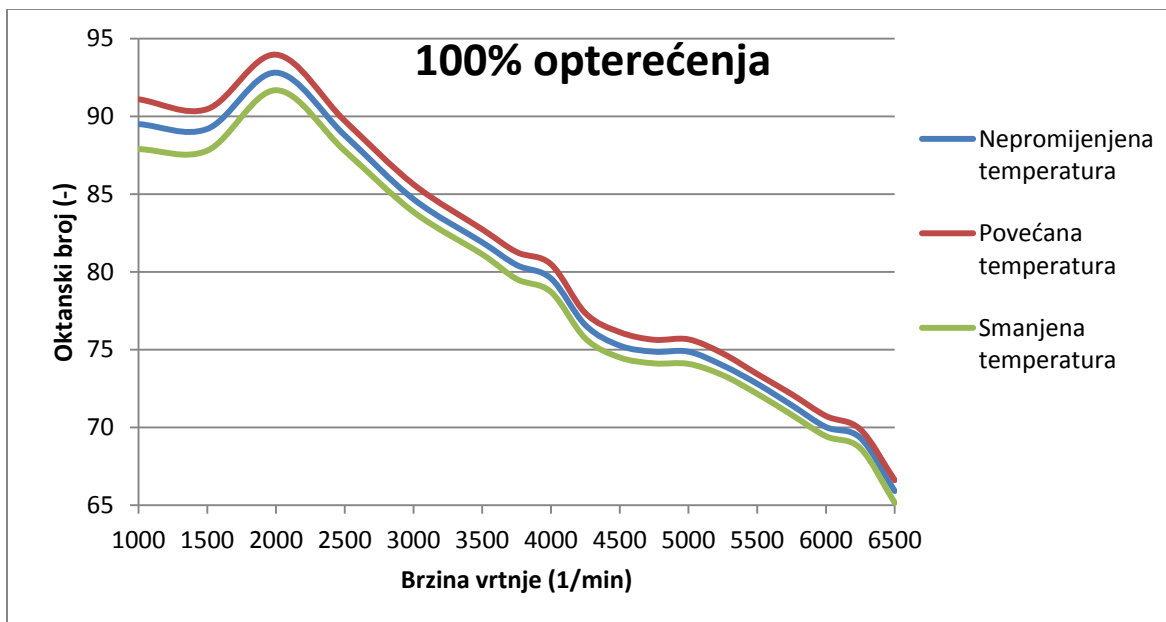
Za režim rada na 20% opterećenja vrijede ista razmatranja kao i za sve ostale režime rada s različitim opterećenjima. Promjena snage, efektivnog momenta i specifične efektivne potrošnje goriva su gotovo zanemarive, a iznos potrebnog oktanskog broja pada za otprilike 3% na svim brzinama vrtnje sa smanjenjem kuta pretpaljenja za 15%.

### 4.3. Promjena temperature stijenske cilindra



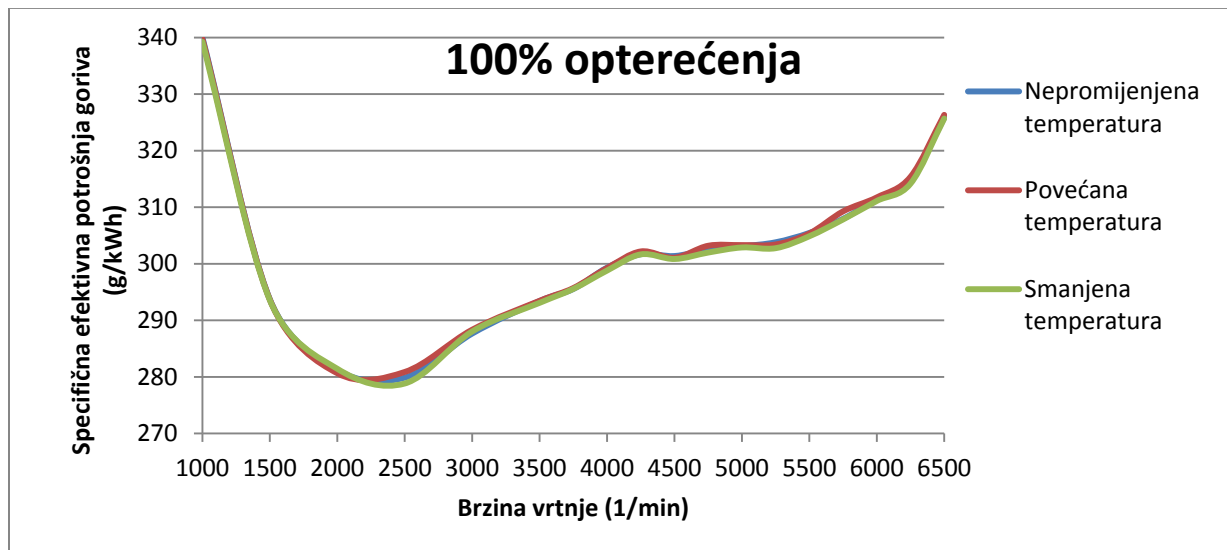
Slika 40. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenske cilindra na 100% opterećenja

Smanjenjem temperature stijenske cilindra efektivni moment neznatno raste za 0,5% dok povećanjem temperature efektivni moment pada za 0,5%.



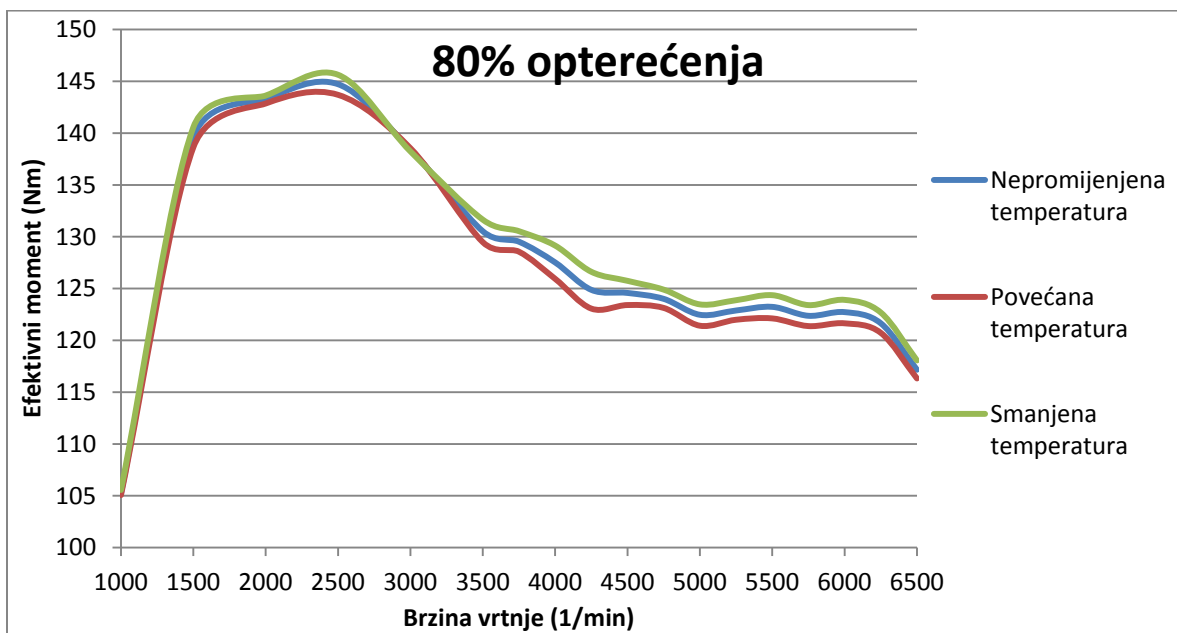
Slika 41. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenske cilindra na 100% opterećenja

Povećanjem temperature stijenke cilindra potrebni oktanski broj za rad motora bez pojave detonacije raste za 2% dok smanjenjem temperature on u istom iznosu opada. Iz toga se može zaključiti da boljim hlađenjem se dobiva neznatno veći okretni moment uz smanjenje potrebnog oktanskog broja za rad motora bez pojave detonacije.



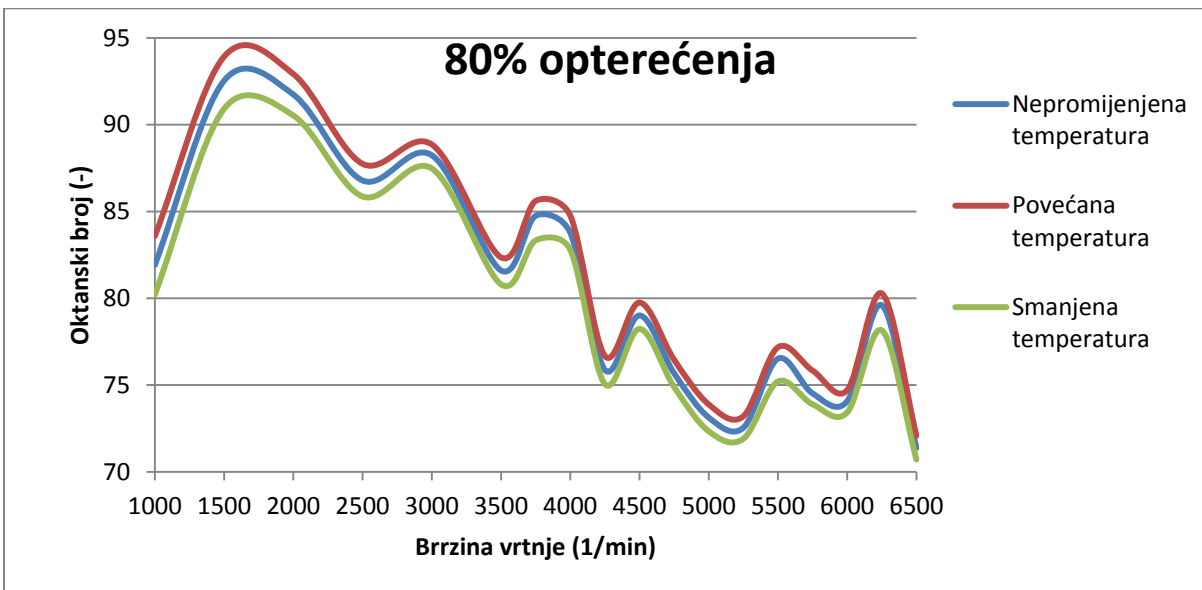
Slika 42. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 100% opterećenja

Promjena specifične efektivne potrošnje goriva gotovo da se uopće ne mijenja promjenom temperature stijenki cilindra.



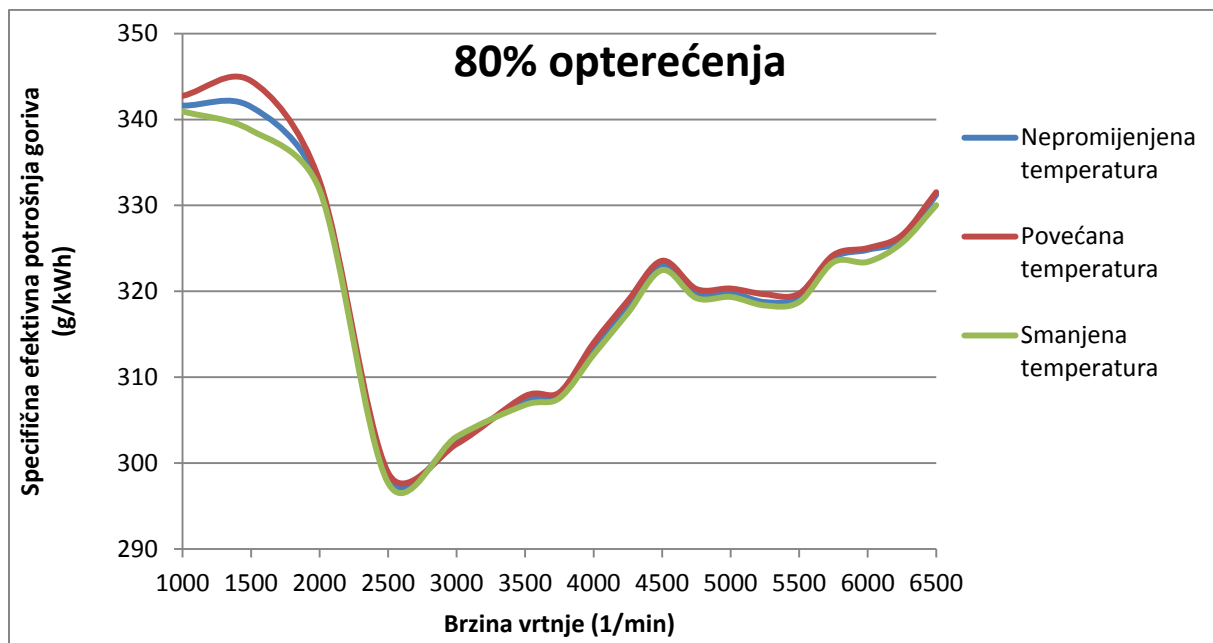
Slika 43. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja

Isto kao i na 100% opterećenja, efektivni moment neznatno raste boljim hlađenjem stijenki cilindra, dok slabijim hlađenjem ona opada.



**Slika 44. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja**

Kao i u režimu rada na 100% opterećenja, oktanski broj i u ovom režimu pada boljim hlađenjem stijenki cilindra za 2% dok lošijim hlađenjem cilindra raste za 2%.

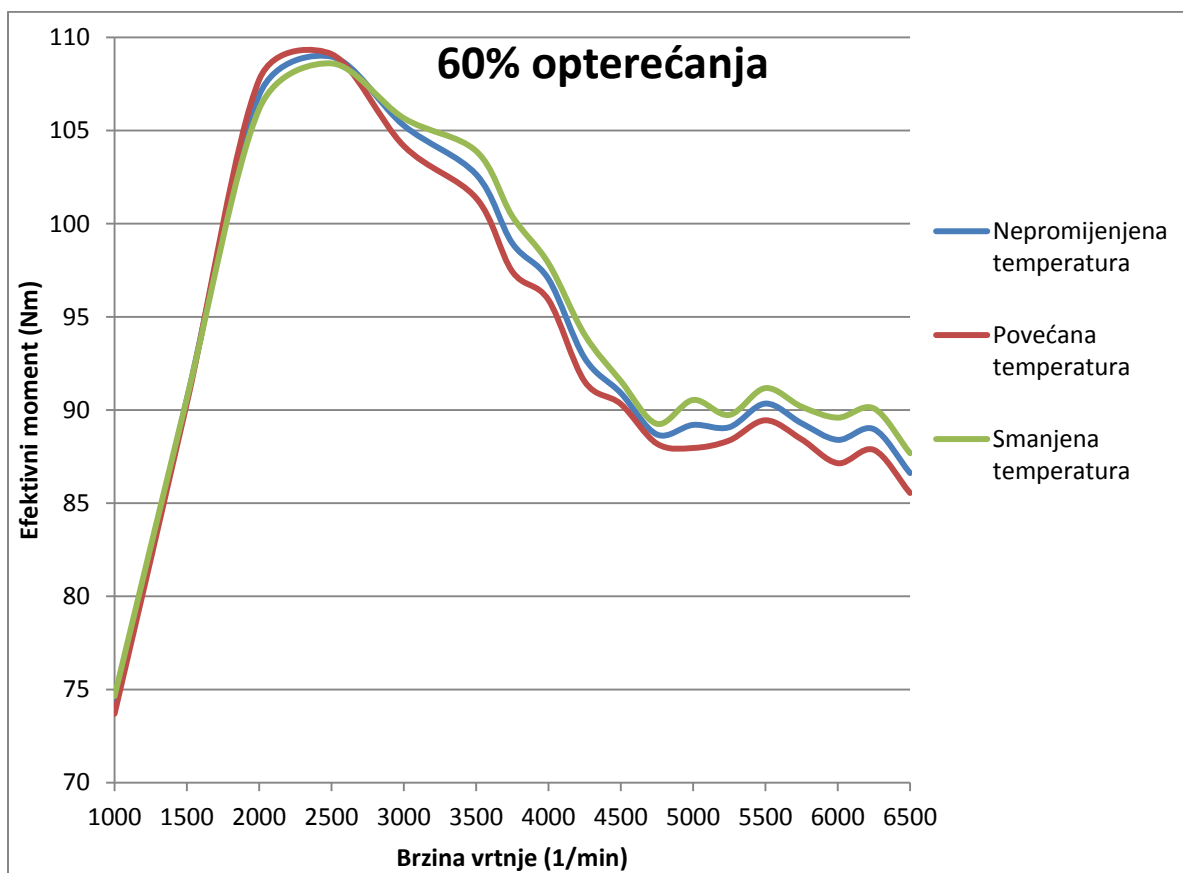


**Slika 45. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 80% opterećenja**

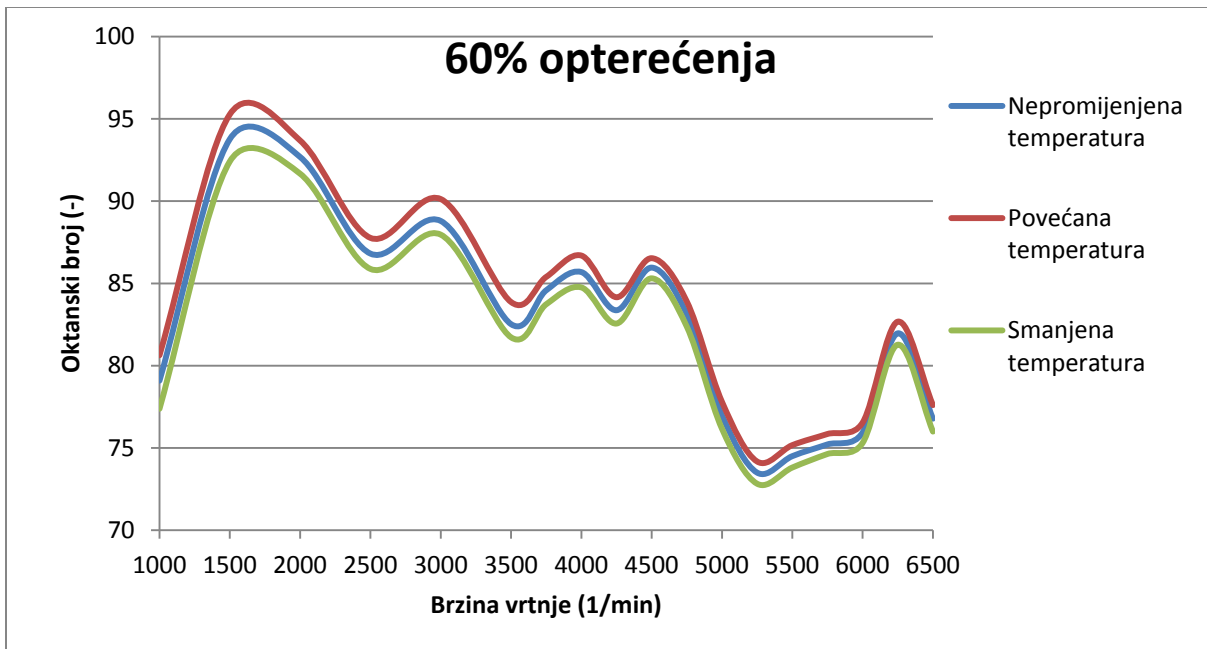


Kao i u režimu rada na 100% opterećenja, nema ni u specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva promjena većih od 0,5% na 80% opterećenja.

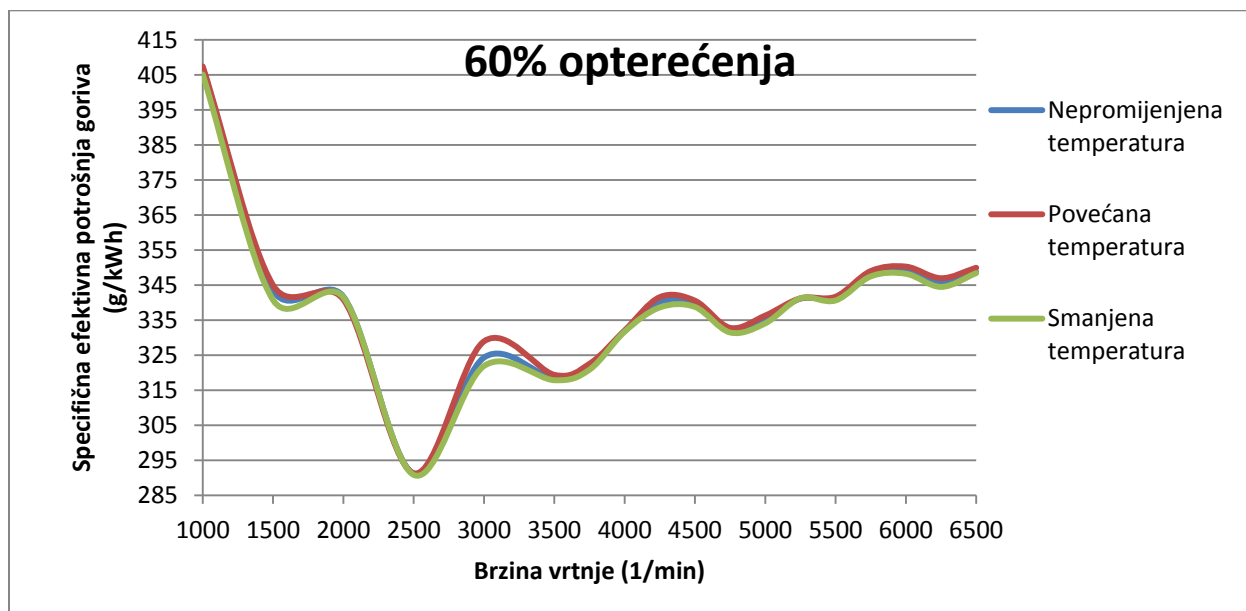
U sljedećem dijelu teksta će biti prikazani dijagrami promjene efektivnog momenta, potrebnog oktanskog broja i specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60, 40 i 20% opterećenja. Za sva tri slučaja vrijede ista opažanja kao i za slučajeve 80 i 100% opterećenjima: boljim hlađenjem efektivni moment neznatno raste, a lošijim pada, potreban oktanski broj se smanjuje boljim hlađenjem stijenki cilindra za otprilike 2% te nema značajnijih promjena u specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva.



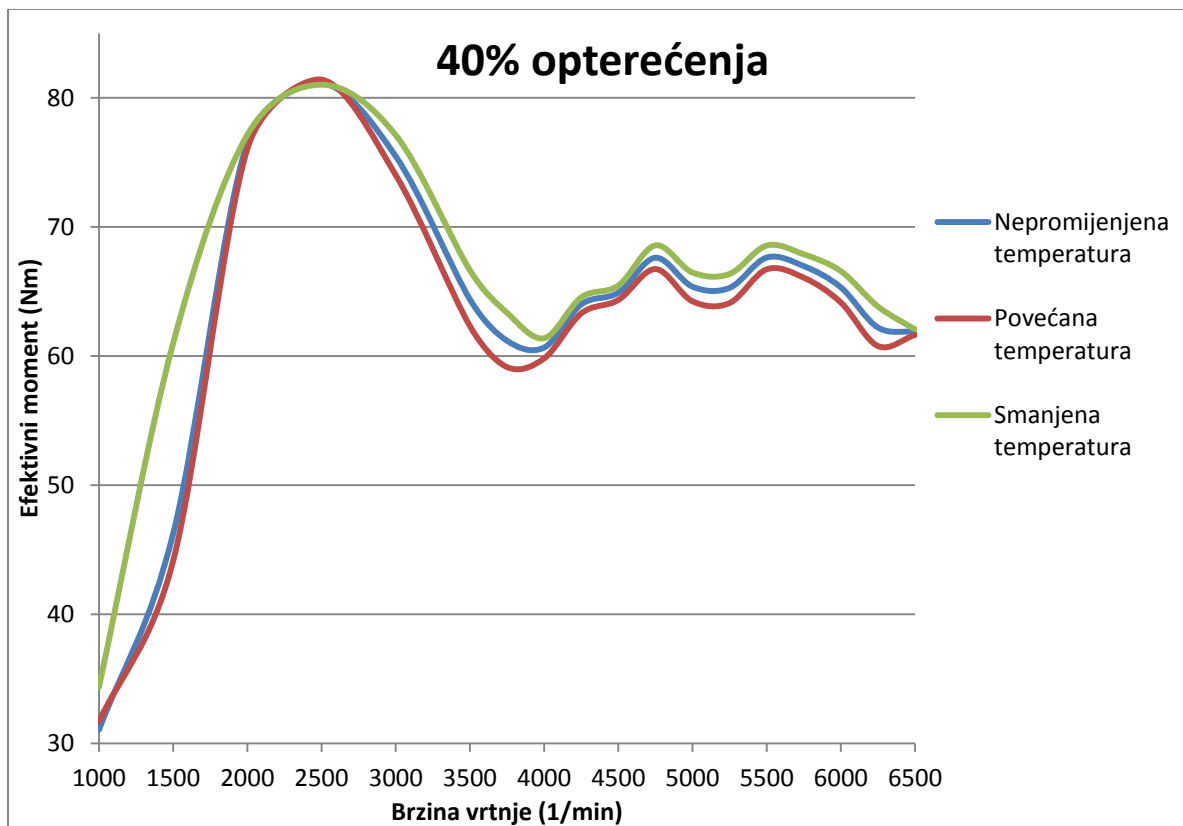
Slika 46. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja



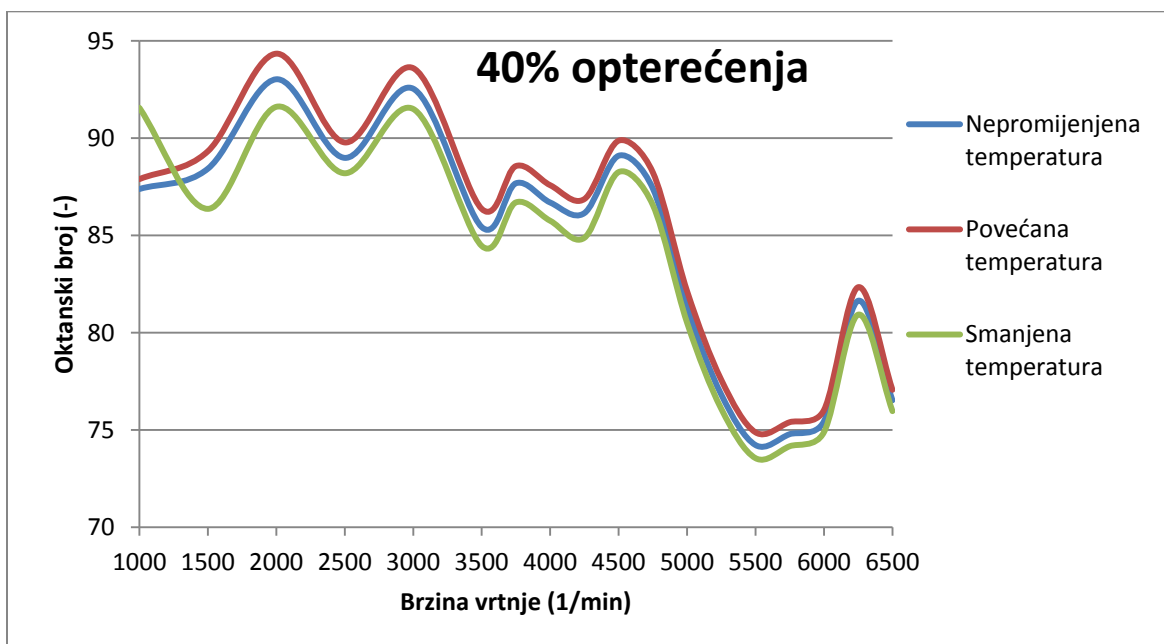
Slika 47. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja



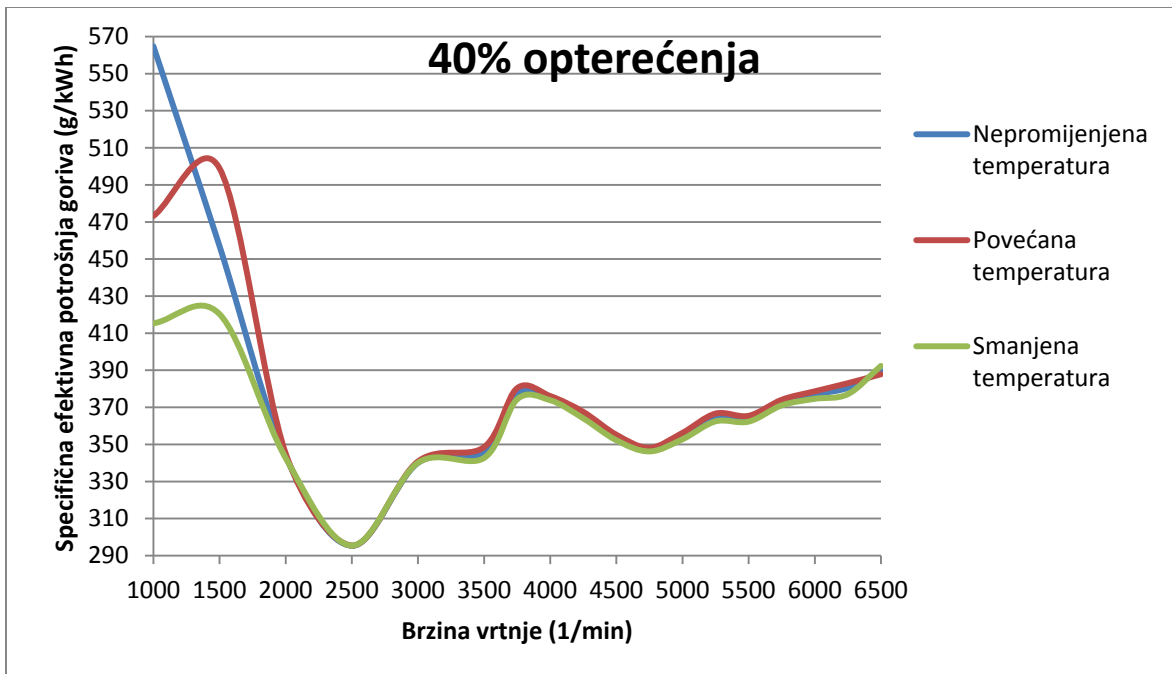
Slika 48. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 60% opterećenja



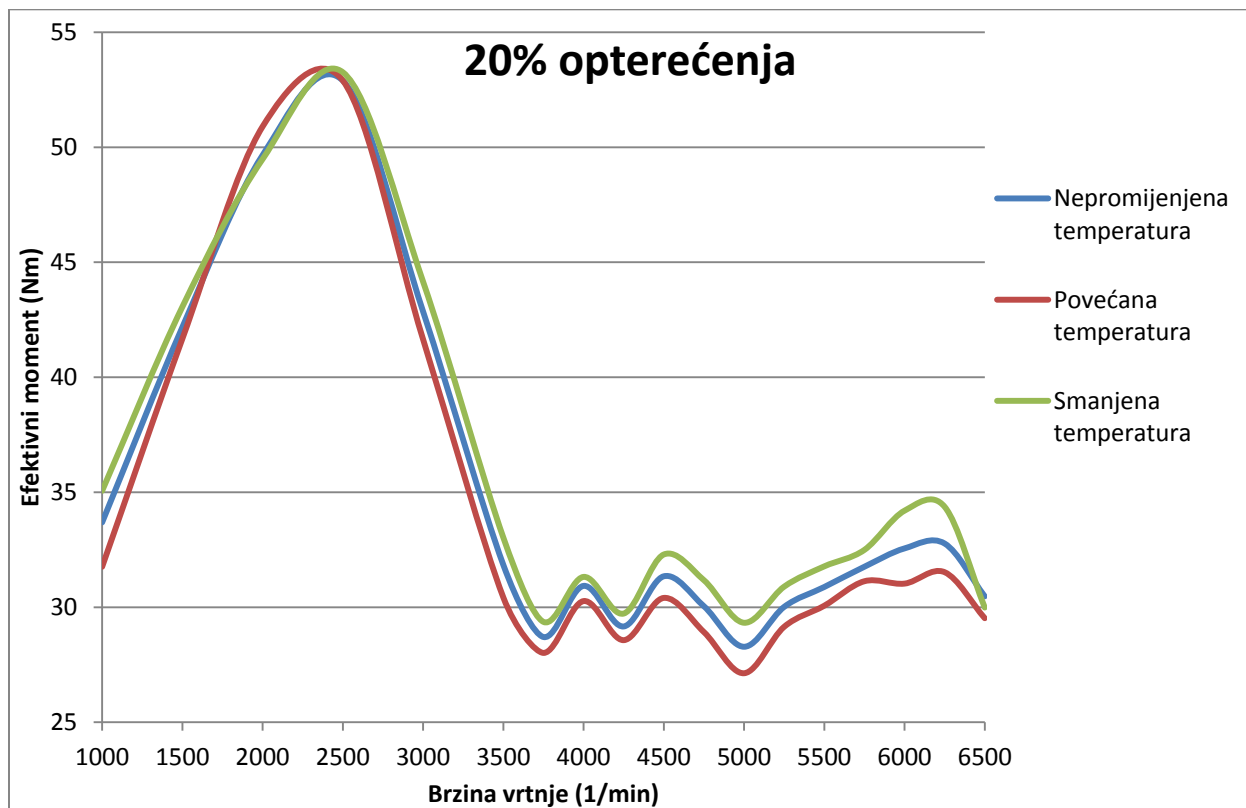
Slika 49. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja



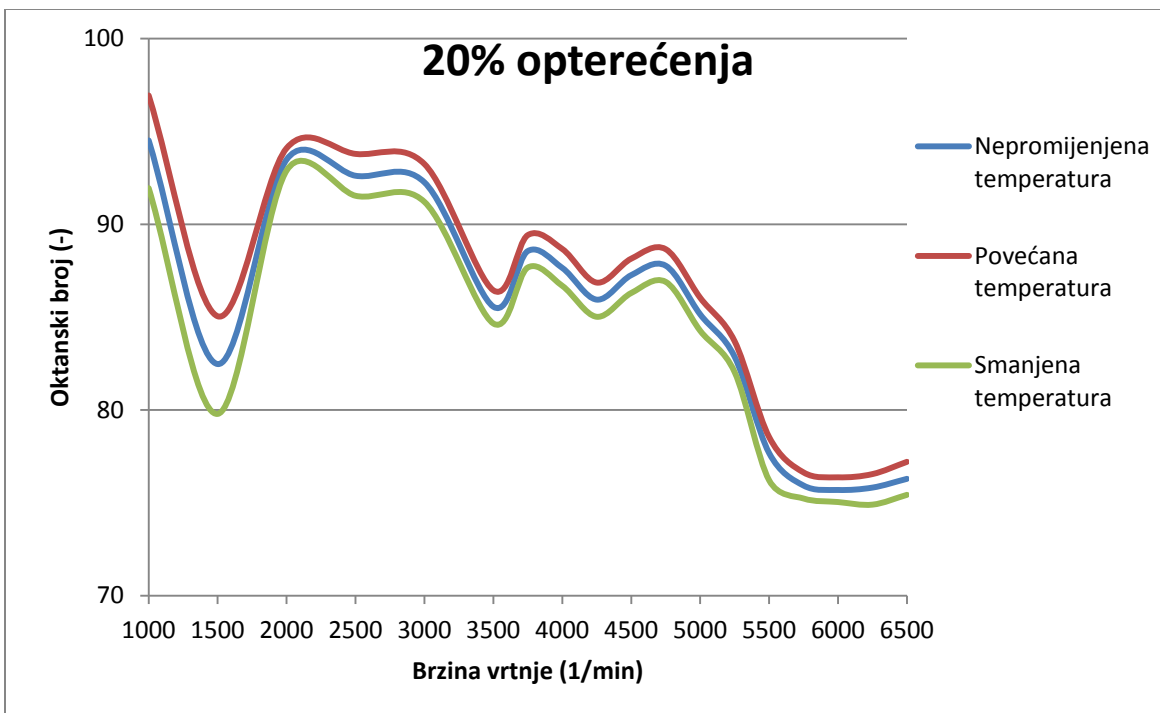
Slika 50. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja



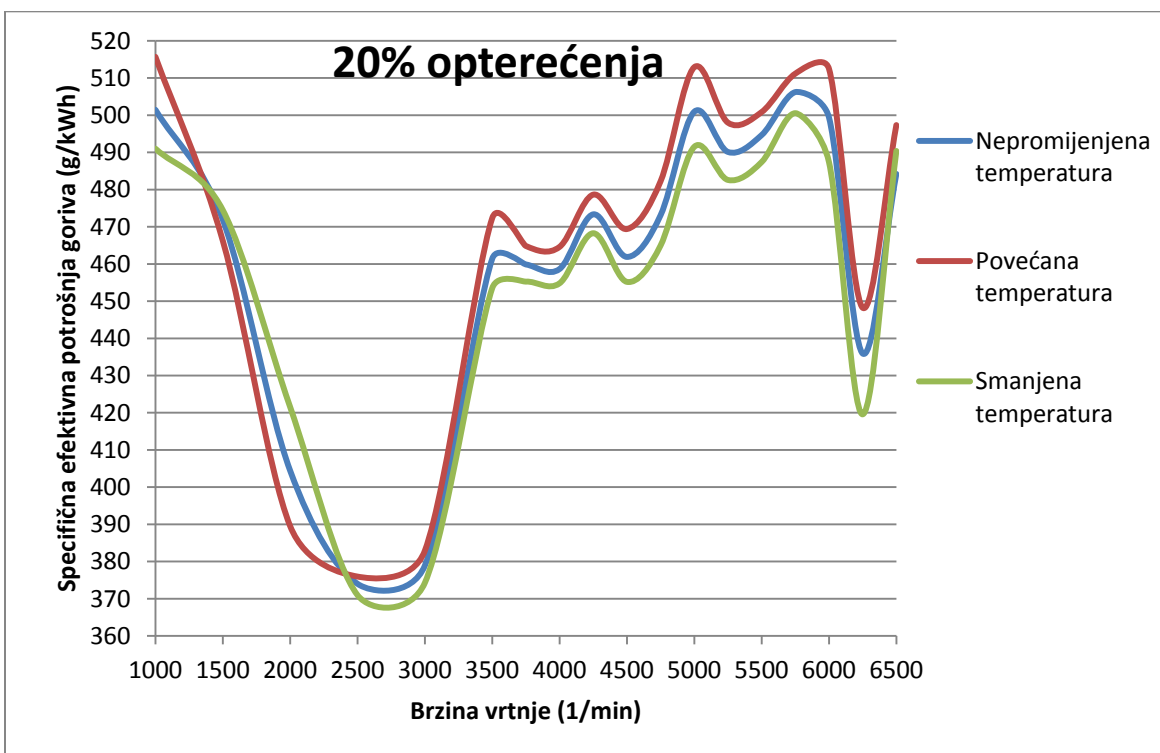
Slika 51. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 40% opterećenja



Slika 52. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja



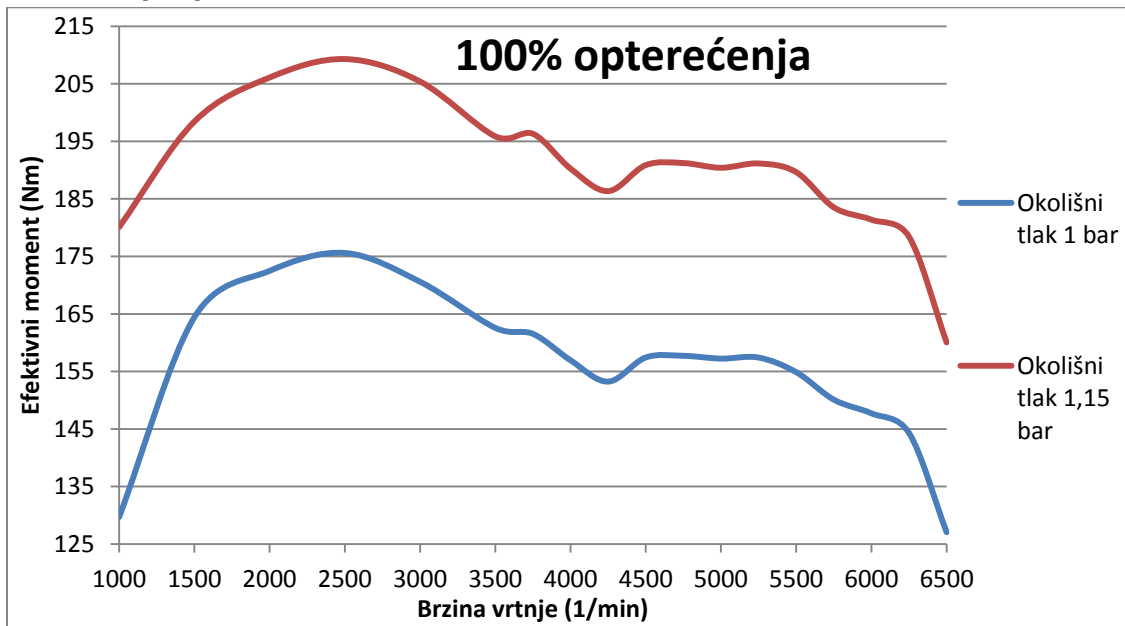
Slika 53. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja



Slika 54. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o promjeni temperature stijenke cilindra na 20% opterećenja

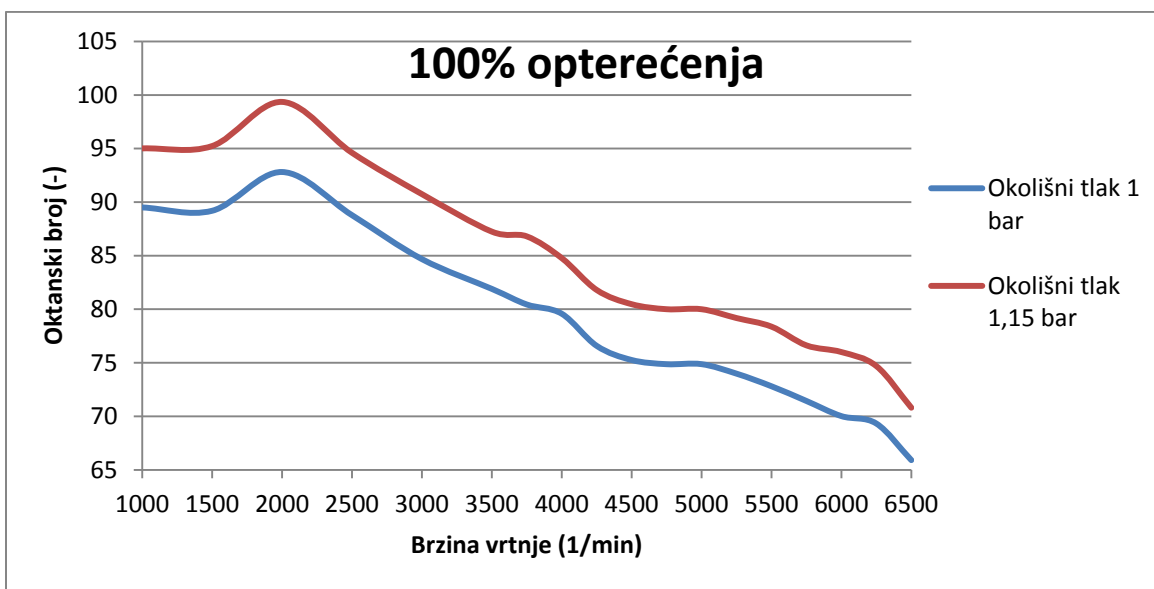
Na 20% opterećenja dolazi do malo značajnije promjene specifične efektivne potrošnje goriva. Boljim hlađenjem stijenki cilindara specifična efektivna potrošnja goriva pada za otprilike 2% kroz cijelo područje rada motora dok slabijim hlađenjem stijenki cilindara specifična efektivna potrošnja u istom omjeru raste.

#### 4.4. Nabijanje



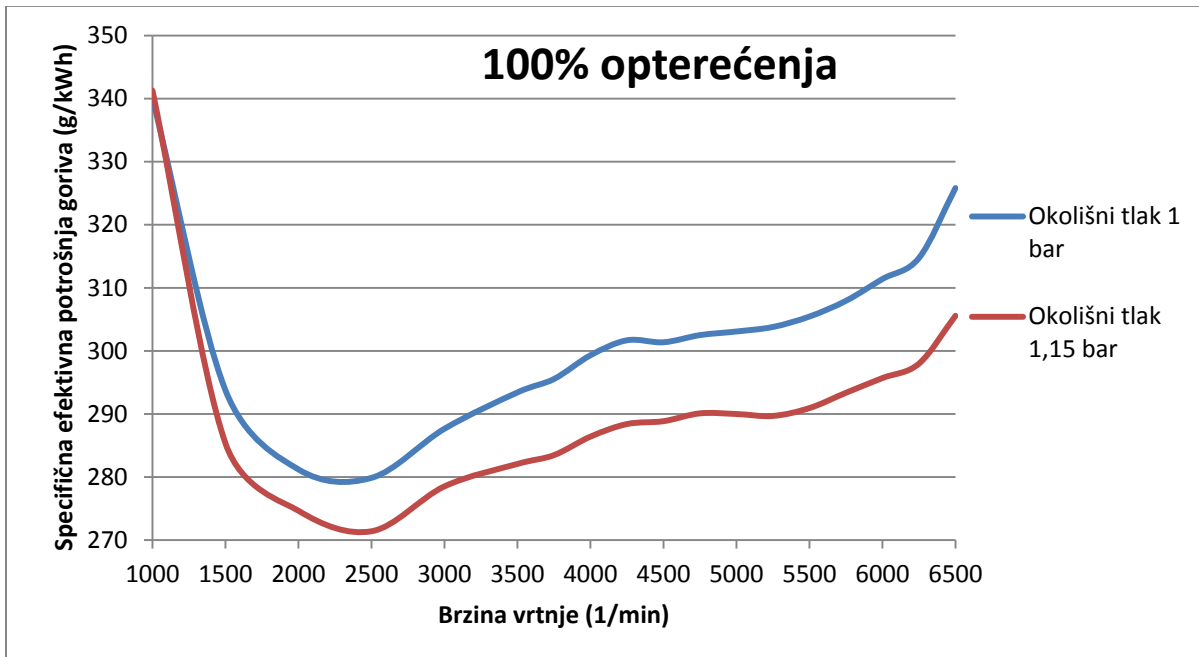
Slika 55. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja

Povećanjem tlaka na usisu iznos efektivnog momenta raste za 20%.



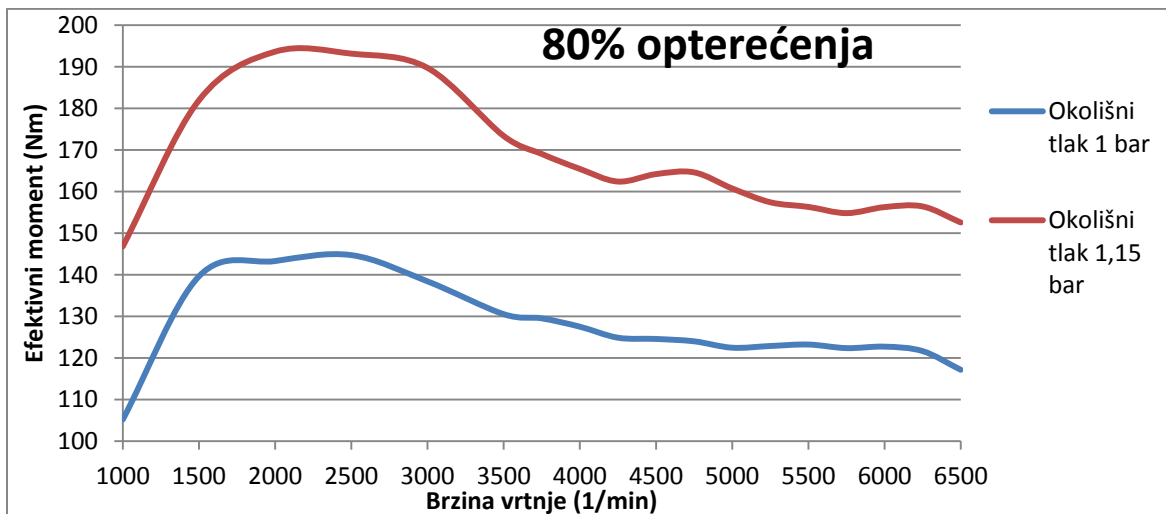
Slika 56. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja

Potreban oktanski broj povećanjem tlaka na usisu u cilindar raste za otprilike 6%. U odnosu na porast efektivnog momenta od 20% na maksimalnom opterećenju, to je vrlo mali udio porasta potrebnog oktanskog broja. U ovakvim uvjetima i konstruktivnim rješenjima motora, došlo bi do detonacije na nižim brzinama vrtnje gdje oktanski broj premašuje iznos od 95.



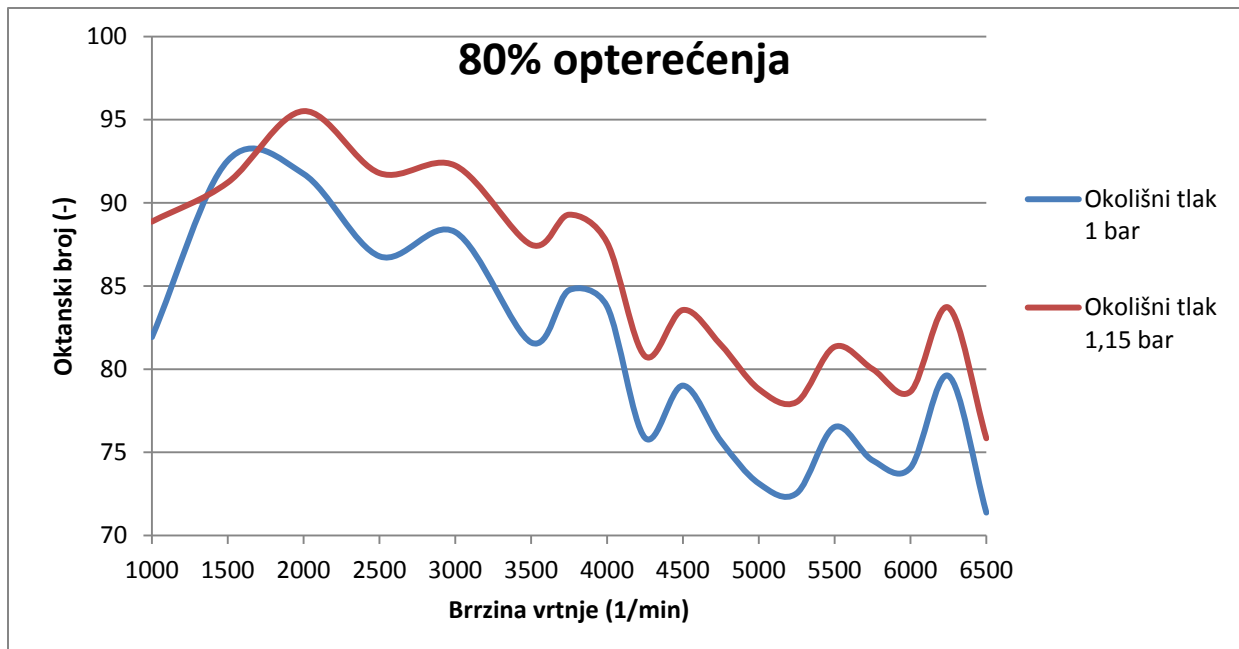
Slika 57. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 100% opterećenja

Na brzinama vrtnje motora većim od 1500 okretaja u minuti specifična efektivna potrošnja kreće padati u odnosu na specifičnu efektivnu potrošnju na modelu motora bez promjene parametara. Pad specifične efektivne potrošnje goriva iznosi otprilike 5%.



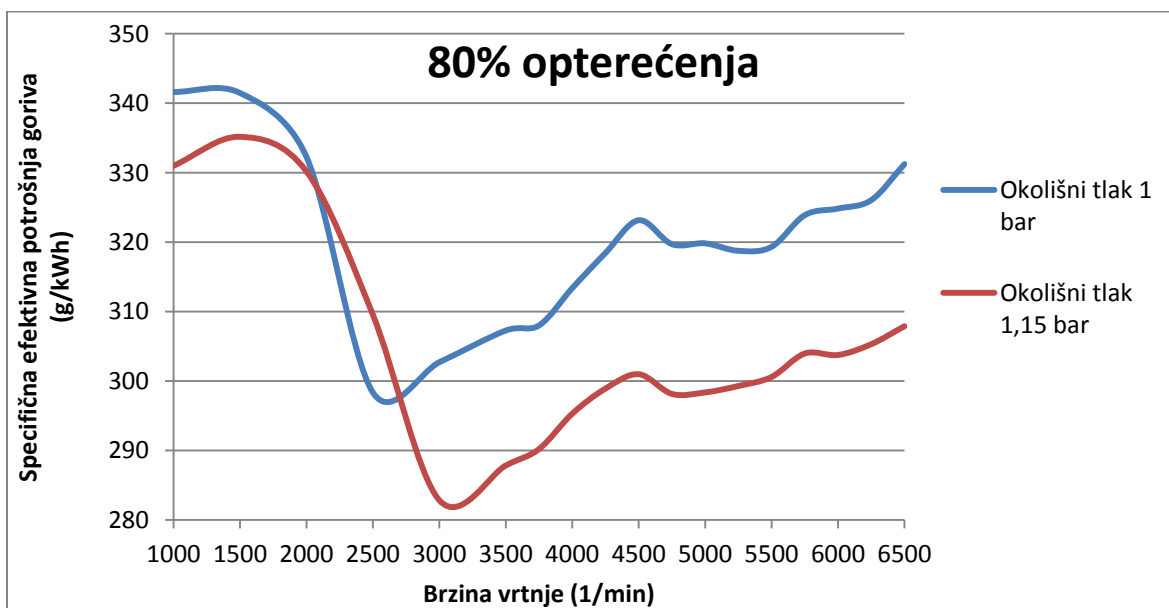
Slika 58. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja

Kao i u režimu rada na 100% opterećenja efektivni moment raste za otprilike 20%.



**Slika 59. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja**

Pri nižim brzinama vrtnje dolazi do laganog kolebanja potrebnog oktanskog broja u odnosu na oktanski broj potreban za rad motora bez promjene parametara dok na brzinama vrtnje većim od 2000 okretaja u minuti potreban oktanski broj za nabijanje raste u istom omjeru kao i na 100% opterećenja u odnosu na potreban oktanski broj za rad osnovnog modela.



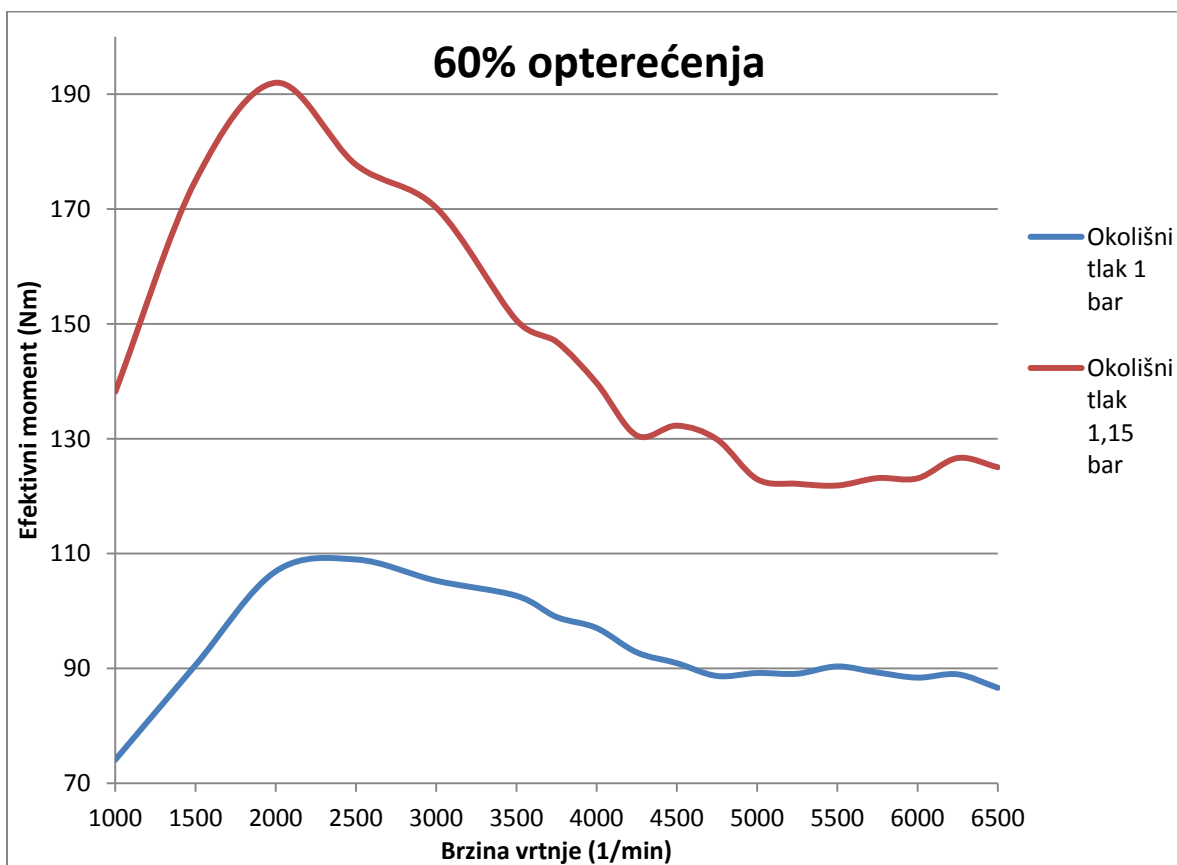
**Slika 60. Promjena specifične efektivne potrošnje u ovisnosti o nabijanju na 80% opterećenja**



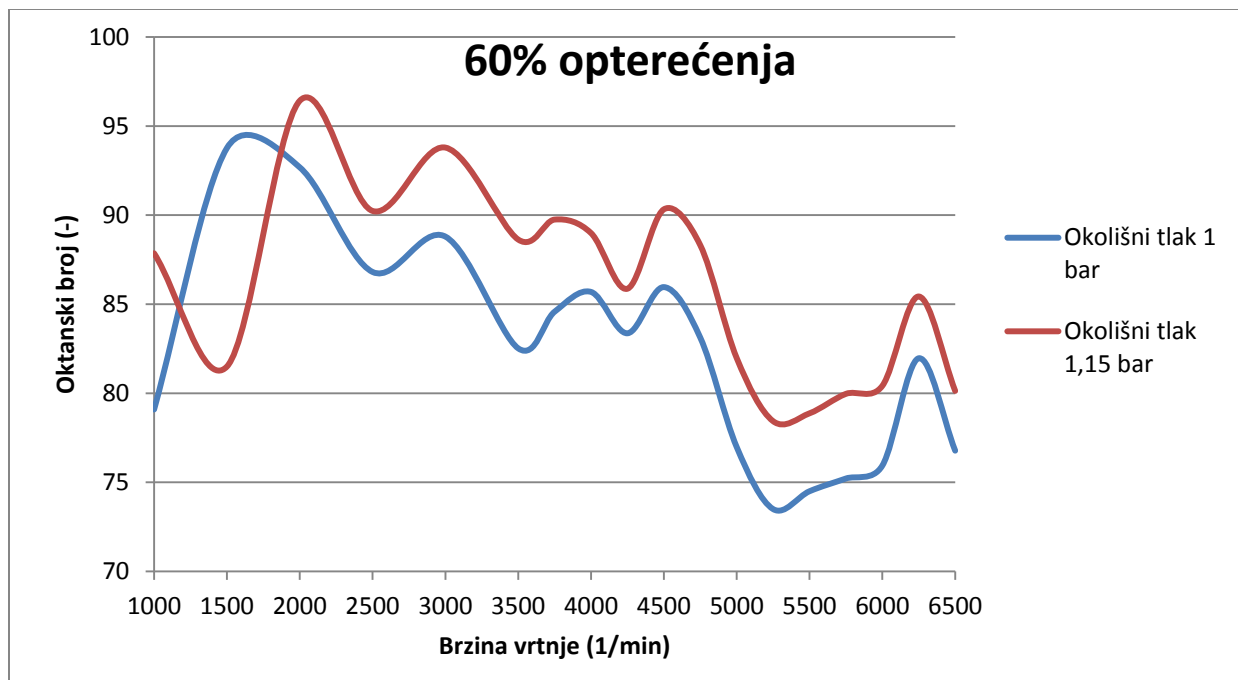
Pri nižim brzinama vrtnje također dolazi do kolebanja iznosa specifične efektivne potrošnje goriva u odnosu na osnovni model dok na brzinama vrtnje većim od 3000 okretaja u minuti specifična efektivna potrošnja opada u istom omjeru kao i na 100% opterećenja.

U sljedećem dijelu teksta bit će prikazani dijagrami promjena efektivnog momenta, potrebnog oktanskog broja i specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju za režime rada sa 60, 40 i 20% opterećenja motora. Za sva 3 slučaja će vrijediti ista opažanja kao i za 80 i 100% opterećenja motora. Povećanjem okolišnog tlaka efektivni moment raste za otprilike 20%, potreban oktanski broj raste za otprilike 6% dok specifična efektivna potrošnja goriva pada za otprilike 5%.

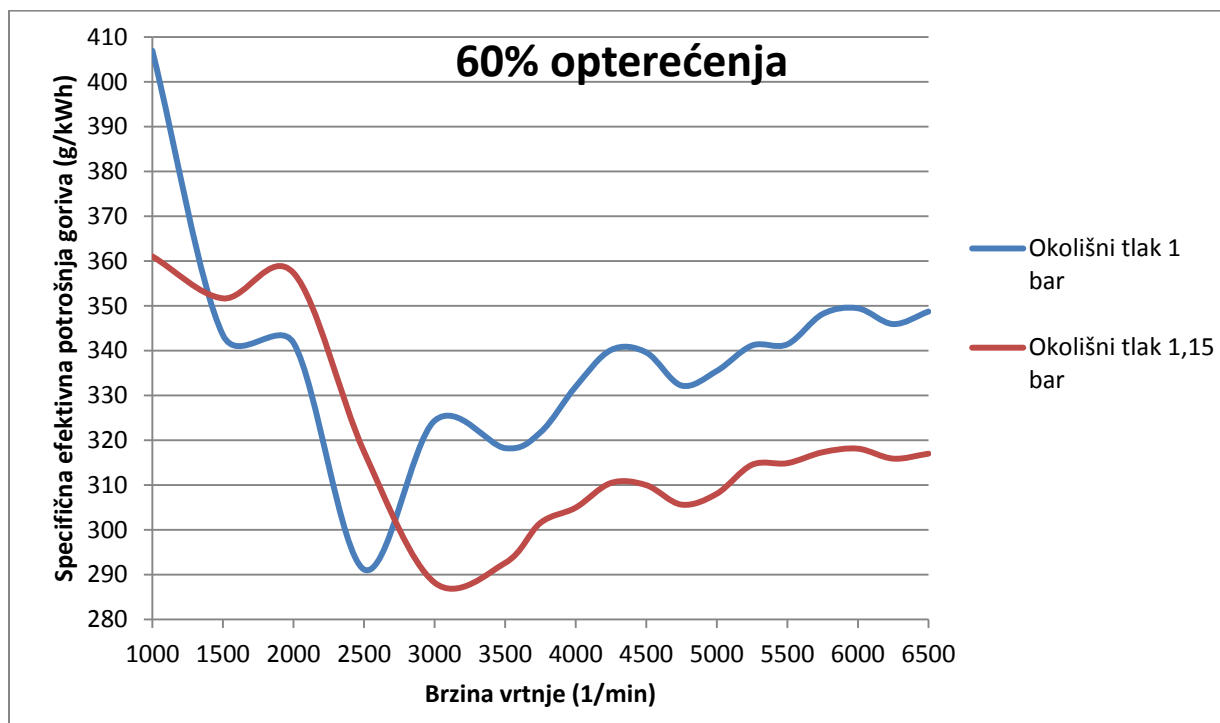
U sva 3 slučaja će biti prisutna blaga kolebanja krivulja potrebnih oktanskih brojeva i specifične efektivne potrošnje goriva na manjim brzinama vrtnje kao i u prethodna 2 slučaja.



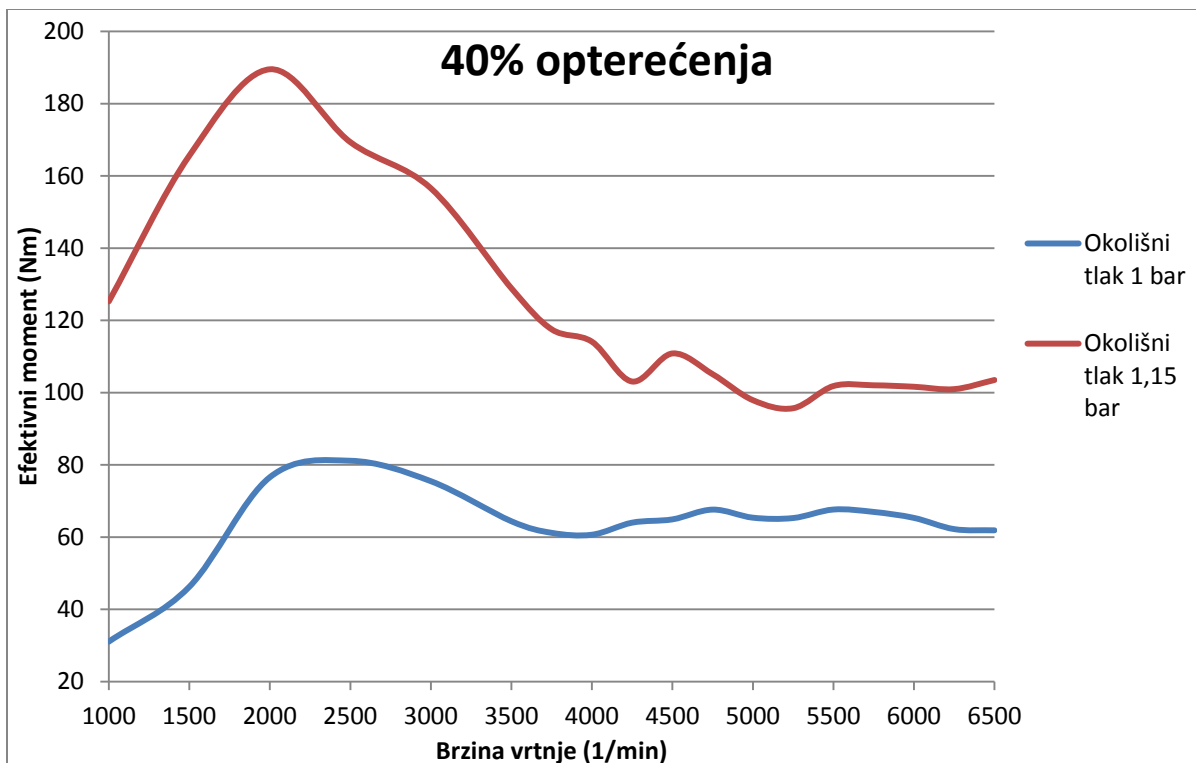
Slika 61. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja



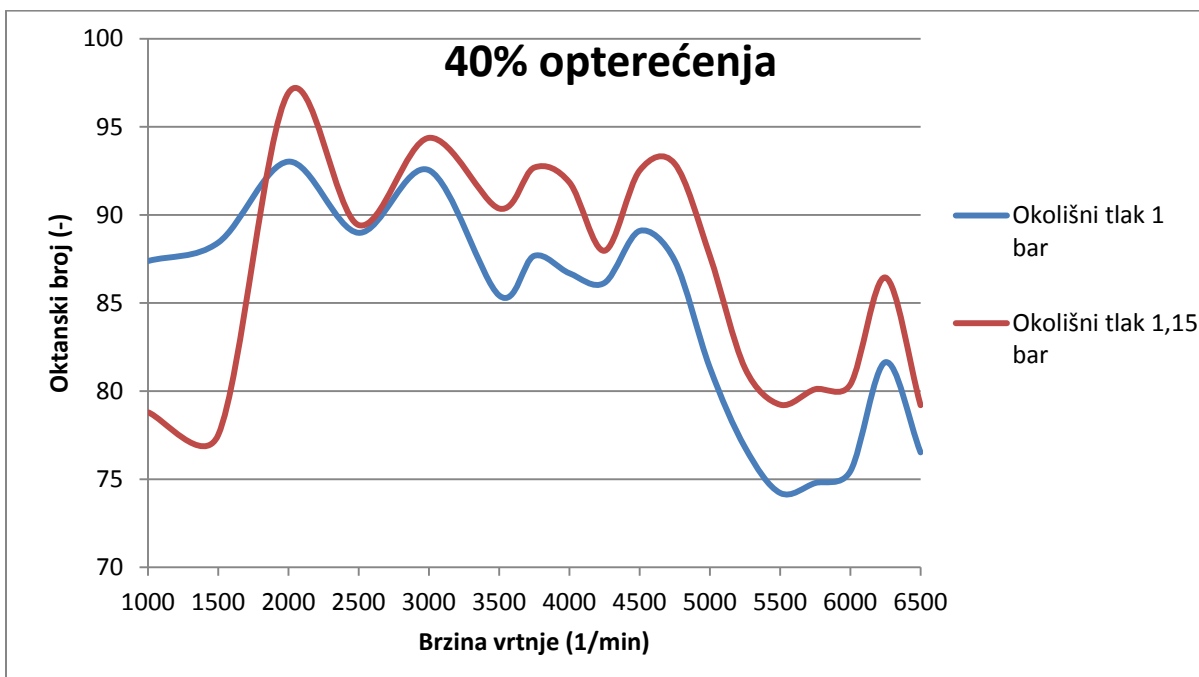
Slika 62. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja



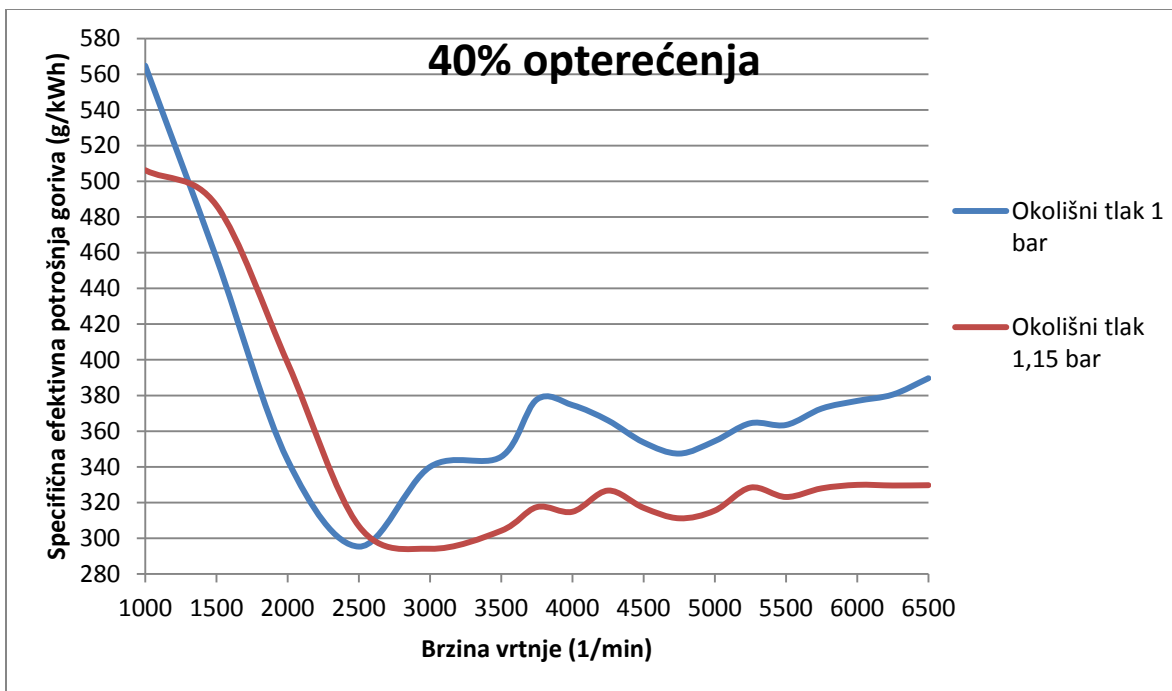
Slika 63. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 60% opterećenja



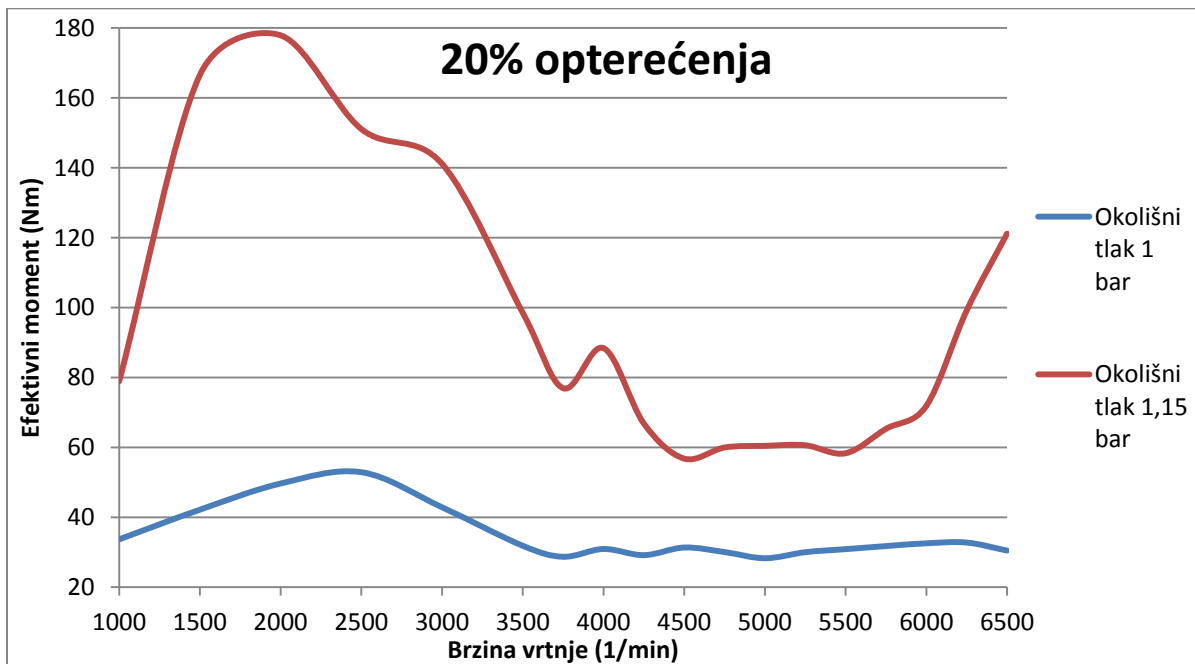
Slika 64. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja



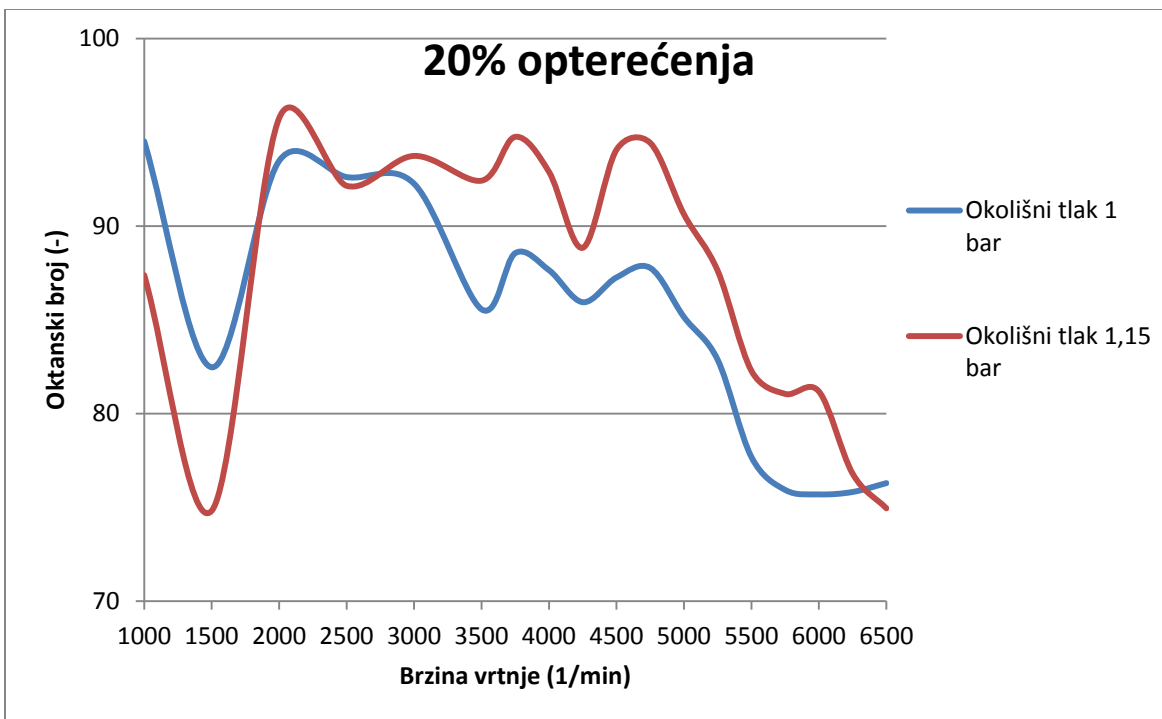
Slika 65. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja



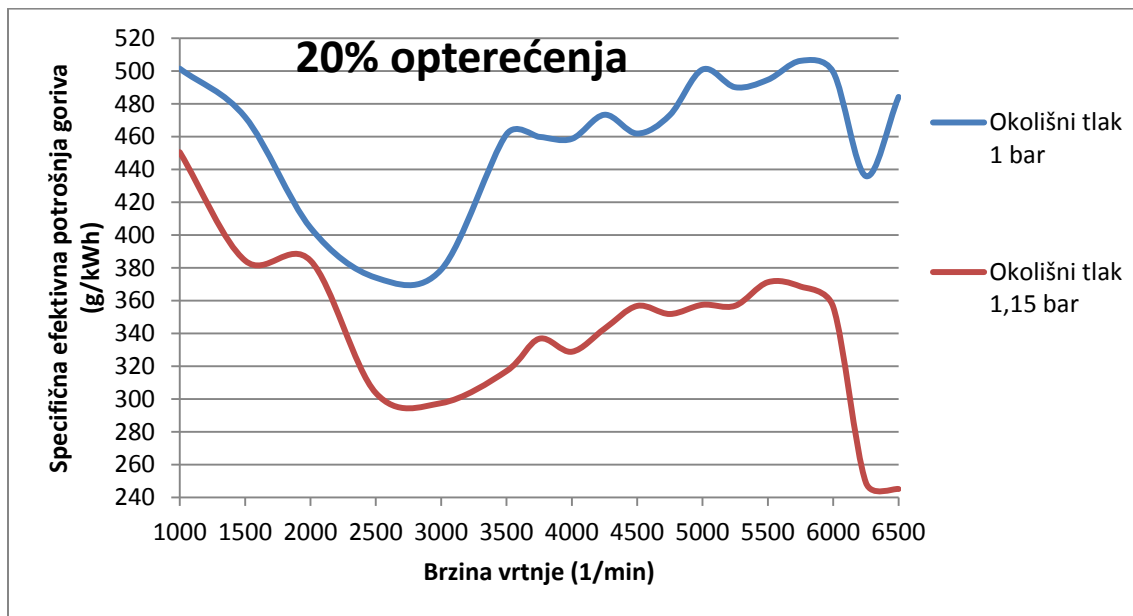
Slika 66. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 40% opterećenja



Slika 67. Promjena efektivnog momenta u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja



Slika 68. Promjena potrebnog oktanskog broja u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja



Slika 69. Promjena specifične efektivne potrošnje goriva u ovisnosti o nabijanju na 20% opterećenja

Važno je naglasiti da bi na ovakvim konstruktivnim rješenjima motora kakva su bila pretpostavljena u modelu AVL Boosta došlo do detonacije u svim režimima rada primjenom nabijanja zbog premašivanja potrebnog oktanskog broja od 95.

## 5. Zaključak

Provođenjem simulacija u programskom paketu AVL Boost pokazano je u dijagramima da promjenom parametara koje kao posljedicu imaju povećanje tlaka na kraju takta kompresije dolazi do povećanja izlazne snage motora, smanjenja specifične efektivne potrošnje goriva ali i do potrebe za većim oktanskim brojem u gorivu kako ne bi došlo do pojave neželjenog načina izgaranja, odnosno detonacije. Povećanje tlaka skraćuje vrijeme zakašnjenja zapaljenja jer se lakše doseže temperatura zapaljenja u neizgorenom dijelu smjese te većom brzinom fronte plamena postoji mogućnost naglog porasta tlaka u neizgorenom dijelu smjese.

Povećanjem kompresijskog omjera raste efektivna snaga motora za 7%, potreban iznos oktanskog broja raste za 10%, a specifična efektivna potrošnja goriva pada za 7%. Povećanjem kuta prepaljenja snaga raste za 0,5%, iznos potrebnog oktanskog broja raste za 3%, a specifična efektivna potrošnja pada za 3%. Smanjenjem temperature stijenki cilindra snaga raste za 0,5%, iznos potrebnog oktanskog broja pada za 2% dok promjena u specifičnoj efektivnoj potrošnji nema za smanjenje temperature stijenki cilindra za 15%. Nabijanjem snaga raste za 20%, iznos potrebnog oktanskog broja za 6% dok specifična efektivna potrošnja goriva pada za 5%.

Najveći porast izlazne snage daje nabijanje motora. Nabijanjem motora potreban oktanski broj raste u manjem iznosu nego povećanjem kompresijskog omjera što dovodi do zaključka o korisnosti primjene uređaja za nabijanje zraka na usisu u cilindre poput kompresora. Uz to, nabijanje u velikoj mjeri smanjuje specifičnu efektivnu potrošnju goriva što je još jedan od razloga primjene kompresora na usisu pod uvjetom da su osigurani uvjeti da ne dođe do detonantnog izgaranja.

Smanjenje kuta prepaljenja u maloj mjeri smanjuje izlaznu snagu i povećava specifičnu efektivnu potrošnju goriva u odnosu na smanjenje potrebnog oktanskog broja za rad motora bez pojave detonacije.

Povećanje kompresijskog omjera najnepovoljnije utječe na rad motora. Izlazna snaga raste u manjem omjeru nego rast snage postignut nabijanjem dok potreban oktanski broj raste u većem omjeru nego primjenom nabijanja. S druge strane, smanjenje kompresijskog omjera dovodi do većeg pada oktanskog broja u odnosu na pad snage i povećanje specifične efektivne potrošnje goriva.

## 6. Literatura

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem , Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [2] Ljubas, Juretić: Podloge za predavanja iz kolegija Gorivo i mazivo, Sveučilište u Zagrebu
- [3] AVL Boost Users guide
- [4] Kozarac, Sjerić, Šagi: Računalne simulacije u razvoju motora i vozila, Sveučilište u Zagrebu