

# Optimizacija usisnog i ispušnog sustava motora trkaćeg vozila

---

Suša, Arian

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:235:770611>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Arian Suša**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Darko Kozarac

Student:

Arian Suša

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem svom mentoru, profesoru Darku Kozarcu, na pomoći i savjetima koji su mi omogućili da napravim ovaj završni rad.

Zahvaljujem i prijateljima i kolegama koji su mi pomogli prilikom mjerenja i izrade ovog rada, a posebno kolegama Zvonimiru Ercegovcu i Nicku Findriku.

Arian Suša



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                                                        | Prilog |
| Klasa:                                                       |        |
| Ur.broj:                                                     |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Arian Suša** Mat. br.: 0035203444

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija usisnog i ispušnog sustava motora trkačkog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Intake and exhaust manifold optimization of racing vehicle engine**

Opis zadatka:

Utrke automobila s jedne su strane prikaz vještine vozača, ali su s druge strane prikaz i mogućnosti trkačkog vozila. Prilikom konstruiranja trkačkog vozila cilj je dobiti vozilo koje će pouzdano i brzo prijeći određenu stazu. Kako bi vozila bila što više ujednačena postoji niz pravila koja takva vozila moraju zadovoljiti, a koja su definirana tehničkim pravilnikom discipline i klase u kojoj se vozač s vozilom natječe. U ovom radu potrebno je primjenom simulacijskog alata odrediti promjene na usisnom i ispušnom sustavu motora koje će dovesti do poboljšanja performansi vozila klase 4 koje se natječe u disciplini auto slalom i kronometar vožnje. Vozilo je temeljeno na automobilu Peugeot 106 s 1.3 dm<sup>3</sup> motorom kodne oznake TU2J2/Z. U radu je potrebno:

- Prikazati osnovna tehnička pravila za klasu i disciplinu predmetnog vozila.
- U programu AVL Boost izraditi model motora koji se trenutno nalazi u predmetnom vozilu.
- Pomoću simulacija odrediti geometriju usisnog sustava s kojim će se ostvariti poboljšanje u značajkama rada.
- Pomoću simulacija odrediti geometriju ispušnog sustava s kojim će se ostvariti poboljšanje u značajkama rada.
- Izračunati i prikazati konačne značajke rada motora primjenom optimizirane geometrije usisnog i ispušnog sustava te ih usporediti s izvornim rezultatima.
- Analizirati 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:  
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2020.  
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.  
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.  
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.  
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

**SADRŽAJ**

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SADRŽAJ .....                                                                                | II  |
| POPIS SLIKA .....                                                                            | III |
| POPIS TABLICA.....                                                                           | V   |
| SAŽETAK.....                                                                                 | VI  |
| SUMMARY .....                                                                                | VII |
| 1. UVOD.....                                                                                 | 1   |
| 1.1. Općenito o auto slalomu i kronometru.....                                               | 1   |
| 1.2. Tehnički pravilnik .....                                                                | 2   |
| 1.3. Peugeot 106.....                                                                        | 3   |
| 1.4. Općenito o optimizaciji usisnog i ispušnog sustava.....                                 | 4   |
| 2. IZRADA MODELA MOTORA U PROGRAMSKOM PAKETU AVL BOOST .....                                 | 7   |
| 2.1. Izrada simulacijskog modela motora .....                                                | 7   |
| 2.2. Usporedba rezultata sa stvarnim podacima.....                                           | 11  |
| 3. OPTIMIZACIJA USISNOG SUSTAVA .....                                                        | 14  |
| 3.1. Konstrukcija usisne grane .....                                                         | 16  |
| 3.2. Simulacijski model motora s optimiziranim usisnim sustavom.....                         | 18  |
| 3.3. Usporedba rezultata s inicijalnim modelom motora .....                                  | 21  |
| 4. OPTIMIZACIJA ISPUŠNOG SUSTAVA.....                                                        | 23  |
| 4.1. Konfiguracija ispušnog sustava 4-1 .....                                                | 27  |
| 4.2. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 .....                                              | 33  |
| 4.2.1. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 26 mm .....                             | 35  |
| 4.2.2. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 28 mm .....                             | 37  |
| 4.2.3. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 30 mm .....                             | 39  |
| 4.2.4. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 32 mm .....                             | 41  |
| 4.2.5. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 34 mm .....                             | 41  |
| 4.2.6. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 36 mm .....                             | 45  |
| 4.2.7. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 38 mm .....                             | 47  |
| 4.2.8. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 40 mm .....                             | 49  |
| 4.2.9. Odabir najpovoljnije konfiguracije ispušnog sustava 4-2-1 .....                       | 51  |
| 4.3. Odabir najpovoljnije konfiguracije ispušnog sustava .....                               | 54  |
| 5. USPOREDBA OPTIMIZIRANOG USISNOG I ISPUŠNOG SUSTAVA SA<br>INICIJALNIM MODELOM MOTORA ..... | 57  |
| 6. ZAKLJUČAK.....                                                                            | 59  |
| LITERATURA.....                                                                              | 60  |
| PRILOZI.....                                                                                 | 61  |

**POPIS SLIKA**

|             |                                                                                                        |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.1.  | Krivulja tlaka prije usisnog ventila .....                                                             | 5  |
| Slika 1.2.  | Bilanca energije kod rezonantnog nabijanja .....                                                       | 6  |
| Slika 2.1.  | Dijelovi usisnog i ispušnog sustava .....                                                              | 8  |
| Slika 2.2.  | Izmjereni dijagram podizaja usisnog i ispušnog ventila .....                                           | 9  |
| Slika 2.3.  | Inicijalni model motora u AVL Boost-u .....                                                            | 10 |
| Slika 2.4.  | Usporedba krivulja momenta stvarnog motora i simulacije .....                                          | 11 |
| Slika 2.5.  | Usporedba krivulja snage stvarnog motora i simulacije .....                                            | 12 |
| Slika 2.6.  | Stupanj punjenja $\lambda$ simulacijskog modela motora .....                                           | 13 |
| Slika 3.1.  | Usisni sustav formule .....                                                                            | 14 |
| Slika 3.2.  | Usisna tijela s Honde CBR1000RR i usisne trubice .....                                                 | 15 |
| Slika 3.3.  | Usisna grana s prirubnicom .....                                                                       | 17 |
| Slika 3.4.  | Probna geometrija usisne grane .....                                                                   | 17 |
| Slika 3.5.  | Simulacijski model motora sa izmijenjenim usisnim sustavom .....                                       | 18 |
| Slika 3.6.  | Prikaz usporedbe krivulja momenta za različite dužine usisnih cijevi .....                             | 19 |
| Slika 3.7.  | Prikaz usporedbe površina ispod krivulje momenta .....                                                 | 20 |
| Slika 3.8.  | Dijagram momenta .....                                                                                 | 21 |
| Slika 3.9.  | Dijagram snage .....                                                                                   | 21 |
| Slika 3.10. | Usporedba momenta inicijalnog modela i nakon optimizacije usisa .....                                  | 22 |
| Slika 3.11. | Usporedba stupnja punjenja inicijalnog modela motora i nakon optimizacije usisa .....                  | 22 |
| Slika 4.1.  | Moguće konfiguracije ispušnog sustava kod četverocilindarskog motora .....                             | 23 |
| Slika 4.2.  | Utjecaj načina spajanja cijevi na srednji efektivni tlak .....                                         | 24 |
| Slika 4.3.  | Ispušna grana Ferrarijevog F1 bolida s V10 motorom .....                                               | 25 |
| Slika 4.4.  | Simulacijski model motora s 4-1 ispušnim sustavom .....                                                | 27 |
| Slika 4.5.  | Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-1 .....                    | 29 |
| Slika 4.6.  | Detalj dijagrama usporedbe površina ispod svake krivulje momenta .....                                 | 29 |
| Slika 4.7.  | Usporedba površina ispod krivulja momenta .....                                                        | 31 |
| Slika 4.8.  | Dijagram momenta za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm i dužine cijevi 660 mm .....                      | 31 |
| Slika 4.9.  | Dijagram snage za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm i dužine cijevi 660 mm ..                           | 32 |
| Slika 4.10. | Stupanj punjenja za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm i dužine cijevi 660 mm.                           | 32 |
| Slika 4.11. | Simulacijski model motora sa 4-2-1 ispušnim sustavom .....                                             | 33 |
| Slika 4.12. | Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm .....   | 35 |
| Slika 4.13. | Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm i kombinacije dužina cijevi 400 mm-310 mm ..... | 36 |
| Slika 4.14. | Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm i kombinacije dužina cijevi 400 mm - 310 mm ..... | 36 |
| Slika 4.15. | Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm .....   | 37 |
| Slika 4.16. | Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm .....    | 38 |
| Slika 4.17. | Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm .....      | 38 |
| Slika 4.18. | Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju S4-2-1 promjera 30 mm .....  | 39 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 4.19. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....   | 40 |
| Slika 4.20. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....     | 40 |
| Slika 4.21. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm.....  | 41 |
| Slika 4.22. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....   | 42 |
| Slika 4.23. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....     | 42 |
| Slika 4.24. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm ..... | 43 |
| Slika 4.25. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....   | 44 |
| Slika 4.26. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....     | 44 |
| Slika 4.27. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm.....  | 45 |
| Slika 4.28. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....   | 46 |
| Slika 4.29. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm.....     | 46 |
| Slika 4.30. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm.....  | 47 |
| Slika 4.31. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm.....   | 48 |
| Slika 4.32. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm.....     | 48 |
| Slika 4.33. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm.....  | 49 |
| Slika 4.34. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm.....   | 50 |
| Slika 4.35. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm.....     | 50 |
| Slika 4.36. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm .....  | 52 |
| Slika 4.37. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm .....  | 52 |
| Slika 4.38. Stupanj punjenja za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm .....  | 53 |
| Slika 4.39. Usporedba krivulja momenta za 4-1 i 4-2-1 .....                                                      | 54 |
| Slika 4.40. Usporedba krivulja snage za 4-1 i 4-2-1 .....                                                        | 55 |
| Slika 4.41. Usporedba krivulja stupnja punjenja za 4-1 i 4-2-1 .....                                             | 55 |
| Slika 5.1. Usporedba krivulja momenta inicijalnog i optimiziranog modela motora .....                            | 57 |
| Slika 5.2. Usporedba krivulja snage inicijalnog i optimiziranog modela motora .....                              | 57 |
| Slika 5.3. Usporedba krivulja stupnja punjenja inicijalnog i optimiziranog modela motora... ..                   | 58 |



**POPIS TABLICA**

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 3.1. Usporedba površina ispod krivulja momenta.....                                      | 20 |
| Tablica 4.1. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-1 .....                   | 28 |
| Tablica 4.2. Prikaz najvećih površina ispod krivulja momenta .....                               | 30 |
| Tablica 4.3. Prikaz vrijednosti momenata.....                                                    | 30 |
| Tablica 4.4. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm .....  | 35 |
| Tablica 4.5. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm .....  | 37 |
| Tablica 4.6. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm .....  | 39 |
| Tablica 4.7. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm .....  | 41 |
| Tablica 4.8. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm .....  | 43 |
| Tablica 4.9. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm .....  | 45 |
| Tablica 4.10. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm ..... | 47 |
| Tablica 4.11. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm ..... | 49 |
| Tablica 4.12. Prikaz površina ispod krivulja momenta za najpovoljnije konfiguracije ispuha ..... | 51 |

---

**SAŽETAK**

Kod pripreme natjecateljskih vozila ključno je posvetiti posebnu pažnju razvoju i pripremi motora kako bi motor bio pouzdan i proizvodio maksimalnu moguću snagu.

Kao subjekt istraživanja u ovom radu odabran je natjecateljski automobil temeljen na Peugeotu 106 koji prema pravilniku natjecanja spada u Grupu 2 – Sprint, klasu 5. Poštujući pravila definirana tehničkim pravilnikom, pomoću numeričkih simulacija, izmjenama usisnog i ispušnog sustava ostvareno je povećanje snage.

Koristeći se programskim paketom za simulacije rada motora s unutarnjim izgaranjem AVL Boost™ verzija 2013.2, prvo je izrađen simulacijski model originalnog motora koji je s dovoljnom preciznošću opisao njegovo ponašanje. Kako bi analizirali mogućnosti povećanja momenta i efektivne snage atmosferskih Ottovih motora provedene su detaljne analize i usporedbe različitih tipova usisnih i ispušnih sustava. Na kraju rada je provedena usporedba početnog modela motora i optimiziranog modela kako bi se prikazao napredak.

Ključne riječi: Ottov motor, optimizacija usisnog sustava, optimizacija ispušnog sustava, AVL Boost™, natjecateljsko vozilo

---

**SUMMARY**

When building a competition vehicle, it is crucial to pay special attention to the engine development and tuning so that the engine is reliable and produces maximum possible power.

As a subject of research in this paper, a competition car based on Peugeot 106 was selected, which according to the competition rulebook belongs to Group 2 - Sprint, class 5.

Obeying the technical regulations, using the software package for simulation of operation of the internal combustion engine AVL Boost™ version 2013.2, a simulation model of the original engine was first developed and described with sufficient precision in its behavior. In order to analyze the possibilities for increasing torque and power of naturally aspirated spark ignited engines, detailed analyses of different types of intake and exhaust systems were performed. At the end, a comparison of the initial engine model and the optimized model was performed to show the progress.

Key words: spark ignited engine, intake system optimisation, exhaust system optimisation, AVL Boost™, competition vehicle.

## 1. UVOD

U svakom sportu je za postizanje najboljih rezultata, uz sposobnosti sportaša, potrebna i najbolja oprema. Tako je u automobilizmu presudno imati konkurentan, odnosno pouzdan i brz automobil.

Cilj ovog završnog rada je što bolja priprema natjecateljskog vozila za sljedeću natjecateljsku sezonu kako bi se omogućilo postizanje još boljih rezultata. Preciznije, cilj je izraditi simulacijski modela motora te odrediti geometriju usisnog i ispušnog sustava koje će rezultirati najvećim povećanjem momenta motora u gotovo cijelom rasponu okretaja. Navedeni zadatak bit će ostvaren uz pomoć programa AVL BOOST.

### 1.1. Općenito o auto slalomu i kronometru

Auto slalom i kronometar su tehničke discipline u hrvatskom autosportu. Pojam „tehničke discipline“ označava da je u ovim disciplinama naglasak na spretnosti i preciznosti vozača te vrhunskom poznavanju gabarita svog natjecateljskog vozila. U odnosu na ostale discipline kao što su npr. brdske ili kružne utrke, kod tehničkih disciplina prosječna brzina je značajno niža, reda veličine 60 do 70 km/h.

Auto slalom, odnosno disciplina A 09, je disciplina u kojoj je staza sastavljena od čunjeva a cilj je ostvariti najbrže vrijeme. Svaki vozač je sam na stazi i nema izravnog duela s drugim vozačima. Slično kao u skijanju, čunjevi mogu biti postavljeni u liniji („zmijica“) pa se kroz njih vozi slalom ili mogu biti postavljena vrata širine 3 do 4 m. Svaki srušeni čunj nosi kaznu od 2 s koja se zbraja na postignuto vrijeme. Staza je duga između 1000 i 3000 m a propisuje ju Dodatak A 09 Pravilnika o auto sportovima. Uz jednu trening vožnju, voze se 3 vožnje od kojih se zbrajaju vremena dvije najbrže tako da je izrazito važno dobro upamtiti stazu jer je količina treninga minimalna. Prema tehničkom pravilniku, automobili se dijele na Grupu I - Serijski automobili i Grupu II - Sprint automobili te su razvrstani u 6 klasa prema radnoj zapremini motora. Klase 1-3 su serijski automobili zapremine do 1200 cm<sup>3</sup>, od 1200 do 1600 cm<sup>3</sup> i više od 1600 cm<sup>3</sup>. Klase 4-6 su sprint automobili zapremine do 1400 cm<sup>3</sup>, od 1400 do 1600 cm<sup>3</sup> i više od 1600 cm<sup>3</sup>.

Kronometar odnosno disciplina A 11, je automobilističko natjecanje koje se odvija na zatvorenim kružnim stazama - karting stazama ili posebno pripremljenim stazama s asfaltiranom podlogom. Svaki sudionik starta zasebno i mjeri mu se vrijeme ostvareno u

pravilnikom predviđenom broju krugova jedne vožnje. Natjecanje se sastoji od tri vožnje. Za razliku od auto slaloma, ovdje se zbrajaju vremena svih vožnji tako da nema prostora za pogrešku. Također, u kronometru nema izravnog duela s drugim vozačima. U ovoj disciplini podjela automobila u grupe i klase je ista kao u auto slalomu uz dodatak Grupe III – Diesel automobili odnosno klase 7 – Diesel automobili svih zapremnina.

Vozilo koje je predmet ovog rada zbog postojećih preinaka i zapremnine motora po navedenim podjelama spada u Grupu II – Sprint automobili i klasu 5.

## 1.2. Tehnički pravilnik

Tehnički pravilnik je niz propisa i pravila koji definiraju podjelu vozila u kategorije i klase te određuju što je točno dozvoljeno preurediti na natjecateljskom vozilu. Discipline auto slalom i kronometar, zbog svoje sličnosti, dijele isti tehnički pravilnik. U slučaju Grupe II – Sprint tehnički pravilnik dozvoljava izrazito veliku slobodu prilikom preuređivanja vozila. Neka od bitnijih pravila su sljedeća: dozvoljena minimalna masa za vozilo s motorom volumena od 1400 do 1600 cm<sup>3</sup> (u bilo kojem trenutku utrke, bez dolijevanja tekućina i bez vozača) je 680 kg, jedini uvjet za motor je da ne smije imati više od 2 cilindra više od onog motora koji je bio ugrađivan u serijsko vozilo i da je ugrađen na isto mjesto ( $\pm 100$  mm). Volumen i drugi dijelovi motora su proizvoljni. U slučaju motora sa prednabijanjem volumen motora se množi s koeficijentom 1,7 za Otto i 1,5 za Diesel motore i vozilo se svrstava u klasu prema tako dobivenom fiktivnom volumenu. Svako vozilo mora imati ugrađen sigurnosni kavez prema FIA-inom pravilniku. Upravljački mehanizam i ovjes su proizvoljni uz uvjet da ovjes mora imati minimalno 80 mm hoda. Kompletan sustav za prijenos snage je proizvoljan pod uvjetom da sve komponente ostanu na svojoj prvobitnoj poziciji. Sustav za kočenje se mora sastojati od 2 odvojena kruga, ostalo je proizvoljno. Obavezna je ugradnja homologiranog trkaćeg sjedala i sigurnosnog pojasa. Svako vozilo mora biti konstruirano na način da vozač može iz uobičajenog vozačkog položaja u 7 sekundi izaći iz vozila. Također, svako vozilo mora biti opremljeno vatrogasnim aparatom. Navedena su samo neka od cijelog niza pravila, uz spomenuta postoji još mnogo pravila i propisa koji definiraju neku minimalnu razinu sigurnosti jer je autosport, bez obzira na disciplinu, i dalje izrazito opasan sport.

### 1.3. Peugeot 106

Peugeot je francuski proizvođač automobila bogate povijesti, osnovan je daleke 1896. godine a danas je dio PSA grupacije. Uz dugu povijest proizvodnje automobila Peugeot je uključen u autosport duže od jednog stoljeća što dokazuje pobjeda na utrci 500 milja Indianapolisa davne 1913. godine. Neki od najvećih uspjeha u bližoj povijesti su: 5 naslova prvaka Svjetskog reli prvenstva, 7 osvojenih Dakar relija, 3 pobjede na najvećoj utrci izdržljivosti svih vremena, 24 sata Le Mansa, dva osvojena svjetska prvenstva u utrka izdržljivosti te rekord staze za automobile s motorom s unutarnjim izgaranjem na najpoznatijoj brdskoj utrci na svijetu, američkom Pikes Peaku.

Uz uspješno sudjelovanje u autosportu Peugeot je već dugi niz godina najpoznatiji po proizvodnji manjih gradskih automobila. Početkom 1980-tih na tržište dolazi Peugeot 205 i postaje najprodavaniji automobil u Francuskoj te vrlo popularan automobil u ostalim dijelovima Europe. Bio je poznat po svom dizajnu i kompaktnim dimenzijama. Ubrzo nakon predstavljanja modela 205 Peugeot je predstavio i vrlo zanimljivije sportske verzije modela 205, 205 GTI i 205 Rallye i time započeo dugogodišnju dominaciju u klasi malih sportskih automobila. 205 GTI i 205 Rallye bili su izrazito popularni zbog prilično male mase (oko 850 kg) te čak 130 konjskih snaga i 164 Nm što za tako mali automobil nije malo. Uz pozamašne performanse ovi modeli imali su i vrhunske vozačke karakteristike i pružali su izniman užitak u vožnji pa njihova popularnost nije začuđujuća. 1991. godine na tržištu se pojavljuje Peugeot 106 zajedno sa modelima 106 GTI i 106 Rallye kao nasljednicima legendarnih 205 GTI i 205 Rallye. Peugeot 106 proizvodio se od 1991. do 2003. godine s jednim značajnijim redizajnom 1996. godine, ukupno je proizvedeno 2,8 milijuna komada što dovoljno govori o popularnosti ovog modela. Kao i 205, kojeg je zamijenio, 106 zadržava prepoznatljiv dizajn i kompaktne dimenzijama a sportske verzije modela 106 zadržavaju istu filozofiju kao i njihovi prethodnici, kompaktan automobil male mase s relativno snažnim motorom koji maksimalnu snagu postiže na izrazito visokim okretajima, u nekim verzijama čak i 7300 min<sup>-1</sup>. Kada se na to doda direktan upravljački sustav s odličnim osjećajem na upravljaču i sportski ovjes, rezultat je izrazito zanimljiv i pristupačan mali sportski automobil s vrhunskim performansama. S toga i ne čudi što novinari u automobilskim časopisima razdoblje 80-tih i 90-tih godina prošlog stoljeća nazivaju zlatno doba malih gradskih jurilica, a nakon toliko godina praktički je nemoguće naći 106 Rallye koji nekad u svom životnom vijeku nije vozio neki oblik utrka. Jedna od potencijalnih mana ovih automobila je izrazito lagan stražnji kraj

što rezultira potrebom za specifičnim stilom vožnje. Naime, kod ovih automobila posebnu pažnju treba posvetiti brzini ulaska u zavoj baš zbog izrazito lakog stražnjeg kraja jer se u slučaju prebrzog ulaska u zavoj, ako vozač počne kočiti u zavoju, uslijed djelovanja sile kočenja rasterećuje stražnja osovina, a opterećuje prednja osovina. To dovodi do smanjenja bočne sile koju stražnji kotači mogu prenijeti na podlogu (zbog smanjenja pritisne sile) i vrlo lako se dogodi da stražnji kraj vozila u tom trenutku počne klizati jer je raspoloživa bočna sila koju stražnje gume mogu prenijeti manja od potrebne. Ovaj efekt, u kombinaciji sa strukturalno izrazito slabom šasijom savršen su recept za vrlo opasan sudar ukoliko vozač nema dovoljno iskustva. Iz tog je razloga najsnažniji 205 GTI svojevremeno imao nadimak „widowmaker“ (eng. ubojica muškaraca odnosno onaj koji stvara udovice).

Peugeot 106 je vrlo dobar odabir za ranije spomenute discipline, auto slalom i kronometar, iz nekoliko razloga. Tvornički automobil ima malu masu, nakon dozvoljenih preinaka masu spremnog vozila za utrku je moguće spustiti na oko 700 kg. Automobil je vrlo okretan, malih dimenzija i relativno malog međuosovinskog razmaka, što je na uskim stazama velika prednost, a opet je stabilan. Uz to je i lako dostupan, jeftin i ima puno zamjenskih dijelova. Srećom, kod trkaćih verzija Peugeota 106 i 205 problem izrazito slabe šasije riješen je ugradnjom sigurnosnog kaveza i ostale sigurnosne opreme.

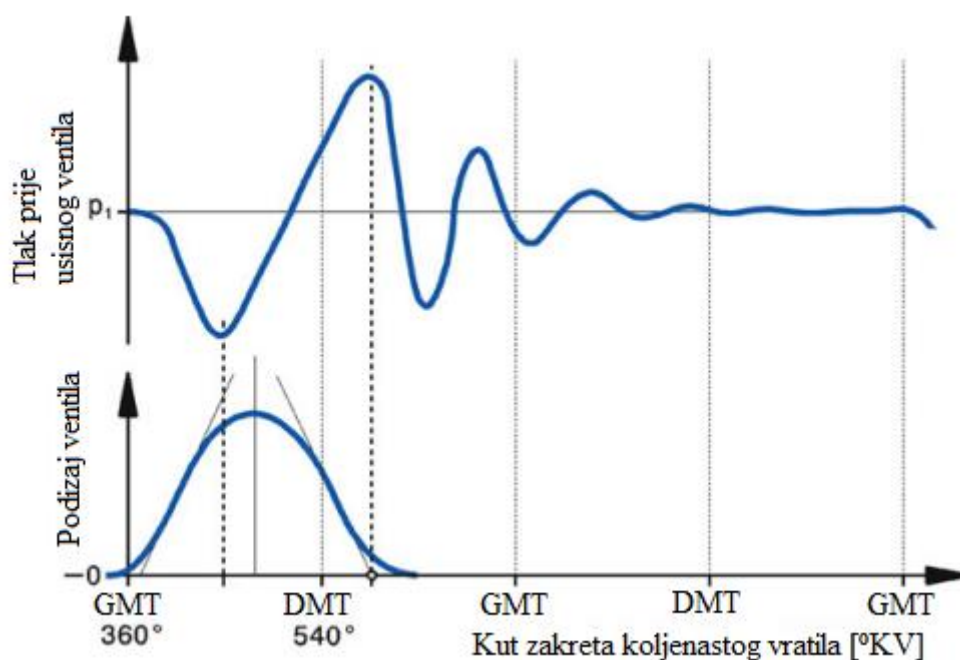
Predmet ovog završnog rada je natjecateljsko vozilo za discipline auto slalom i kronometar temeljeno na Peugeotu 106 s motorom kodne oznake TU5J2/L i zapremnine 1587 cm<sup>3</sup>.

#### **1.4. Općenito o optimizaciji usisnog i ispušnog sustava**

Zadatak usisnog sustava trkaćeg motora je opskrba motora s dovoljnom količinom zraka za izgaranje uz minimalne gubitke. Zadatak ispušnog sustava je odvesti sve produkte izgaranja iz komore za izgaranje u okoliš, također uz minimalne gubitke u strujanju plinova. Uz smanjenje gubitaka u usisu i ispuhu, jedini način za povećanje snaga motora bez povećanja radnog volumena i brzine vrtnje je nabijanje motora. Na taj način u cilindru imamo veću količinu zraka pa je zbog toga moguće ubrizgati veću količinu goriva. Nabijanje motora moguće je postići na nekoliko načina a najčešći su: nabijanje s kompresorom na mehanički pogon, nabijanje motora kompresorom pogonjenim turbinom na ispušne plinove te rezonantno nabijanje ili inercijsko punjenje. Kako je svrha ovog rada bolja priprema natjecateljskog vozila za zadanu klasu u kojoj se natječe, dodavanje kompresora ili turbopunjača nije moguće. U slučaju dodavanja kompresora ili turbopunjača, prema tehničkom pravilniku disciplina, radni volumen motora množio bi se s koeficijentom 1,7, a vozilo bi se prea tako dobivenom „efektivnom“ radnom

volumenu svrstalo u višu klasu. Prema pravilima Međunarodne automobilističke federacije (FIA) rezonantno nabijanje se ne smatra nabijanjem motora te je zbog toga idealan način povećanja snage u ovom slučaju.

Kod ovog se postupka ne primjenjuje kompresor, već se za prednabijanje koristi dinamički tlak plinova na usisu i u ispuhu. Kod rezonantnog prednabijanja svaki cilindar ima svoju usisnu cijev. Periodičko otvaranje usisnog ventila i uvlačenje zraka iz usisne cijevi u cilindar, koje vrši klip, djeluje kao poremećaj koji izaziva titranje stupca zraka u usisnoj cijevi. Kod titranja se stupac plina u cijevi naizmjenično sabija i širi, pri čemu nastaju tlačni valovi. Val tlaka putuje brzinom zvuka od mjesta poremećaja (ventila) do izlaznog otvora cijevi, tamo se reflektira i sa suprotnim se predznakom vraća natrag, te za vrijeme usisa ulazi u cilindar. Ovisno o duljini usisne cijevi (promjer općenito ostaje nepromijenjen) pri određenoj brzini vrtnje u času zatvaranja usisnog ventila u cilindru nastaje pretlak, uslijed čega dolazi do natpunjenja, odnosno do povećanja stupnja punjenja.



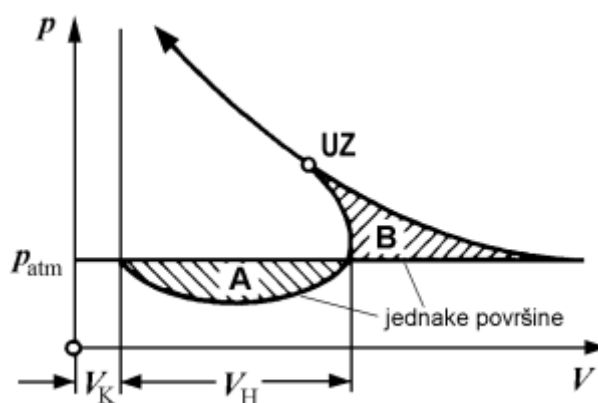
**Slika 1.1. Krivulja tlaka prije usisnog ventila**

Na slici 1.1 je vidljivo kako je tlak najniži kada se otvori usisni ventil, a uz adekvatnu dužinu usisne cijevi tlak je najviši točno prije zatvaranja ventila. Velika prednost maksimalnog tlaka na usisnom ventilu netom prije zatvaranja je sprječavanje strujanja svježe smjese goriva i zraka u ispuh. Međutim, ova pojava se događa samo u uskom području tzv. rezonantne brzine vrtnje motora. Izvan toga područja djelovanje je suprotno: ako u cilindar na kraju usisa uđe negativni dio tlačnoga vala tada je punjenje cilindra smanjeno. Rezonantno područje može se proširiti



promjenjivom geometrijom usisnog sustava i na taj način postiže se veća snaga u cijelom području brzine vrtnje motora. Sustav s promjenjivom geometrijom može mijenjati duljinu usisne cijevi s promjenom brzine vrtnje motora no takav sustav je vrlo kompleksan pa stoga neće biti razmatran u ovom radu.

Usisne cijevi kojima se postiže povećanje punjenja cilindra pri nekoj brzini vrtnje nazivaju se rezonantnim usisnim cijevima i obično su priključene na rezonantni spremnik (služi kao spremnik tlaka). Rezonantne usisne cijevi se u pravilu izvode zajedno s rezonantnim ispušnim cijevima. One djeluju na isti način kao i usisne, samo što se ovdje koristi negativni dio reflektiranog vala tlaka. Naime, kada se klip zaustavlja u području gornje mrtve točke, inercija ispušnih plinova koji struje prema izlaznom otvoru ispušne cijevi, uzrokuje pad tlaka u ispušnom ventilu u trenutku njegova zatvaranja, čime se potpomaže pražnjenje i ispiranje cilindra. Smanjuje se količina ispušnih plinova zaostalih u cilindru a stupanj punjenja raste.



Slika 1.2. Bilanca energije kod rezonantnog nabijanja

Bilanca energije kod rezonantnog nabijanja sastoji se u tome da se rad usisavanja (A), kojega proizvodi klip, pretvori u kinetičku energiju stupca plina pred usisnim ventilom, a ona pak prelazi u rad kompresije (B) svježega punjenja.

---

## **2. IZRADA MODELA MOTORA U PROGRAMSKOM PAKETU AVL BOOST**

Temelj svake dobre simulacije je simulacijski model koji vjerno reprezentira stvarni promatrani sustav te na taj način omogućuje da rezultati simulacije budu maksimalno blizu stvarnim vrijednostima. Stoga je u ovoj fazi od iznimne važnosti posvetiti pažnju tome da se početni simulacijski model postavi što je preciznije moguće.

### **2.1. Izrada simulacijskog modela motora**

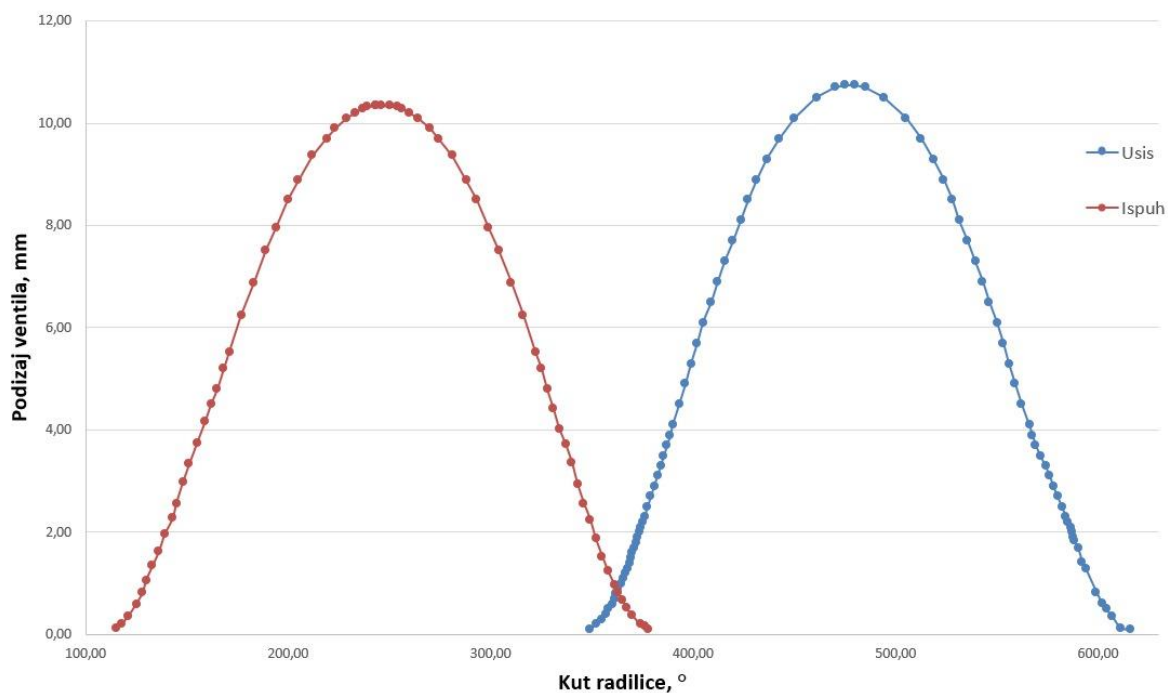
Prilikom pripreme za izradu simulacijskog modela motora izvršena su vrlo detaljna mjerenja i prikupljanja podataka. Kompletan usisni i ispušni sustav su u potpunosti rastavljeni kako bi bilo moguće izmjeriti sve potrebne promjere i dužine. Motor je rastavljen, odnosno skinuta je glava motora kako bi se mogao izmjeriti promjer i hod klipa. Izvađeni su ventili kako bi bilo moguće izmjeriti oblik ventila te promjere i dužine usisnih i ispušnih kanala u glavi motora. Prije rastavljanja motora komparatorom je izmjeren podizaj usisnih i ispušnih ventila i to na način da je komparator bio naslonjen na sredinu vijka koji prolazi kroz klackalicu ventila i služi za podešavanje zračnosti ventila. Na taj se način direktno mjerio podizaj ventila i nije bilo potrebno računavati prijenosni omjer klackalice ventila jer bi to samo povećalo pogrešku kod mjerenja.



**Slika 2.1. Dijelovi usisnog i ispušnog sustava**

Iako se čini da je većinu ovih podataka bilo moguće saznati pretraživanjem interneta, treba uzeti u obzir kako je i prijašnji vlasnik ovog vozila vozio utrke, a prevare u motorsportu su izrazito česte. Znalo se dešavati da netko kupi vozilo s npr. motorom radnog volumena  $1400\text{ cm}^3$  ( za klasu 4, do  $1400\text{ cm}^3$  ) i nakon rastavljanja motora sazna da je radni volumen  $1600\text{ cm}^3$ .

Nakon mjerenja utvrđeno je kako bregasto vratilo nije serijsko, po dijagramu podizaja ventila se približno poklapa s nekim „sportskim“ modelima bregastih vratila od tvrtki Schrick i Cat Cams, odnosno s modelima koji su namijenjeni za cestovne automobile, ne za trkaće.



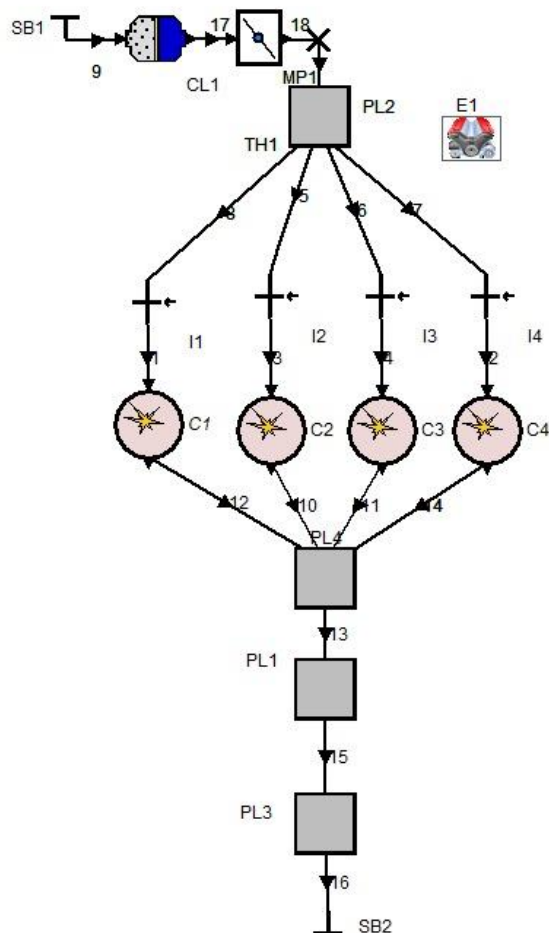
**Slika 2.2. Izmjereni dijagram podizaja usisnog i ispušnog ventila**

Budući da nije točno određen model bregastog vratila jer se dijagram podizaja ventila nije u potpunosti poklopio niti s jednim uspoređenim modelom, u svim simulacijama je korišten izmjereni dijagram podizaja ventila.

Simulirani motor je četverotaktni Otto četverocilindarski motor s ubrizgavanjem goriva u usis. U simulacijama je za opisivanje izgaranja korišten Vibe-ov 2-zonski model izgaranja. Promjer klipa iznosi 78,5 mm a hod klipa 82 mm, radni volumen iznosi 1587 cm<sup>3</sup>. Kompresijski omjer je 10,2. Budući da se razmatra slučaj maksimalnog opterećenja a cilj je maksimalna snaga, tj. moment, faktor pretička zraka  $\lambda$  je postavljen na 0,88, odnosno A/F ratio je 13. U simulaciji je, kao i u stvarnom motoru, korišteno ulje SAE 5/W40. Sve cijevi i volumeni u usisu i ispuhu su precizno izmjereni i preneseni u simulacijski model motora. U originalnoj izvedbi ovaj motor ima katalizator, na ovom vozilu je uklonjen a nakon toga je izmjerena snaga na kočnici. Zbog toga katalizator nije uzet u obzir u simulacijskom modelu inicijalnog motora.

U inicijalnoj verziji mape početka izgaranja korištena je trenutna mapa preskakanja iskre s ECU-a uz formulu iz [6] (poglavlje 4.2.1, formula 4.11) koja opisuje kašnjenje početka izgaranja od trenutka preskakanja iskre na svjećici. Kasnije je mapa početka izgaranja

optimirana kako bi se u simulaciji dobio što veći moment budući da je vrijednost momenta dobivenog simulacijom manja od momenta izmjenenog na kočnici.

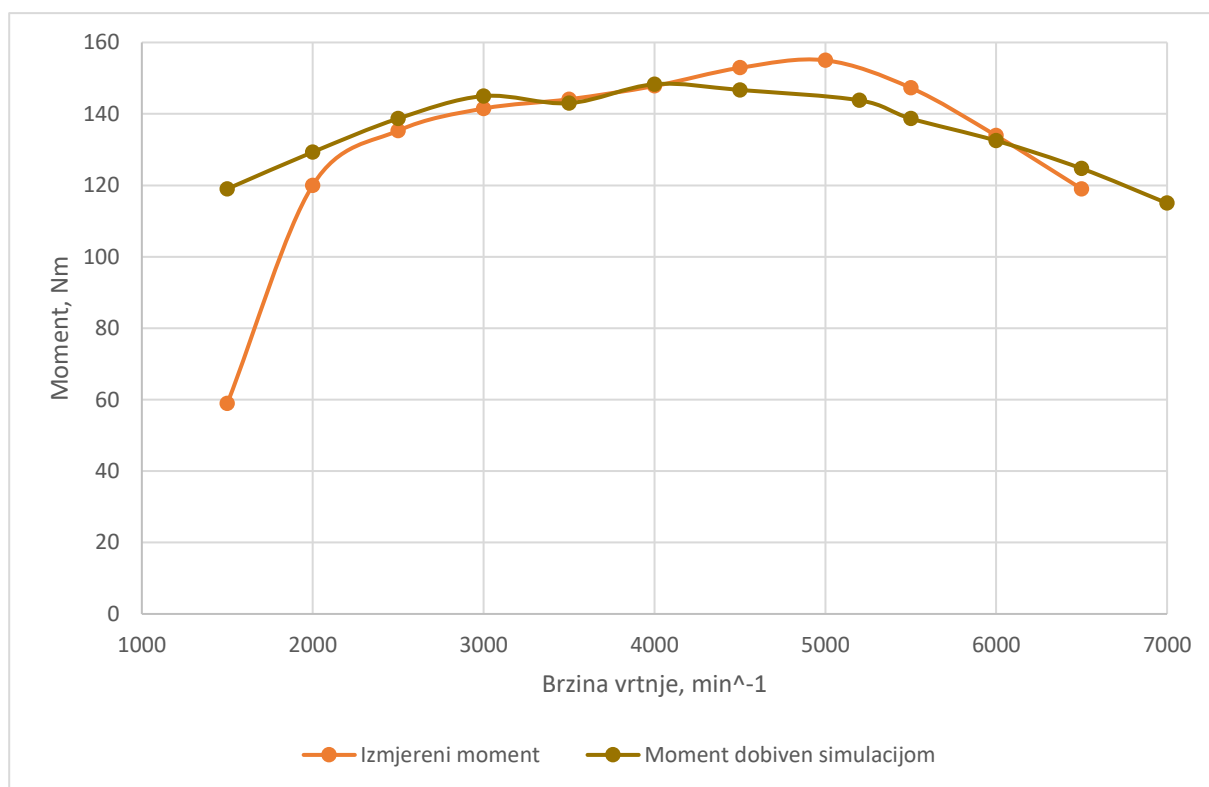


**Slika 2.3. Inicijalni model motora u AVL Boost-u**

Sve potrebne veličine za simulacijski model motora koje nisu mogle biti izmjerene na stvarnom motoru nakon rastavljanja, a nisu predložene u AVL: *Boost Users Guide*-u, bile su iterirane kako bi se postigao maksimalan moment motora.

## 2.2. Usporedba rezultata sa stvarnim podacima

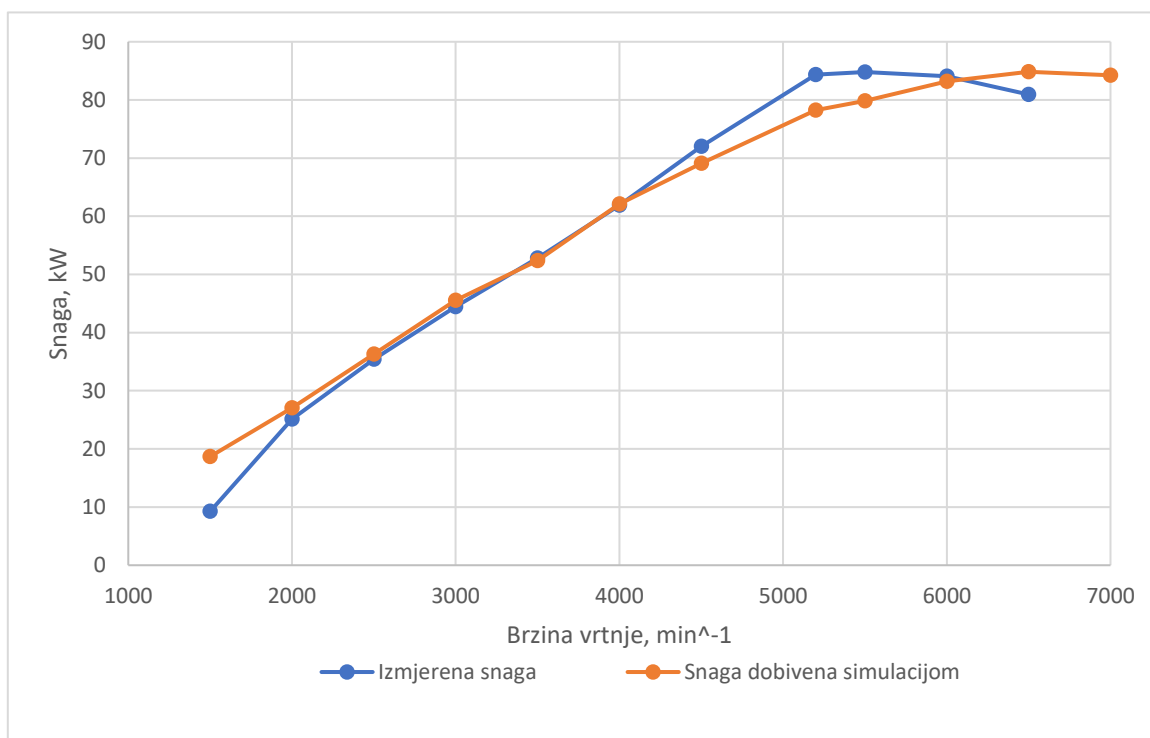
Prije početka izrade završnog rada i prije rastavljanja motora, izmjerene su krivulje momenta i snage kako bi bilo moguće uspoređivati simulacije sa stvarnim podacima i vidjeti eventualni napredak.



**Slika 2.4. Usporedba krivulja momenta stvarnog motora i simulacije**

Kao što je moguće vidjeti, na žalost nije bilo moguće postići idealno poklapanje krivulja momenta. U simulaciji ima previše momenta na nižim brzinama vrtnje motora a premalo na visokim brzinama vrtnje.

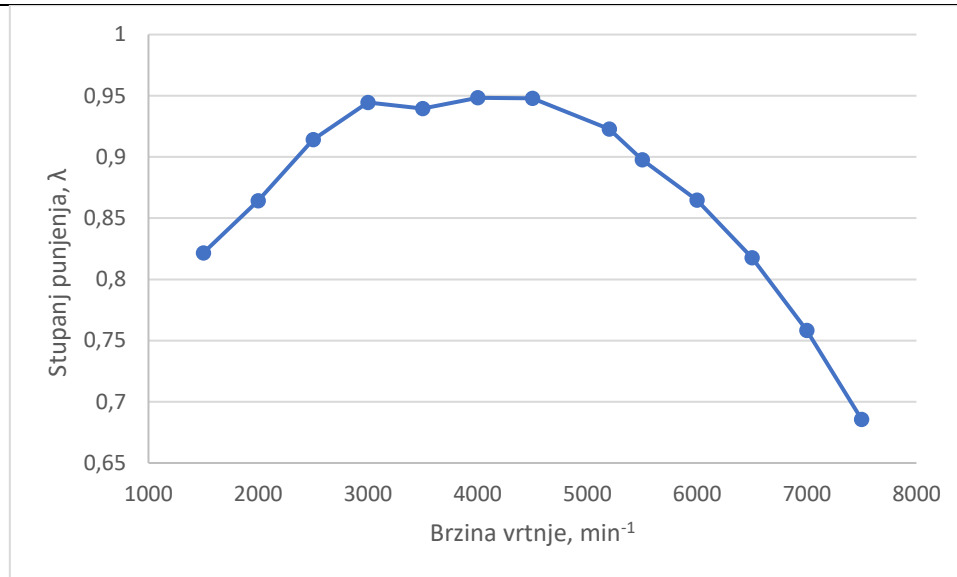
Prikazane krivulje momenta izmjerene su kod punog opterećenja motora.



**Slika 2.5. Usporedba krivulja snage stvarnog motora i simulacije**

Slika 2.5. prikazuje usporedbu izmjerene snage motora s rezultatima simulacije nakon podešavanja parametara simulacijskog modela motora s ciljem usklađivanja dobivene i stvarne krivulje snage. Vidljivo je kako izmjerena krivulja nešto ranije postiže maksimalnu vrijednost od one dobivene simulacijama.

Prikazane krivulje snage izmjerene su kod punog opterećenja motora.



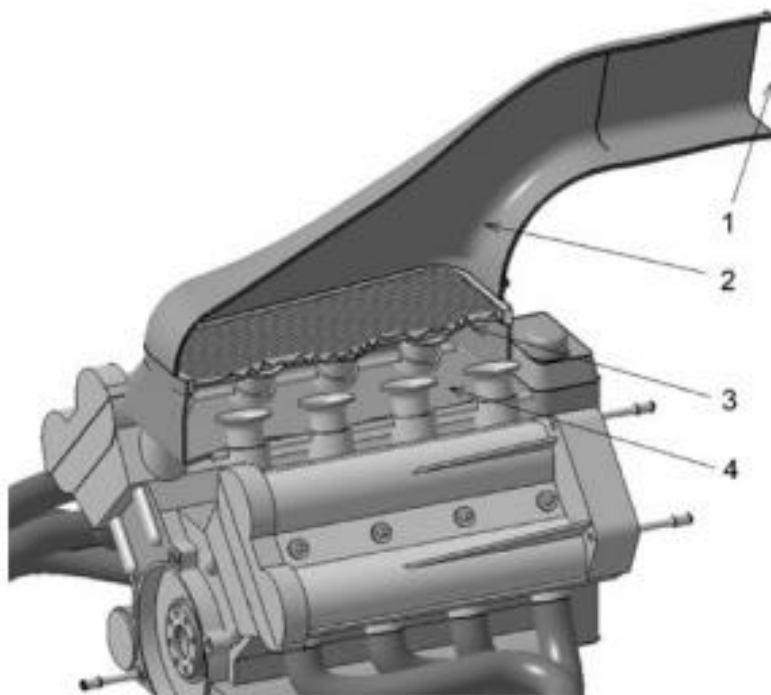
**Slika 2.6. Stupanj punjenja  $\lambda$  simulacijskog modela motora**

Ovaj simulacijski model motora bit će korišten za simulacije u nastavku rada, osim ispušnog i usisnog sustava, svi parametri će ostati identični.



### 3. Optimizacija usisnog sustava

Usisni sustav atmosferskih Otto motora sastoji se od: kutije s filterom zraka s otvorom kroz koji ulazi svježi zrak, usisne cijevi, zaklopke, usisnog kolektora odnosno plenuma te usisnih cijevi za svaki cilindar koje se spajaju na usisne kanale u glavi motora. Kod natjecateljskih vozila s atmosferskim Otto motorima visokih performansi usisni sustav ne izgleda nužno kao što je ranije spomenuto.



**Slika 3.1. Usisni sustav formule**

Slika 3.1. prikazuje usisni sustav kakav se najčešće nalazi na formulama, vidljivo je da se značajno razlikuje od ranije navedenog. Na slici 3.1., brojem 1 označen je ulaz zraka, brojem 2 označen je usisni kolektor ili plenum, brojem 3 filter zraka te brojem 4 usisna tijela. Pozicija ulaza zraka u sustav je izrazito važna. Kao primjer tome, prema [5], moguće je navesti Ferrarijev F1 bolid iz 2000. godine. Zbog smještaja ulaza zraka iznad glave vozača, u struju čistog zraka, na visokim brzinama javlja se porast tlaka u usisnom sustavu. U konkretnom slučaju pri 350 km/h dolazilo je do porasta tlaka od 5,8 % odnosno 0,058 bar što je uzrokovalo porast snage sa 609 na 646 kW. Naravno, Ferrarijev F1 bolid iz 2000. godine po ovome nije poseban nego je naveden kao primjer jer su za njega dostupni ovi podaci.

Usisni sustav natjecateljskih vozila mora motoru dovesti dovoljnu količinu zraka uz minimalne gubitke. Zadaća plenuma je ravnomjerno rasporediti taj zrak prema svakom cilindru i smanjiti brzinu strujanja zraka. Smanjenje brzine strujanja dovodi do povećanja tlaka. Osim toga,

plenum zadržava dio topline koju motor proizvodi tako da se zrak manje zagrijava. Na žalost, u ovom radu se neće razmatrati upotreba plenuma na usisu iz nekoliko razloga: nedostatak mjesta u motornom prostoru za smještanje tako velikog volumena te izrazito kompliciran način izrade a samim time i visoka cijena.

Novi usisni sustav sastojat će se od 4 usisne trubice ( cijevi koje na svom kraju imaju radijus koji omogućava usisavanje veće količine zraka), 4 usisna tijela sa zaklopkama te usisne grane koja spaja usisna tijela s usisnim kanalima na glavi motora.

Radijus na početku usisnih cijevi povećava koeficijent protoka, odnosno smanjuje gubitke u strujanju zraka. Uz to, omogućuje usisavanje zraka s većeg promjera od promjera same cijevi budući da je vanjski promjer zaobljenog dijela veći od promjera cijevi.



**Slika 3.2. Usisna tijela sa Honde CBR1000RR i usisne trubice**

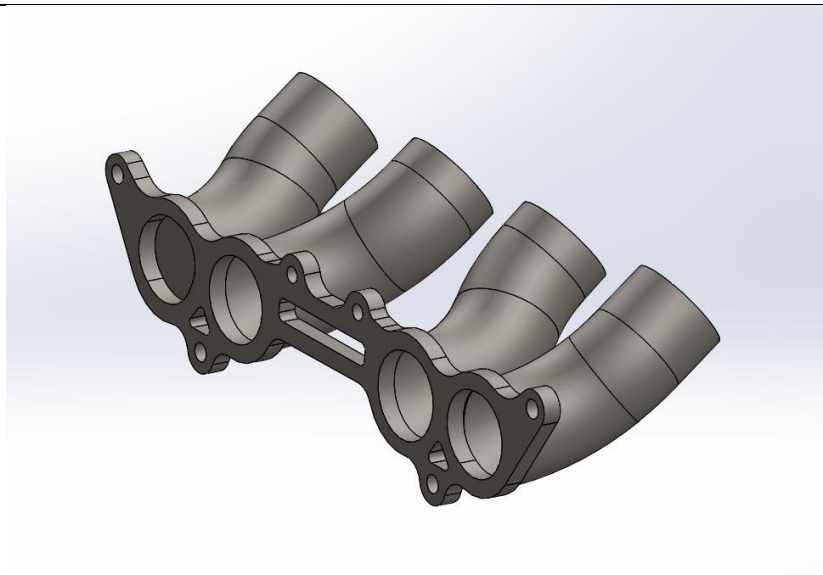
Originalna zaklopka usisa promjera 55 mm zamijenjena je s 4 usisna tijela s motocikla Honda CBR1000RR. Promjer svakog usisnog tijela je 42 mm što rezultira 133,26 % većom površinom od originalne zaklopke. Iako na trenutnom motoru originalna zaklopka ne predstavlja „usko grlo“ odnosno ne ograničava motor u proizvodnji veće snage donesena je odluka o ugradnji

spomenutih usisnih tijela kako bi motor bio spreman za buduće preinake. Plan je u budućnosti bregasto vratilo zamijeniti nekim s puno agresivnijim podizajima i kutovima otvaranja ventila te obraditi usisne i ispušne kanale u glavi motora kako bi se povećao mogući protok smjese goriva i zraka, no to nije tema ovog rada i neće se razmatrati. Navedene preinake rezultirat će potrebom za većom količinom zraka koji prolazi kroz zaklopku tako da će veća površina zaklopki svakako biti od koristi. Druga prednost ovakvog tipa usisnih tijela je puno bolji odziv motora na gas što je jako poželjno kod trkaćih motora. Volumen zraka između zaklopki i usisnih ventila je višestruko manji nego kod serijskog usisnog sustava s plenumom koji spaja usisne kanale, što rezultira puno bržom reakcijom sustava na otvaranje zaklopki odnosno dodavanje gasa.

### 3.1. Konstrukcija usisne grane

Usisna grana je dio usisnog sustava koji spaja usisne kanale u glavi motora i usisni kolektor, odnosno u ovom slučaju usisna tijela. Često usisne grane imaju prilično kompleksnu geometriju jer je potrebno usisne cijevi određenog presjeka i dužine spakirati u relativno male volumene.

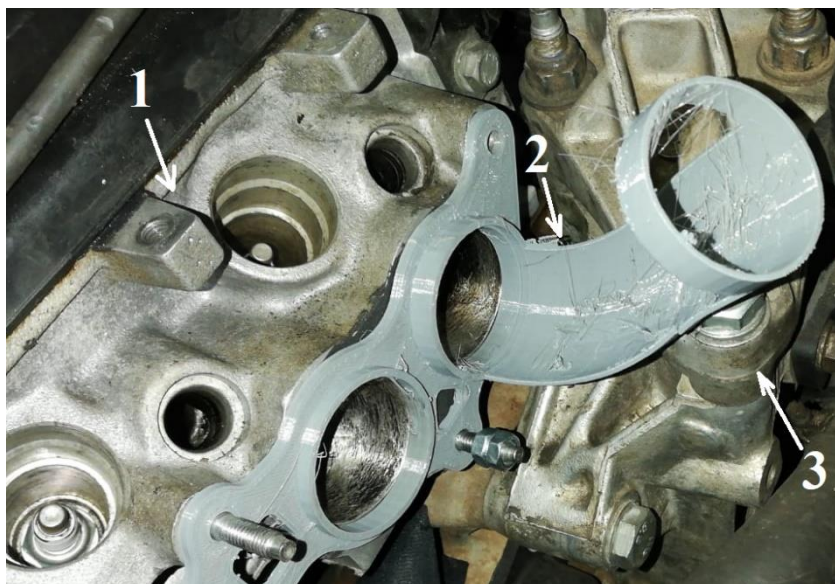
Prilikom konstrukcije usisne grane za Peugeot 106 s usisnim tijelima od Honde CBR1000RR javilo se nekoliko problema koji su jako zakomplicirali konstrukciju i postupak izrade. U idealnom slučaju, promjer i međusobni razmak usisnih kanala u glavi motora i promjer i međusobni razmak usisnih tijela je jednak. U ovom slučaju razmak usisnih kanala na glavi motora između 1. i 2. cilindra iznosi 50 mm, između 2. i 3. cilindra 120 mm i između 3. i 4. cilindra također 50 mm. Razmak između svih usisnih tijela je 80 mm. To znači da su usisna tijela ukupno šira, a to znači da usisne cijevi za 1. i 4. cilindar nemaju istu duljinu kao i usisne cijevi za 2. i 3. cilindar. Kako bi svaki cilindar imao jednaku ukupnu duljinu usisa, usisne trubice će biti različitih dužina. Drugi problem koji se javio je to što usisna grana nije mogla biti u jednoj ravnini jer su usisna tijela šira od originalnog plenuma i zapinjala bi za nosač motora. Peugeot 106 ima poprečno postavljen motor s usisom okrenutim prema kabini tako da se nosač motora nalazi sa zadnje strane motora, pored usisa. Bilo je potrebno pozicionirati cijevi tako da se rašire kako bi se mogle spojiti na usisna tijela i da zaobiđu nosač motora a opet budu što kraće.



**Slika 3.3. Usisna grana s prirubnicom**

Slika 3.3. prikazuje finalnu verziju usisne grane s prirubnicom koja se spaja na glavu motora. Usisna tijela će biti naslonjena na drugu stranu i povezana s usisnom granom s 4 komada armiranog silikonskog crijeva i sa obujmicama.

Ovdje je su iskorištene prednosti aditivnih tehnologija te je uz nekoliko uzoraka postignuta zadovoljavajuća geometrija koja prolazi pored nosača motora.

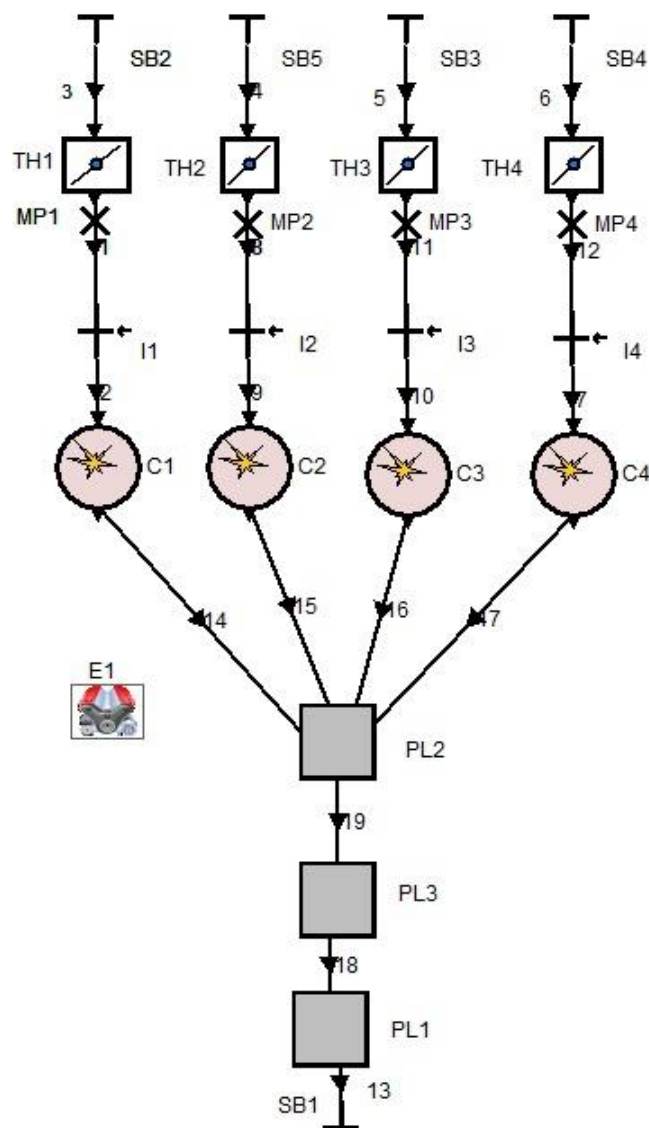


**Slika 3.4. Probna geometrija usisne grane**

Slika 3.4. prikazuje isprintani uzorak usisne grane koji je moguće montirati pored nosača motora. Brojem 1 je označena glava motora, brojem 2 uzorak usisne grane a brojem 3 nosač motora.

### 3.2. Simulacijski model motora s optimiziranim usisnim sustavom

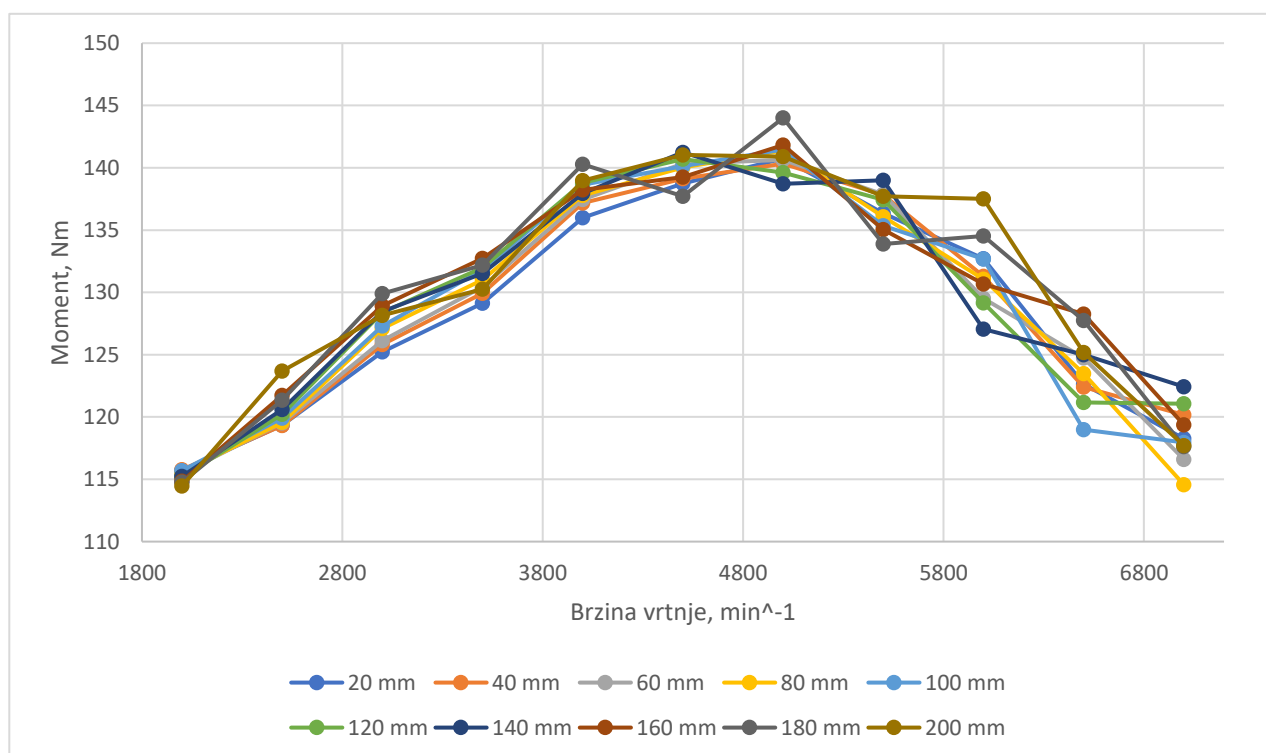
U odnosu na inicijalni model motora ovdje izmijenjen usisni sustav kako bi se mogao vidjeti učinak ovih preinaka. Sve druge vrijednosti su ostale iste. Model motora je relativno jednostavan, usisni sustav je modeliran s 4 odvojene zaklopke i usisne cijevi, kao što je ranije objašnjeno.



Slika 3.5. Simulacijski model motora s izmijenjenim usisnim sustavom

Cilj ovih simulacija bio je odrediti optimalnu dužinu usisnih cijevi, odnosno kombinaciju za koju motor proizvodi najveći moment. Dužine usisne grane i usisnih tijela su definirane tako da je jedini parametar koji se mijenja u ovoj simulaciji dužina usisnih cijevi prije zaklopki. Dužina

usisnih cijevi (cijevi 3, 4, 5 i 6, na vrhu slike 3.5.) mijenja se od 10 do 200 mm s korakom od 10 mm. Promjer cijevi je jednak promjeru usisnog tijela i ne iterira se. Dobivene krivulje momenta će se uspoređivati na način da se svaku krivulju integrira odnosno da se za svaku izračuna površina ispod krivulje u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Najbolja je ona konfiguracija koja ima najveću površinu ispod krivulje u zadanom rasponu jer niti u auto slalomu niti u kronometru staze nisu takve da je motor stalno u najvišim brzinama vrtnje, kao npr. na kružnim utrka. Zbog toga maksimalna vrijednost snage ili momenta nije najbitnija nego je poželjno da kroz cijeli raspon brzine vrtnje navedene veličine postiču što veće vrijednosti. Raspon od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$  je odabran na temelju iskustva jer se u tom rasponu ovaj motor s ovim prijenosom najčešće nalazi. Ukupne dužine usisa u simulaciji iznose od 250 do 440 mm, od početka usisne cijevi do usisnih ventila.



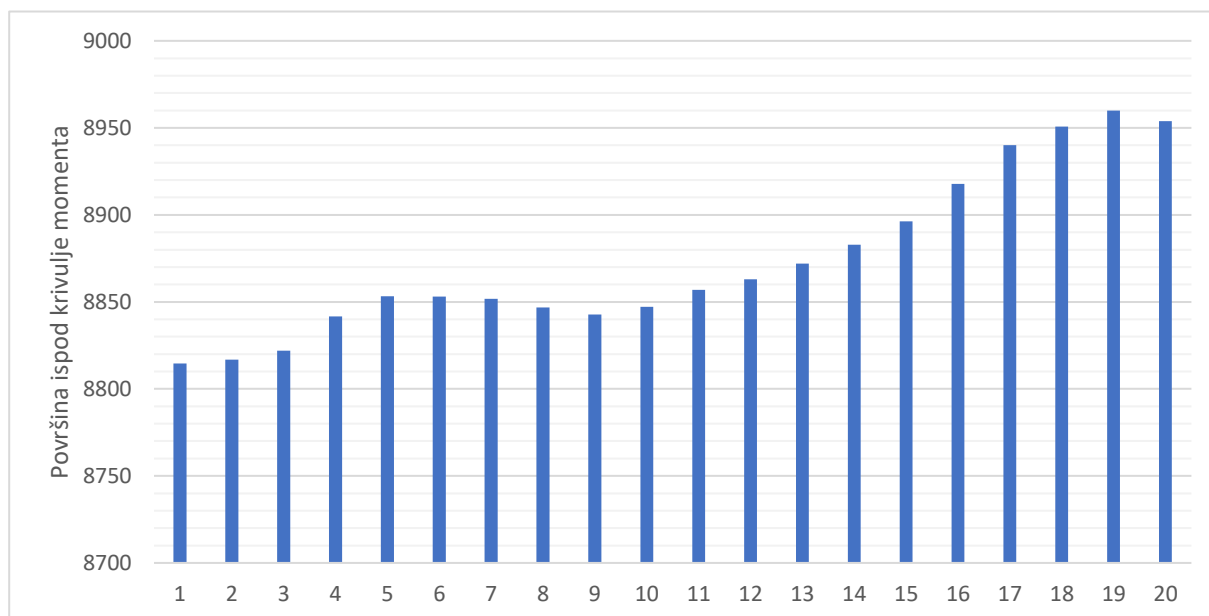
**Slika 3.6. Prikaz usporedbe krivulja momenta za različite dužine usisnih cijevi**

Na slici 3.6 su prikazani rezultati simulacije. Sljedeći korak je izračun površine ispod svake od prikazanih krivulja kako bi se odredila najbolja konfiguracija, po ranije opisanim kriterijima.

**Tablica 3.1. Usporedba površina ispod krivulja momenta**

| Dužina usisa | Ukupna površina | Dužina usisa | Ukupna površina | Dužina usisa | Ukupna površina | Dužina usisa | Ukupna površina |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 10 mm        | 8814,654        | 60 mm        | 8852,967        | 110 mm       | 8856,996        | 160 mm       | 8917,763        |
| 20 mm        | 8816,875        | 70 mm        | 8851,696        | 120 mm       | 8863,029        | 170 mm       | 8939,996        |
| 30 mm        | 8821,983        | 80 mm        | 8846,842        | 130 mm       | 8871,908        | 180 mm       | 8950,713        |
| 40 mm        | 8841,663        | 90 mm        | 8842,804        | 140 mm       | 8882,846        | 190 mm       | 8959,858        |
| 50 mm        | 8853,158        | 100 mm       | 8847,167        | 150 mm       | 8896,342        | 200 mm       | 8953,896        |

U tablici 3.1. su prikazane površine ispod svake simulirane krivulje momenta. Iz sljedećeg grafa će biti vrlo lako uočiti najbolju kombinaciju.

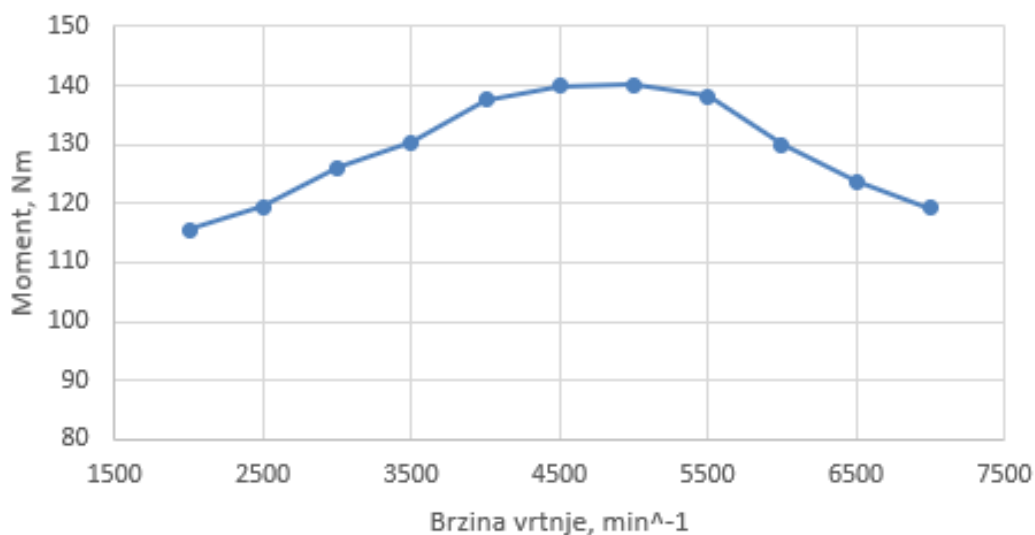
**Slika 3.7. Prikaz usporedbe površine ispod krivulja momenta**

Na slici 3.7 su prikazani rezultati usporedbe dužina usisnih cijevi. Apscisa prikazuje svih 20 simuliranih slučajeva, redom od 10 do 200 mm. Iz konstrukcijskih razloga najduža moguća cijev može biti oko 100 mm dužine. Uz taj uvjet iteracije s dužinama 50 i 60 mm su najbolje. Na temelju ovoga, odlučeno je kako će usisna trubica biti dužine 60 mm. To daje ukupnu dužinu usisa, od početka usisne trubice do usisnog ventila 300 mm.

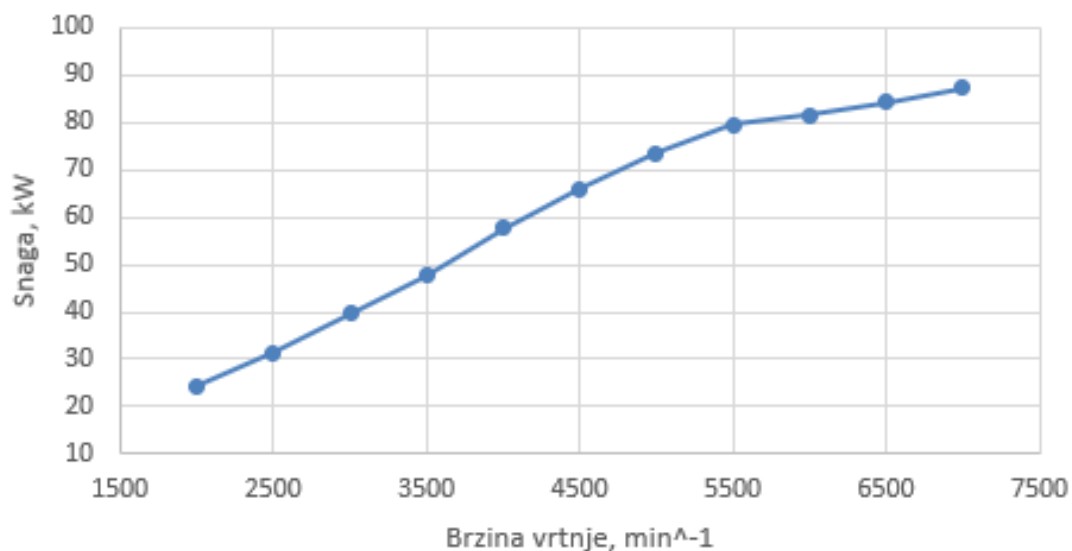
### 3.3. Usporedba rezultata s inicijalnim modelom motora

Kao najbolja iteracija od ranije prikazanih odabrana je ona s dužinom usisnih cijevi od 60 mm.

U nastavku su prikazani dijagrami momenta i snage za tu iteraciju.



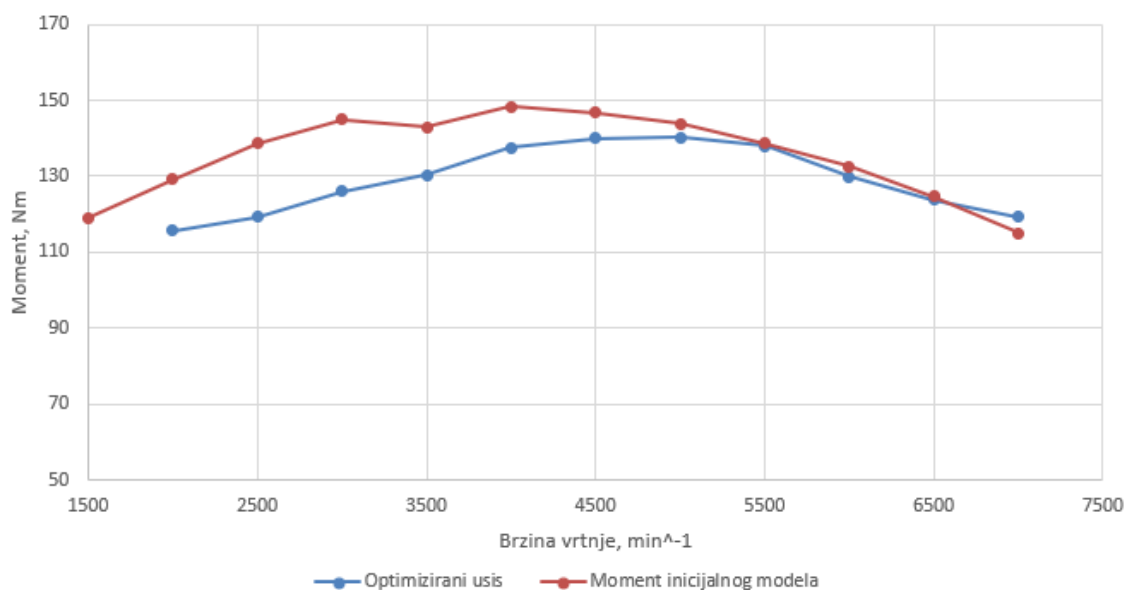
Slika 3.8. Dijagram momenta



Slika 3.9. Dijagram snage

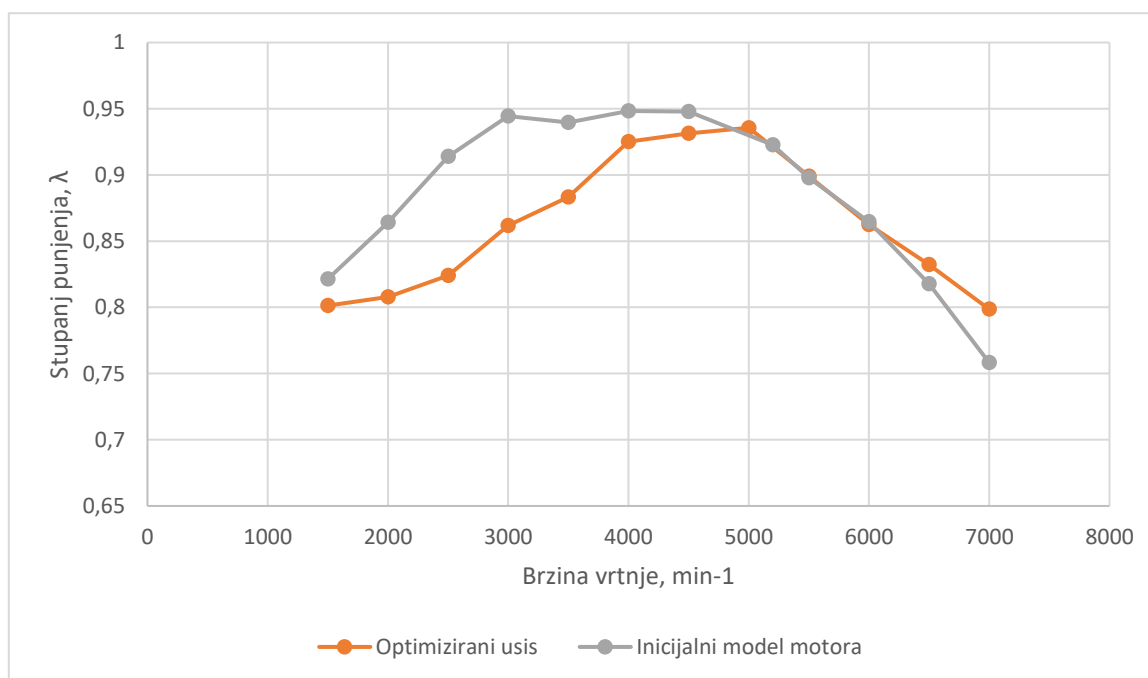
Maksimalni moment iznosi 140,217 Nm a ostvaren je pri 5000 min<sup>-1</sup>, dok je maksimalna snaga ostvarena pri 7000 min<sup>-1</sup> i iznosi 87,354 kW.





**Slika 3.10. Usporedba momenta inicijalnog modela i nakon optimizacije usisa**

Iz slike 3.10. može se vidjeti kako je su preinake na usisnom sustavu rezultirale s manje momenta u području nižih i srednjih brzina vrtnje te s podjednako, odnosno malo manje, momenta u području viših brzina vrtnje. Jedan od potencijalnih uzroka toga je nedostatak usisnog kolektora u optimiziranoj verziji. Prednosti ovog usisnog sustava bi trebale doći do izražaja nakon naknadnih preinaka na motoru koje će zahtijevati veći protok zraka.

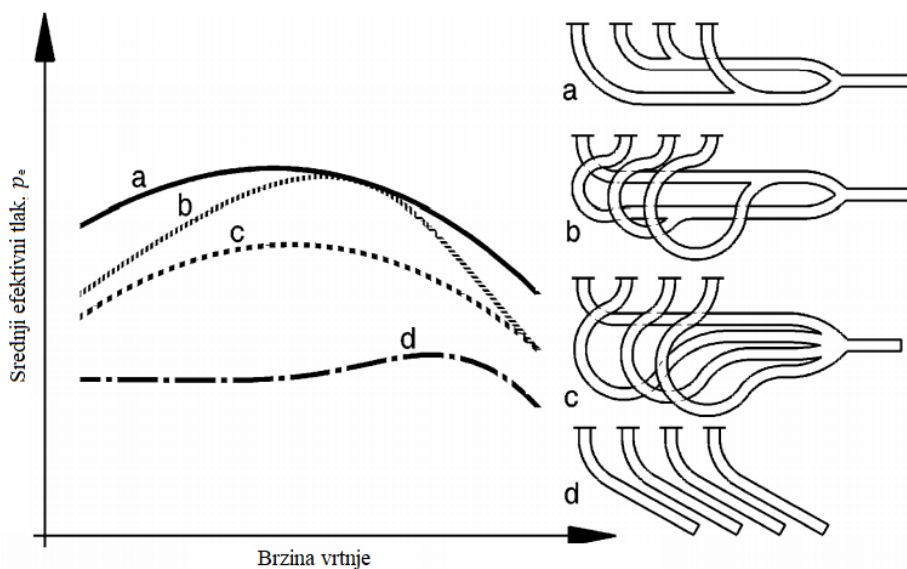


**Slika 3.11. Usporedba stupnja punjenja inicijalnog modela motora i nakon optimizacije usisa**

## 4. Optimizacija ispušnog sustava

Glavni zadatak ispušnog sustava je odvesti produkte izgaranja iz komore za izgaranje u okoliš ali uz to, ništa manje nije važan utjecaj ispušnog sustava na stupanj punjenja, a time direktno na proizvedenu snagu i potrošnju goriva. Budući da motor s unutarnjim izgaranjem radi kao pumpa, kao što dinamika plinova u usisnom sustavu utječe na stupanj punjenja jednako tako na stupanj punjenja utječe i dinamika plinova u ispušnom sustavu. Dakle u ispušnom sustavu se događaju isti efekti kao i u usisnom i također vrijedi da duže ispušne cijevi stvaraju rezonanciju na nižim brzinama vrtnje a kraće ispušne cijevi na višim brzinama vrtnje. Ukoliko se dogodi da je ispušni sustav konstruiran na način da otežava protok ispušnim plinovima, odnosno da ih koči, dolazi do slabijeg pražnjenja cilindra. Ako se pak ode u drugu krajnost događa se da svježja smjesa goriva i zraka izlazi kroz ispušni ventil u ispuh zajedno sa produktima izgaranja. Izrazito je teško iskoristiti ove efekte kod konstruiranja ispušnog sustava u širokom rasponu okretaja.

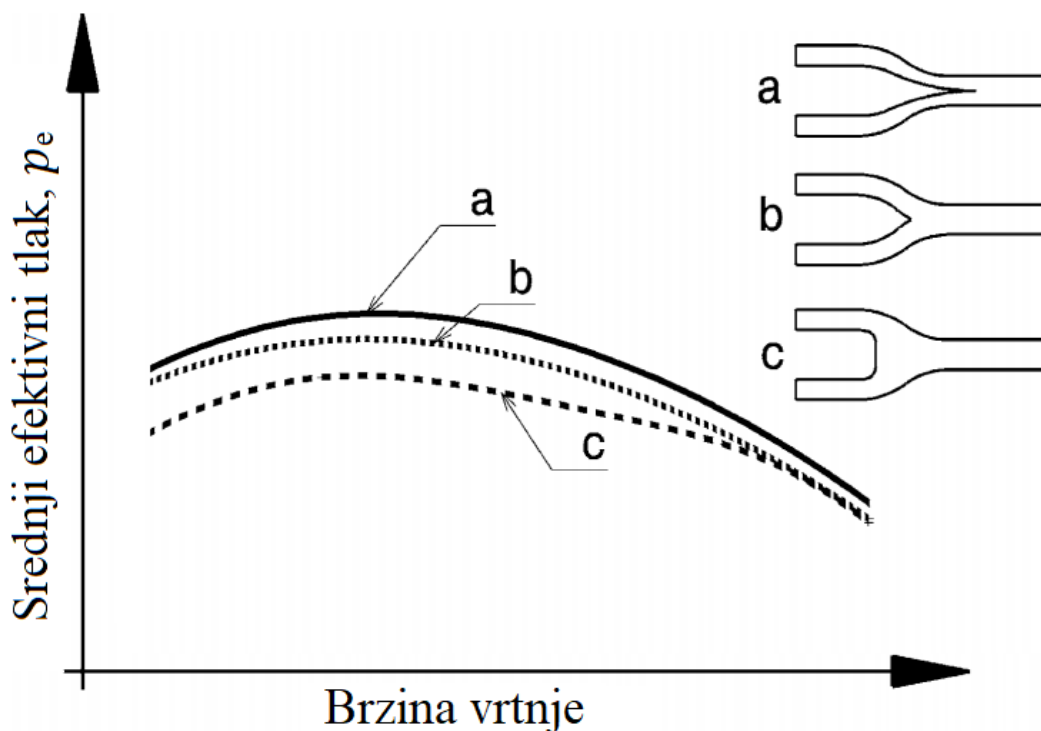
Kod više cilindarskih atmosferskih motora, ranije opisani efekti iz dinamike plinova se primjenjuju prilikom povezivanja ispušnih cijevi susjednih cilindara. Pravilnim rasporedom spajanja ispušnih cijevi s obzirom na redoslijed paljenja i raspored cilindara moguće je ostvariti značajan napredak u performansama.



**Slika 4.1. Moguće konfiguracije ispušnog sustava kod četverocilindarskog motora**

Slika 4.1. prikazuje moguće konfiguracije ispušne grane za četverocilindarski motor. Ispušna grana koja se koristila na povijesnim motorima, pod oznakom d, najgora je u usporedbi.

Najbolje je spojiti ispušne cijevi cilindara 1 i 4 te 2 i 3 kod motora s uobičajenim rasporedom paljenja i s ravnom radilicom (odnosno s letećim rukavcima razmaknutim za  $180^\circ$ ). U tom slučaju se događa da se tlačni val iz jednog cilindra ponašao kao negativni tlačni val za drugi cilindar i poboljšava izmjenu plinova.



**Slika 4.2. Utjecaj načina spajanja cijevi na srednji efektivni tlak**

Slika 4.2. prikazuje učinak načina spajanja ispušnih cijevi i njihov utjecaj na srednji efektivni tlak. Kao što je vidljivo na slici, sužavanje cijevi prije spajanja ima pozitivan učinak na srednji efektivni tlak jer dolazi do porasta brzine strujanja plinova što uzrokuje pad tlaka. Tako da nije bitan samo redoslijed spajanja cijevi nego i način spajanja.

Što se materijala tiče, za cestovne automobile ispušne grane su najčešće od lijevanog čelika u starijim automobilima i zavarenih čeličnih cijevi u novijim automobilima. U trkaćim motorima visokih performansi koristi se u najvećoj mjeri titan, a manje i inconel. Prednost titanskih ispušnih sustava je značajno manja masa zbog manje gustoće od čelika i velika otpornost na temperaturu. Inconel je superlegura na bazi nikal-kroma nastala za potrebe svemirske industrije. Već se neko vrijeme primjenjuje u vrhuncu motorsporta zbog male gustoće a visoke otpornosti na temperaturu. Polako se počinje primjenjivati i u auto industriji ali za sada samo kod modela

izrazito visokih performansi a time i izrazito visoke cijene. Problem kod upotrebe titana i inconela je to što su vrlo teško zavarljivi.

Prilikom konstrukcije ispušnog sustava potrebno je posebnu pozornost posvetiti spojevima i prihvratima. Potrebno je uzeti u obzir rastezanje materijala kod zagrijavanja jer su zbog velikih promjena u temperaturi značajne promjene u dimenzijama. Ukoliko se primjenjuju vijčani spojevi moguće je da dođe do otpuštanja spoja nakon nekoliko ciklusa zagrijavanja i hlađenja zbog rastezanja materijala. Druga mogućnost je da dođe do loma ukoliko naprezanje u materijalu uslijed zagrijavanja postane preveliko.



**Slika 4.3. Ispušna grana Ferrarijevog F1 bolida s V10 motorom**

Kod trkaći motora visokih performansi kvaliteta izrade ispušne grane je na nevjerojatnoj razini, ne smije postojati nagla promjena presjeka cijevi ili neravan spoj cijevi kako bi se minimizirali otpori strujanja produkata izgaranja.

Važno je napomenuti kako tehnički pravilnik za auto slalom i kronometar ne propisuje katalizator tako da neće biti korišten. Po pravilniku, cijeli ispušni sustav je proizvoljan, jedini

uvjet je da je buka ispod 98 dB, mjereno FIA metodom. Budući da predmetno vozilo ima ispušni lonac na kraju ispušnog sustava, taj će uvjet biti zadovoljen.

Prema slici 4.1., četverocilindarski motor moguće su dvije konfiguracija ispušnog sustava. Kod konfiguracije b, sa slike (tzv. 4-2-1), cijevi 1. i 4. cilindra se spajaju u jednu te cijevi 2. i 3. cilindra u jednu, nakon toga se te dvije cijevi spajaju u jednu cijev. Od tuda i naziv 4-2-1 jer se 4 cijevi prvo spoje u 2 pa se onda te 2 cijevi spoje u jednu cijev. Kod konfiguracije c, sa slike (tzv. 4-1), sve 4 ispušne cijevi se spajaju u jednu cijev na istom mjestu.

Kod konfiguracije 4-1 imamo 3 parametra koje mijenjamo u iteracijama, to su dužina cijevi koje izlaze iz glave motora, dužina zadnje cijevi i promjer prvih cijevi. Budući da je dužina ukupnog sustava konstantna slijedi da je dužina zadnje cijevi razlika ukupne dužine i dužine prvih cijevi. Unutarnji promjer zadnje ispušne cijevi je 56 mm. Veza između dužina cijevi preko ukupne dužine znači da efektivno imamo 2 parametra koje je potrebno iterirati.

Kod konfiguracije 4-2-1 imamo 5 parametara koje mijenjamo u iteracijama, to su dužina prvih cijevi koje izlaze iz glave motora, dužina dvije među-cijevi, dužina zadnje cijevi, promjer prvih cijevi te promjer među-cijevi. Kao i u prethodnom slučaju, unutarnji promjer zadnjeg dijela ispušne cijevi je 56 mm. Od ovih 5 parametara neki su u direktnoj međusobnoj vezi. Kako je dužina ukupnog sustava konstantna, slijedi da je dužina zadnje cijevi razlika ukupne dužine i zbroja dužine prve dvije cijevi. Promjer među-cijevi je određen tako da je njegova površina poprečnog presjeka srednja vrijednost površine poprečnog presjeka prve i zadnje cijevi s ciljem da se osigura postepena promjena promjera cijevi. Zbog spomenute dvije veze broj parametara se efektivno smanjio na 3 i time značajno smanjio broj potrebnih iteracija.

Što se iteriranja unutarnjeg promjera ispušnih cijevi tiče, određen je interval od 26 mm do 40 mm za obje konfiguracije ispušnog sustava. Donja granica intervala je postavljena na 26 mm jer je promjer ispušnih kanala u glavi motora 28 mm. Odabrani korak je 2 mm.

Razmatrani interval dužina cijevi je od 160 mm do 700 mm, razlog je taj što bi cijevi kraće od 160 mm bilo gotovo nemoguće spojiti u jednu cijev ( za konfiguraciju 4-1). 700 mm je odabrana kao gornja granica jer u motornom prostoru gdje prolazi ispuh nakon otprilike 700 mm dužine cijevi nema mjesta za tako veliki poprečni presjek kao što je potrebno za 4 cijevi unutarnjeg promjera 40 mm ili za 2 cijevi unutarnjeg promjera 48 mm.

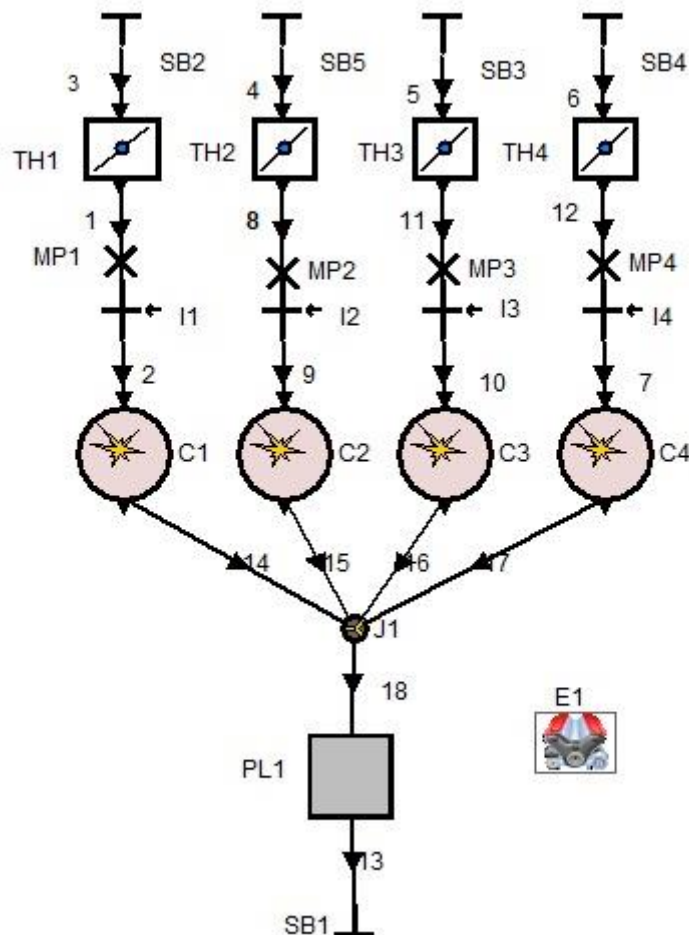
Raspon mogućih vrijednosti svakog parametara je prilično velik, ako se uz to uzme u obzir kombiniranje nekoliko parametara rezultat je izrazito veliki broj iteracija. Iz tog razloga, za

početak je odlučeno uzeti relativno grubi korak od 40 mm za dužine cijevi te ponoviti simulacije s finijim korakom za područje s najboljim rezultatima.

Usporedba rezultata će biti po istom principu kao i kod optimizacije usisnog sustava u prethodnom poglavlju. Rezultati će biti uspoređivani po ukupnoj površini ispod krivulje momenta kroz raspon brzina vrtnje od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ .

#### 4.1. Konfiguracija ispušnog sustava 4-1

Simulacijski model motora za određivanje optimalne ispušnog sustava konfiguracije 4-1 je nastavak modela za optimizaciju usisa. Izmijenjen je jedino ispušni sustav, usis i ostali parametri motora nisu mijenjani kako bi se nakon odabira najbolje konfiguracije mogli usporediti rezultati.



**Slika 4.4. Simulacijski model motora s 4-1 ispušnim sustavom**

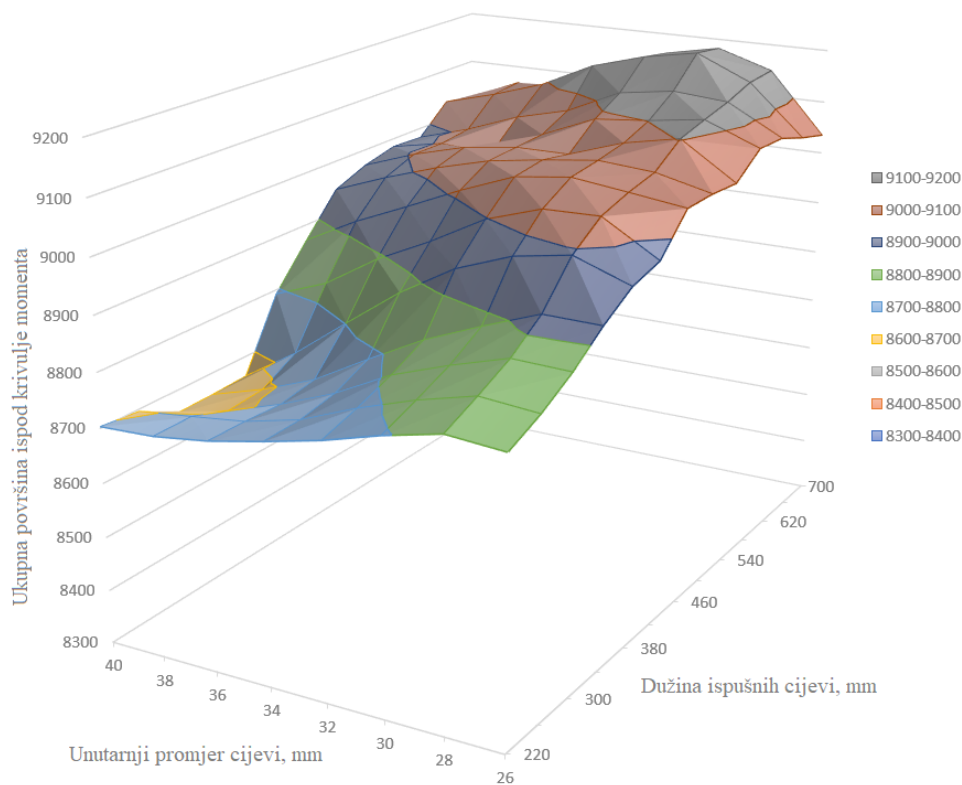
Ispuh simulacijskog modela se razlikuje po tome što se u ovoj verziji sve ispušne cijevi spajaju u jednu točku (tzv. „junction“). Uklonjeni su volumeni koji su postojali u originalnom ispušnom sustavu.

Za simulaciju ove konfiguracije ispuha dužine ispušnih cijevi mijenjane su u intervalu od 220 do 700 mm s korakom 40 mm. Za svaku dužinu ispušnih cijevi iteriran je unutarnji promjer cijevi od 26 do 40 mm. To daje ukupno 104 različite konfiguracije ispušnog sustava, za svaku od te 104 konfiguracije izračunata je simulacija rada motora pri punom opterećenju kroz cijeli raspon brzine vrtnje s korakom od 500 min<sup>-1</sup>, odnosno ukupno 1352 radne točke.

**Tablica 4.1. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-1**

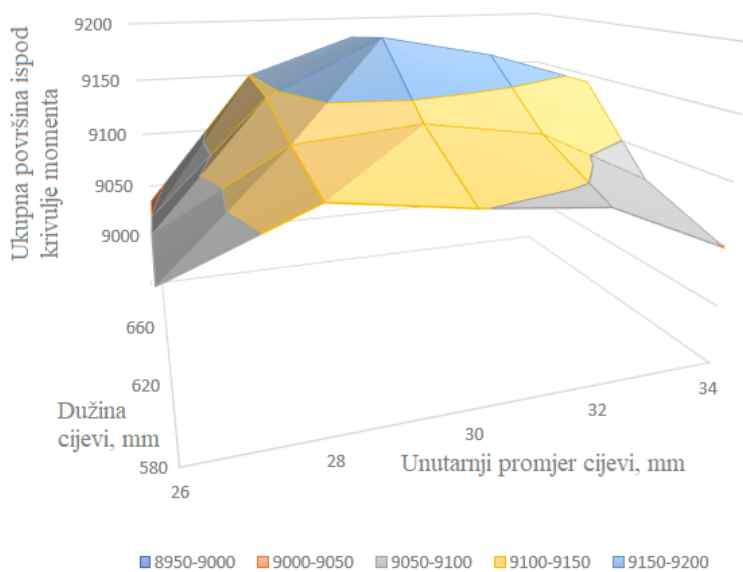
| Dužina cijevi | Promjer ispušnih cijevi |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|               | 26 mm                   | 28 mm    | 30 mm    | 32 mm    | 34 mm    | 36 mm    | 38 mm    | 40 mm    |
| 220 mm        | 8812.183                | 8819.908 | 8795.642 | 8765.533 | 8741.771 | 8720.625 | 8706.996 | 8702.838 |
| 260 mm        | 8838.888                | 8847.208 | 8819.733 | 8785.054 | 8743.767 | 8719.558 | 8707.233 | 8695.675 |
| 300 mm        | 8874.1                  | 8877.2   | 8845.65  | 8809.033 | 8756.45  | 8715.85  | 8683.146 | 8657.763 |
| 340 mm        | 8919.792                | 8921.125 | 8881.733 | 8839.117 | 8784.971 | 8727.808 | 8689.121 | 8658.992 |
| 380 mm        | 8957.013                | 8993.523 | 8975.176 | 8936.438 | 8875.925 | 8801.676 | 8725.554 | 8661.986 |
| 420 mm        | 8973.038                | 9034.465 | 9031.837 | 8998.054 | 8941.885 | 8892.705 | 8829.967 | 8791.947 |
| 460 mm        | 9038.429                | 9051.541 | 9063.882 | 9050.347 | 9010.664 | 8965.443 | 8921.886 | 8869.913 |
| 500 mm        | 9039.259                | 9063.459 | 9070.977 | 9057.919 | 9042.066 | 9015.027 | 8981.949 | 8944.259 |
| 540 mm        | 9034.238                | 9101.825 | 9080.61  | 9045.747 | 9045.283 | 9031.571 | 9004.366 | 8968.868 |
| 580 mm        | 9075.272                | 9115.583 | 9100.887 | 9090.913 | 9048.126 | 8996.982 | 9003.479 | 8983.778 |
| 620 mm        | 9072.263                | 9127.952 | 9136.355 | 9121.08  | 9073.826 | 9048.073 | 9010.583 | 8980.871 |
| 660 mm        | 9051.519                | 9145.645 | 9190.825 | 9172.39  | 9143.158 | 9094.311 | 9061.537 | 9034.169 |
| 700 mm        | 9034.981                | 9149.451 | 9181.908 | 9161.552 | 9093.306 | 9030.357 | 9066.659 | 9024.872 |

Budući da prikazivanje vrijednosti momenta u svim radnim točkama za 104 konfiguracije jednostavno nije moguće na ovaj način, u tablici 4.1. su prikazane ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od 3000 min<sup>-1</sup> do 7000 min<sup>-1</sup>. Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije.



**Slika 4.5. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-1**

Na slici 4.5. jedna os je unutarnji promjer ispušne cijevi a druga je dužina ispuha, kao u tablici 4.1. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.1. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.1. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.6. Detalj dijagrama usporedbe površina ispod svake krivulje momenta**



Na slici 4.6. prikazano je samo nekoliko najviših vrijednosti iz tablice 4.1. zbog bolje preglednosti. Koordinatne osi su iste kao na slici 4.5.

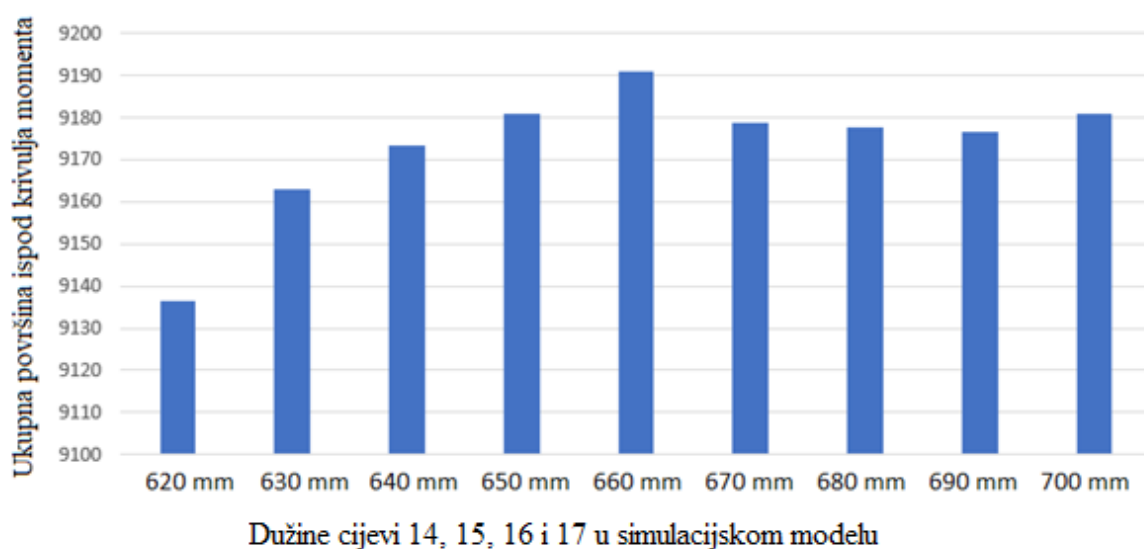
**Tablica 4.2. Prikaz najvećih površina ispod krivulja momenta**

| Dužina cijevi | Promjer cijevi |          |          |          |          |
|---------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
|               | 26 mm          | 28 mm    | 30 mm    | 32 mm    | 34 mm    |
| 580 mm        | 9075.272       | 9115.583 | 9100.887 | 9090.913 | 9048.126 |
| 620 mm        | 9072.263       | 9127.952 | 9136.355 | 9121.08  | 9073.826 |
| 660 mm        | 9051.519       | 9145.645 | 9190.825 | 9172.39  | 9143.158 |
| 700 mm        | 9034.981       | 9149.451 | 9181.908 | 9161.552 | 9093.306 |

U tablici 4.2. detaljno je prikazano područje s najvišim vrijednostima iz tablice 4.1. Na slici 4.6. vizualno su prikazani vrijednosti iz tablice 4.2. Iz priložene slike 4.6. i tablice 4.2. vidljivo je kako je krivulja s maksimalnom vrijednosti površine dobivena za ispušne cijevi dužine 660 mm i promjera 30 mm. Također, vidi se da su nagibi u smjeru osi na kojoj su prikazani promjeri relativno strmi (odnosno razlike u tablici velike) te je odlučeno kako je unutarnji promjer 30 mm optimalan i neće se više iterirati. Ponovit će se iteracija iteracije s dužinama od 620 mm do 700 mm, ovaj put s korakom od 10 mm.

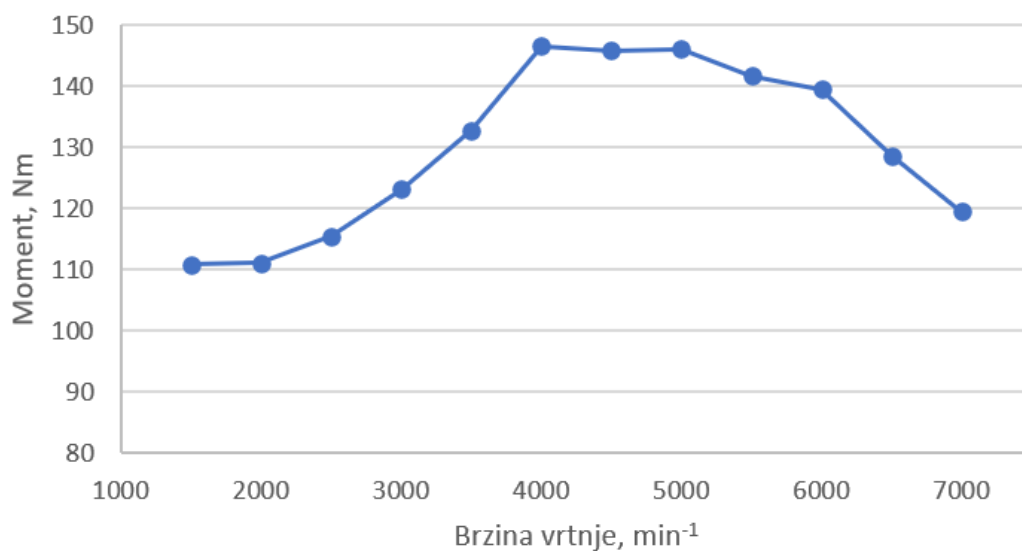
**Tablica 4.3. Prikaz vrijednosti momenata**

| Brzina vrtnje, 1/min | Dužine ispušnih cijevi |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                      | 620 mm                 | 630 mm  | 640 mm  | 650 mm  | 660 mm  | 670 mm  | 680 mm  | 690 mm  | 700 mm  |
| 1500                 | 109,436                | 109,772 | 110,265 | 111,295 | 110,853 | 112,32  | 112,345 | 112,013 | 111,432 |
| 2000                 | 109,507                | 109,282 | 109,772 | 110,276 | 111,166 | 111,156 | 114,373 | 115,925 | 116,407 |
| 2500                 | 118,802                | 116,847 | 115,64  | 114,853 | 115,487 | 113,91  | 113,941 | 114,126 | 114,471 |
| 3000                 | 123,043                | 123,614 | 123,593 | 123,553 | 123,251 | 123,242 | 123,16  | 123,278 | 123,418 |
| 3500                 | 130,102                | 130,571 | 131,234 | 132,143 | 132,869 | 134,07  | 135,253 | 136,562 | 136,661 |
| 4000                 | 142,932                | 144,633 | 144,57  | 145,321 | 146,592 | 145,103 | 144,367 | 144,412 | 144,106 |
| 4500                 | 145,782                | 146,256 | 146,479 | 146,261 | 145,934 | 145,484 | 144,945 | 144,121 | 144,134 |
| 5000                 | 146,414                | 145,968 | 146,389 | 146,346 | 146,11  | 146,265 | 146,209 | 145,825 | 146,495 |
| 5500                 | 141,604                | 141,939 | 141,956 | 141,996 | 141,786 | 141,78  | 141,766 | 141,775 | 141,752 |
| 6000                 | 139,56                 | 139,544 | 139,744 | 139,552 | 139,491 | 139,474 | 139,721 | 139,598 | 139,827 |
| 6500                 | 129,029                | 129,046 | 129,017 | 128,851 | 128,705 | 128,653 | 128,525 | 128,371 | 128,162 |
| 7000                 | 118,836                | 119,589 | 119,283 | 118,947 | 119,572 | 117,984 | 117,887 | 117,756 | 117,722 |
| Ukupna površina:     | 9136,36                | 9162,99 | 9173,53 | 9181    | 9190,83 | 9178,68 | 9177,58 | 9176,52 | 9180,9  |

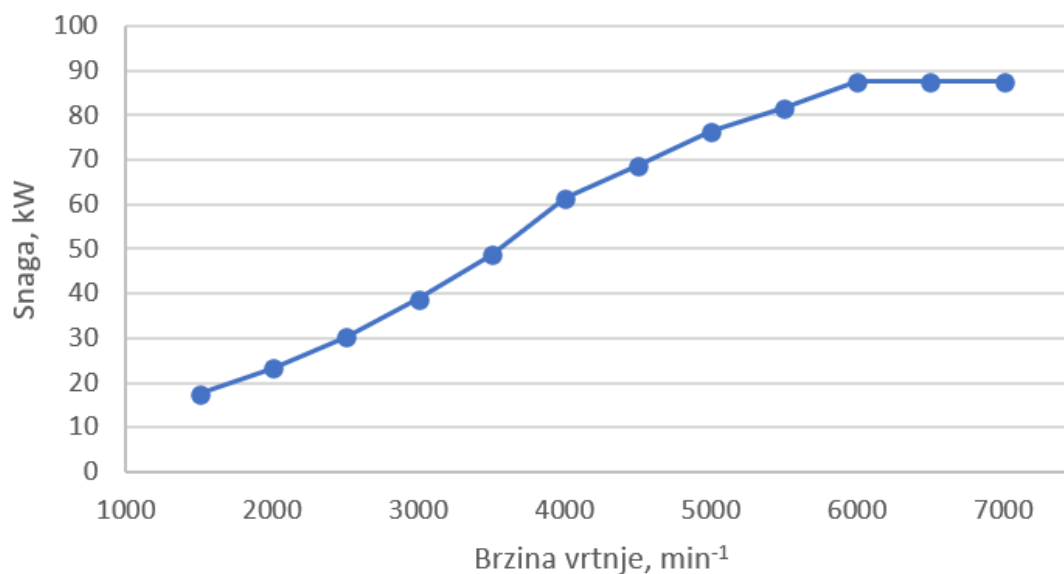


**Slika 4.7. Usporedba površina ispod krivulja momenta**

Kao što je vidljivo u tablici 4.3. i na slici 4.7., nakon dodatnih simulacija, verzija ispušnog sustava s dužinama ispušnih cijevi 660 mm i promjerom 30 mm i dalje ima najveću površinu ispod krivulje momenta te je odabrana kao najbolja opcija za 4-1 konfiguraciju.

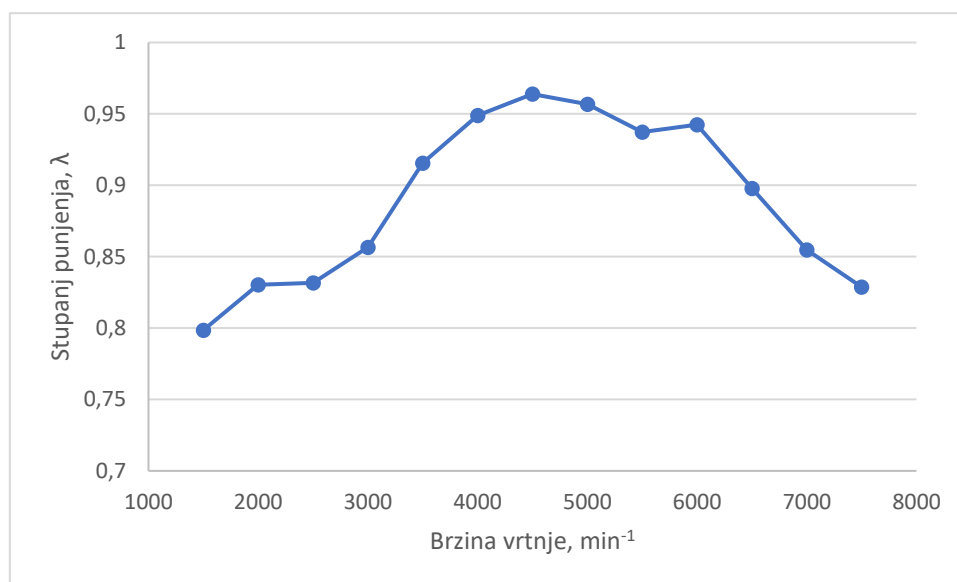


**Slika 4.8. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm i dužine cijevi 660 mm**



**Slika 4.9. Dijagram snage za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm  
i dužine cijevi 660 mm**

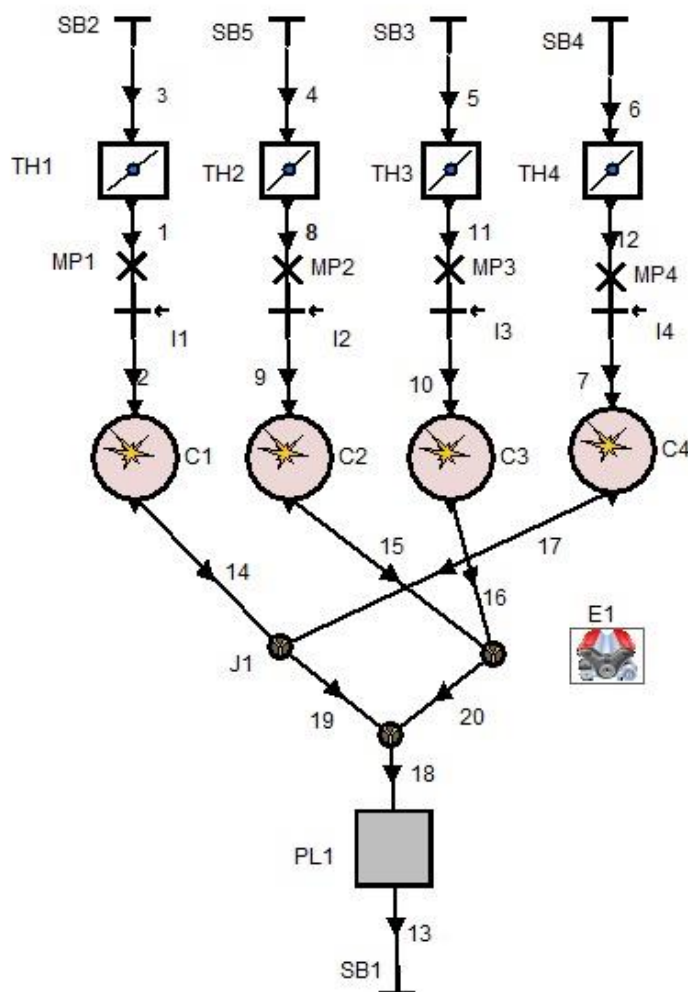
Maksimalna snaga iznosi 87,6 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 146,11 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.



**Slika 4.10. Stupanj punjenja za konfiguraciju 4-1 promjera 30 mm  
i dužine cijevi 660 mm**

## 4.2. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1

Simulacijski model motora za određivanje optimalne konfiguracije ispušnog sustava 4-2-1 je također, kao i kod konfiguracije 4-1, nastavak modela za optimizaciju usisa. Izmijenjen je ispušni sustav, usis i ostali parametri motora nisu mijenjani kako bi se nakon odabira najbolje konfiguracije mogli usporediti rezultati.



**Slika 4.11. Simulacijski model motora s 4-2-1 ispušnim sustavom**

Ispuh simulacijskog modela se razlikuje po tome što se u ovoj verziji ispušne cijevi 1. i 4. cilindra spajaju u jednu među-cijev, te ispušne cijevi 2. i 3. cilindra u drugu među-cijev, među-cijevi se nakon toga spajaju u cijev koja produkte izgaranja vodi do zadnjeg dijela automobila gdje izlaze u okoliš.

Za simulaciju ove konfiguracije ispuha dužine ispušnih cijevi koje izlaze iz glave motora mijenjane su u intervalu od 200 do 520 mm s korakom 40 mm. Dužina među-cijevi mijenjana je u intervalu od 190 do 510 mm s korakom 40 mm. Ove dvije dužine kombinirane su na način da im ukupna dužina ne prelazi preko 710 mm. Unutarnji promjer cijevi bio je u intervalu od 26 do 40 mm, s korakom 2 mm, te su za svaki od navedenih promjera cijevi ponovljeni proračuni svih kombinacija dužina cijevi. To daje ukupno 408 različite konfiguracije ispušnog sustava, za svaku od tih 408 konfiguracije izračunata je simulacija rada motora pri punom opterećenju kroz cijeli raspon brzine vrtnje sa korakom od  $500 \text{ min}^{-1}$ , odnosno ukupno 5304 radne točke.

Kod ovolikog broja parametara koji se mijenjaju u ovako velikim intervalima dolazimo do problema s prikazivanjem rezultata simulacija. Zbog toga je odlučeno analizirati rezultate za svaki promjer cijevi zasebno, usporediti rezultate i odabrati najbolje kombinacije te ponoviti simulacije s finijim korakom promjene dužina cijevi u rasponima dužina gdje su ostvareni najbolji rezultati. Kao i ranije u ovom radu, kriterij uspoređivanja će biti površina ispod krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ .

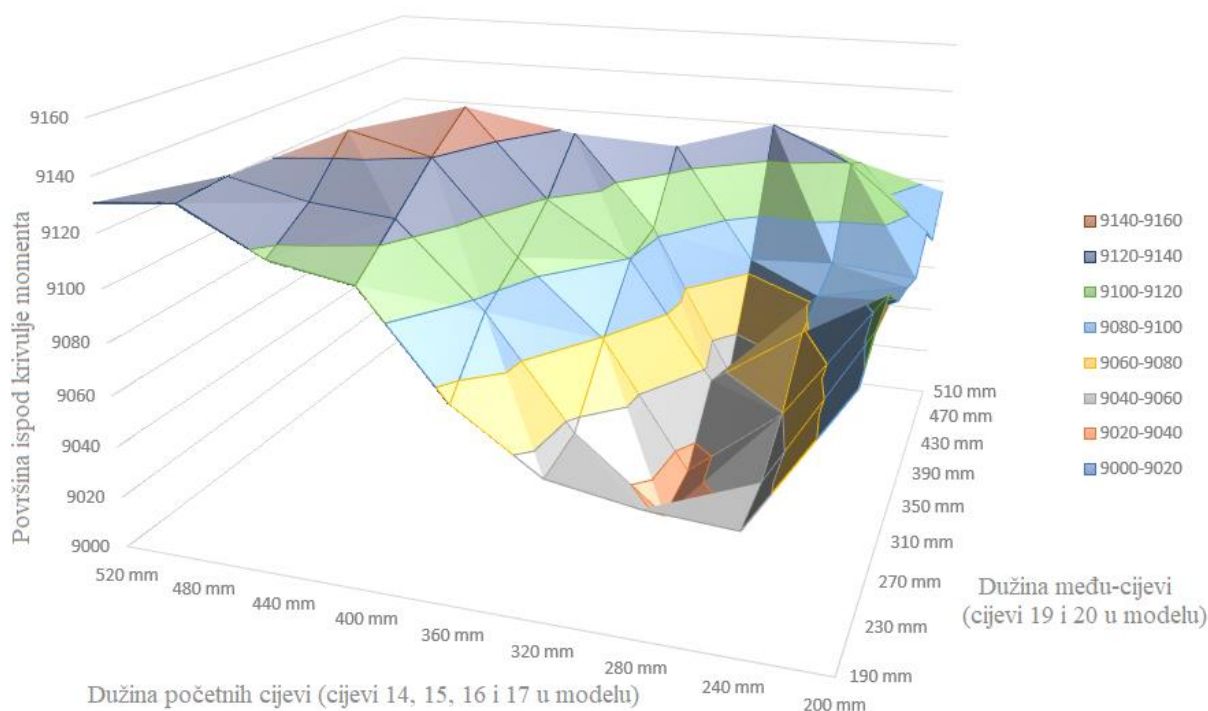
Zbog jednostavnosti, u daljnjem tekstu će se koristiti oznaka za kombinaciju dužina cijevi u kojoj je prvi broj dužina početnih cijevi (odnosno cijevi 3, 4, 5 i 6 u modelu) a drugi broj dužina među-cijevi (odnosno cijevi 19 i 20 u modelu), npr. 440-230 mm.

#### 4.2.1. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 26 mm

**Tablica 4.4. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm**

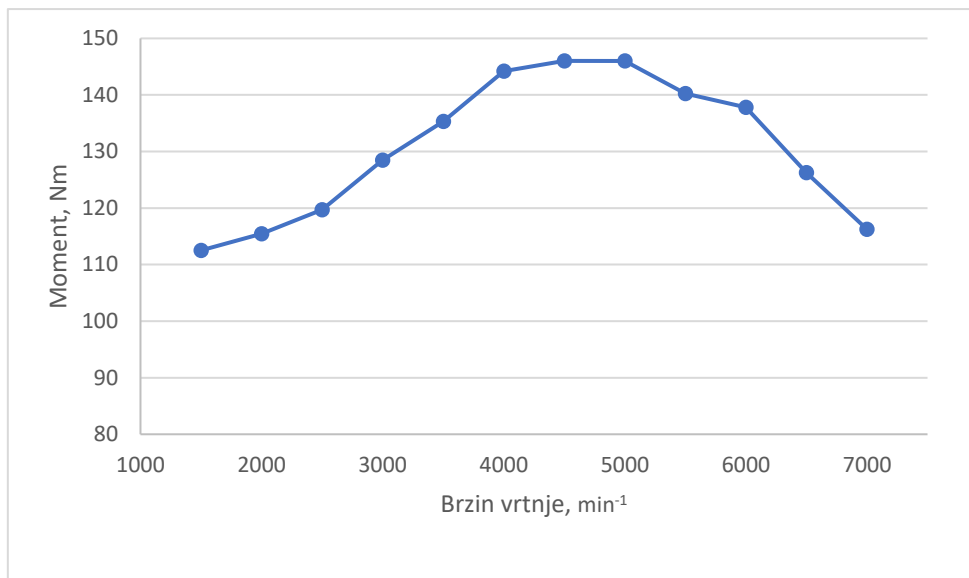
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |        |        |        |         |         |         |         |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm | 270 mm | 310 mm | 350 mm  | 390 mm  | 430 mm  | 470 mm  | 510 mm  |
| 200 mm                  | 9097.78                                      | 9104.6 | 9106.7 | 9094.5 | 9089.83 | 9083.79 | 9093.91 | 9081.56 | 9095.37 |
| 240 mm                  | 9045.53                                      | 9048   | 9059.7 | 9078.9 | 9082.75 | 9086.49 | 9119.5  | 9113.07 | -       |
| 280 mm                  | 9047.68                                      | 9030.5 | 9033.1 | 9056.2 | 9047.3  | 9084.7  | 9133.31 | -       | -       |
| 320 mm                  | 9053.13                                      | 9056.1 | 9079.3 | 9099.6 | 9103.1  | 9128.78 | -       | -       | -       |
| 360 mm                  | 9074.54                                      | 9096.2 | 9106.3 | 9119.6 | 9138.03 | -       | -       | -       | -       |
| 400 mm                  | 9111.72                                      | 9125.8 | 9140.1 | 9152.3 | -       | -       | -       | -       | -       |
| 440 mm                  | 9117.15                                      | 9128.7 | 9147.5 | -      | -       | -       | -       | -       | -       |
| 480 mm                  | 9133.38                                      | 9135.4 | -      | -      | -       | -       | -       | -       | -       |

U tablici 4.4. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 400-310 mm.

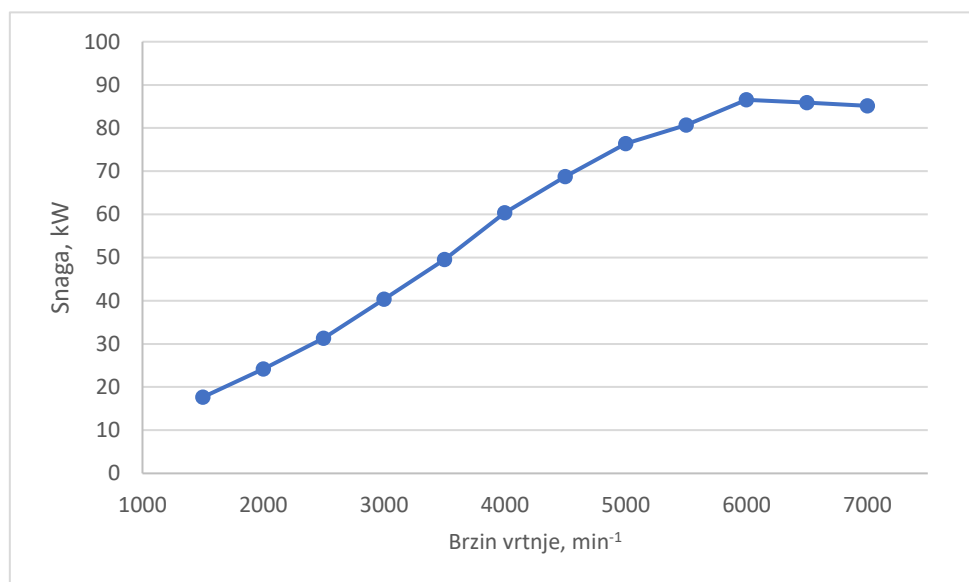


**Slika 4.12. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm**

Na slici 4.12. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.4. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.4. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.4. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.13. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm i kombinacije dužina cijevi 400 mm-310 mm**



**Slika 4.14. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 26 mm i kombinacije dužina cijevi 400 mm - 310 mm**

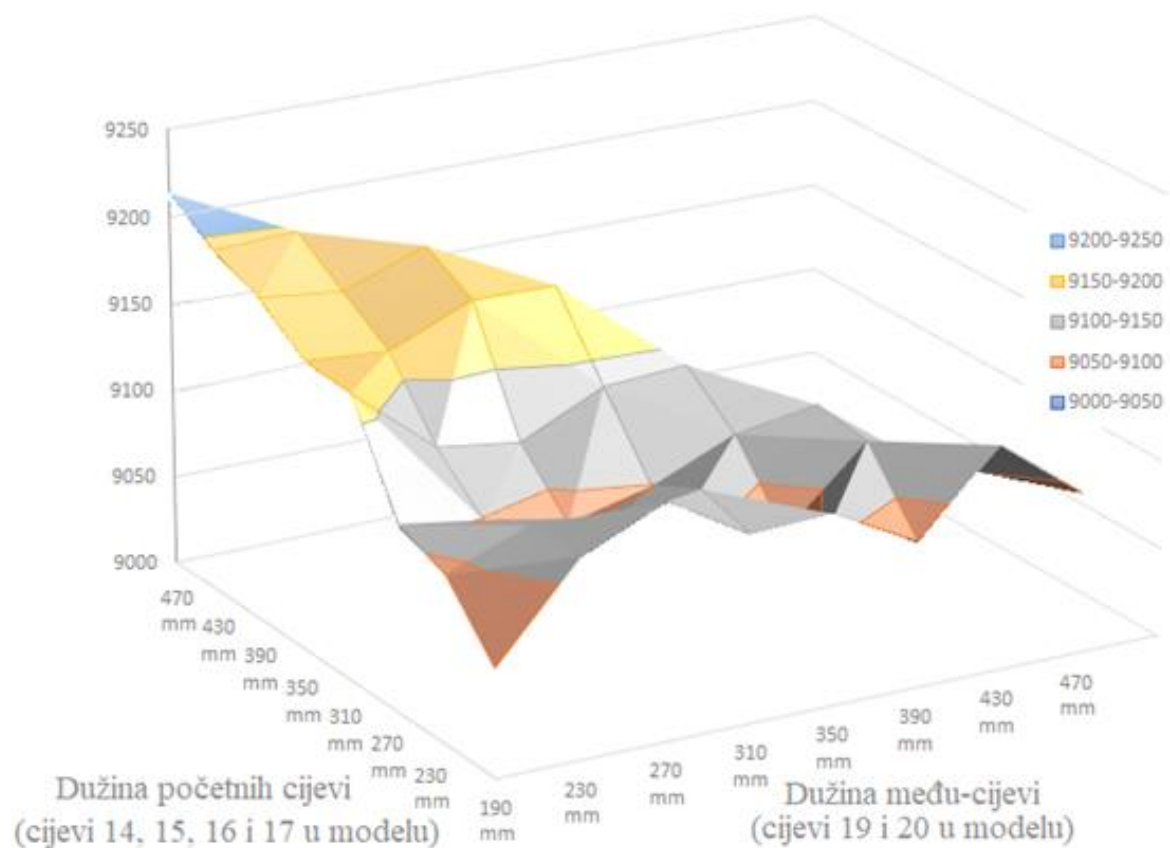
Maksimalna snaga iznosi 86,54 kW pri 6000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 146,01 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.2. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 28 mm

**Tablica 4.5. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm**

| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm  | 270 mm  | 310 mm  | 350 mm  | 390 mm  | 430 mm  | 470 mm  |
| 240 mm                  | 9061,39                                      | 9113,18 | 9133,73 | 9105,76 | 9107,55 | 9082,93 | 9127,42 | 9091,56 |
| 280 mm                  | 9095,28                                      | 9113,37 | 9108,5  | 9114,21 | 9080,29 | 9122,78 | 9092,9  | -       |
| 320 mm                  | 9106,34                                      | 9098,92 | 9087,63 | 9099,17 | 9119,28 | 9126,95 | -       | -       |
| 360 mm                  | 9163,04                                      | 9123,59 | 9117,02 | 9139,35 | 9142,48 | -       | -       | -       |
| 400 mm                  | 9165,03                                      | 9161,65 | 9181,48 | 9180,85 | -       | -       | -       | -       |
| 440 mm                  | 9184,88                                      | 9179,39 | 9196,74 | -       | -       | -       | -       | -       |
| 480 mm                  | 9196,07                                      | 9198,3  | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| 520 mm                  | 9213,7                                       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

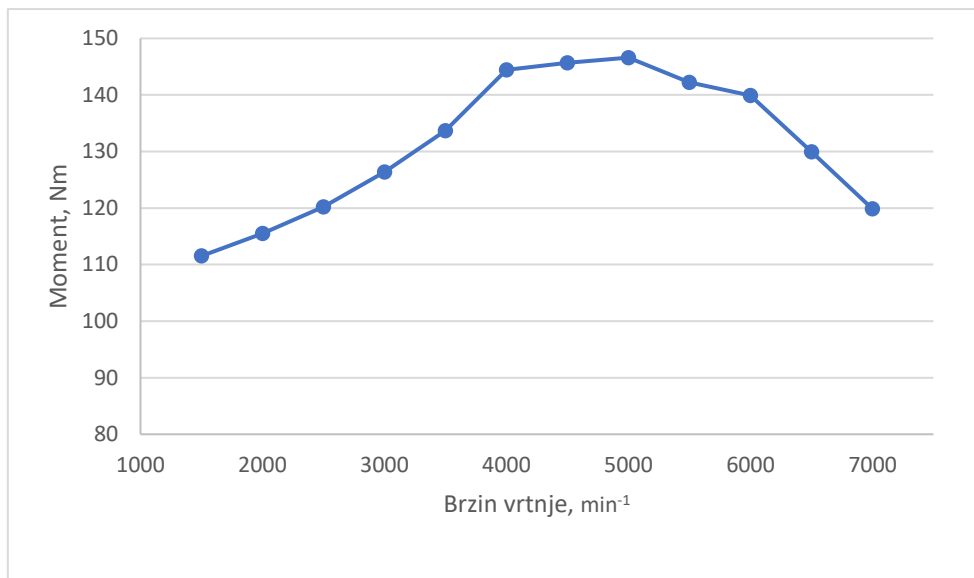
U tablici 4.5. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 520-190 mm.



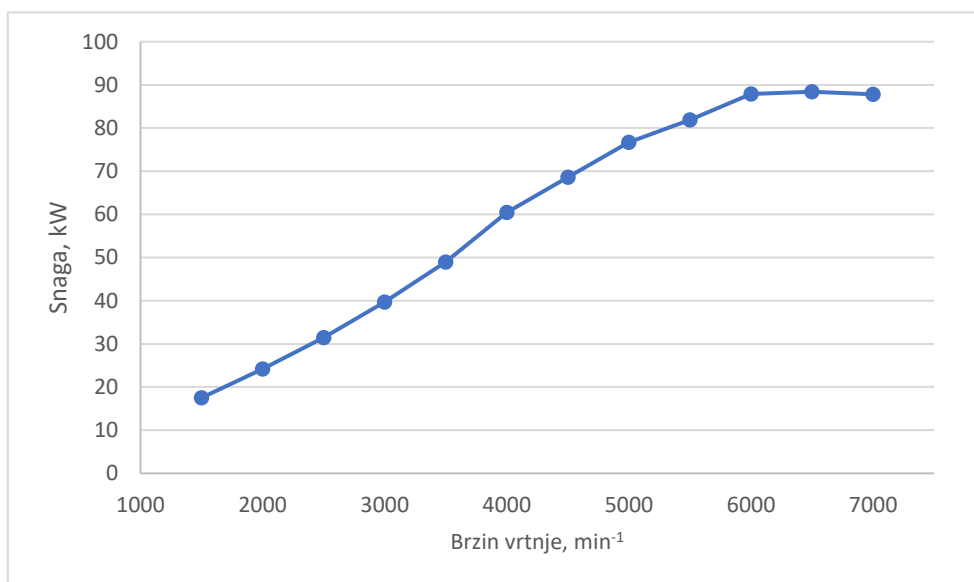
**Slika 4.15. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm**



Na slici 4.15. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.5. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.5. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.5. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.16. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**



**Slika 4.17. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 28 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**

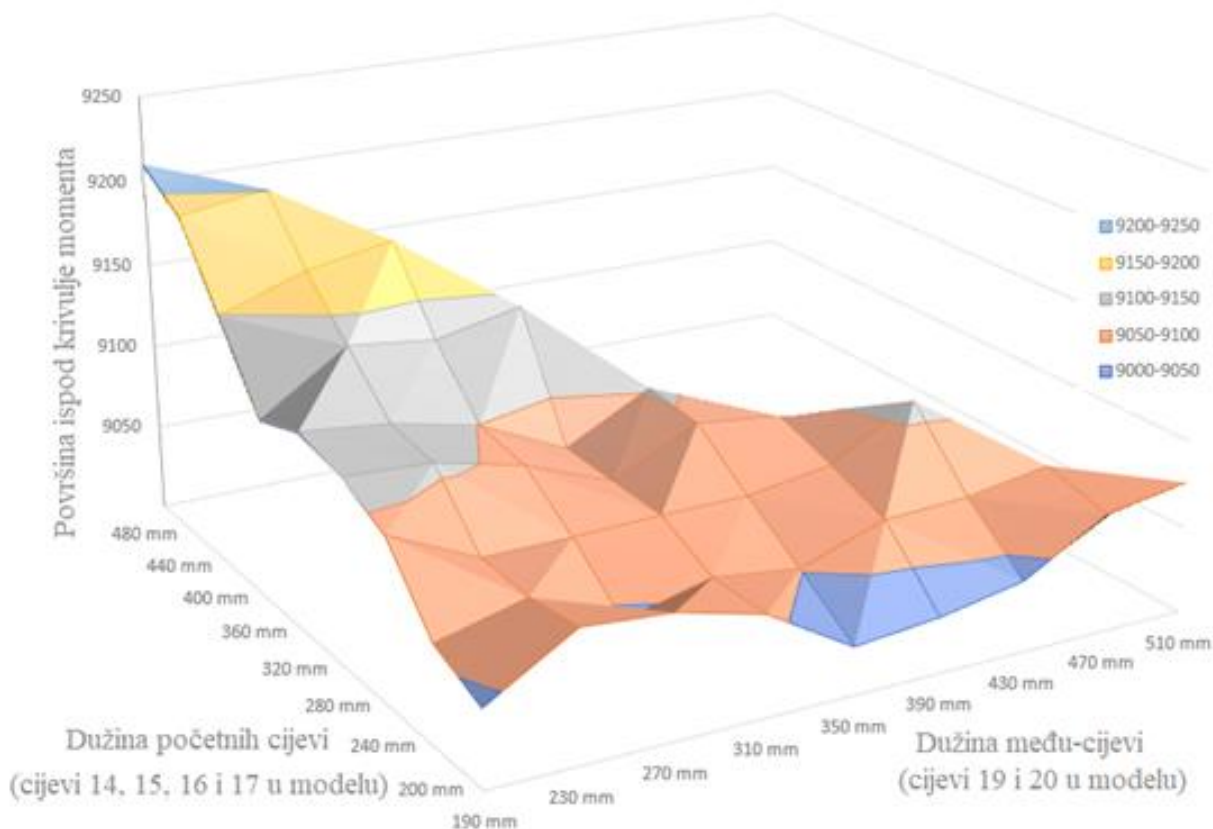
Maksimalna snaga iznosi 88,41 kW pri 6500 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 146,61 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

### 4.2.3. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 30 mm

**Tablica 4.6. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm**

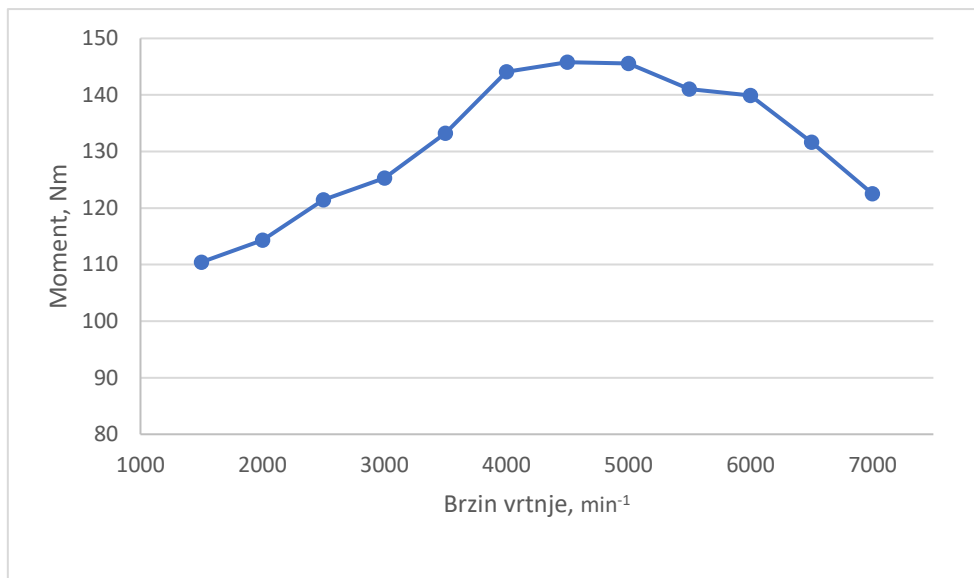
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |         |         |         |         |        |         |         |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm  | 270 mm  | 310 mm  | 350 mm  | 390 mm | 430 mm  | 470 mm  | 510 mm  |
| 200 mm                  | 9044,06                                      | 9074,24 | 9070,29 | 9057,45 | 9027,54 | 9032,1 | 9041,2  | 9068,22 | 9075,98 |
| 240 mm                  | 9056,81                                      | 9069,73 | 9045,31 | 9057,58 | 9051,2  | 9068   | 9070,43 | 9078,13 | -       |
| 280 mm                  | 9095,09                                      | 9071,62 | 9072,01 | 9073,53 | 9073,91 | 9081,5 | 9108,86 | -       | -       |
| 320 mm                  | 9108,15                                      | 9105,93 | 9094,09 | 9074,86 | 9098,18 | 9092,8 | -       | -       | -       |
| 360 mm                  | 9115,82                                      | 9110,57 | 9099,63 | 9076,32 | 9102,32 | -      | -       | -       | -       |
| 400 mm                  | 9105,68                                      | 9138,89 | 9133,05 | 9143,95 | -       | -      | -       | -       | -       |
| 440 mm                  | 9149,76                                      | 9167,2  | 9176,58 | -       | -       | -      | -       | -       | -       |
| 480 mm                  | 9192,75                                      | 9201,12 | -       | -       | -       | -      | -       | -       | -       |
| 520 mm                  | 9210,28                                      | -       | -       | -       | -       | -      | -       | -       | -       |

U tablici 4.6. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 520-190 mm.

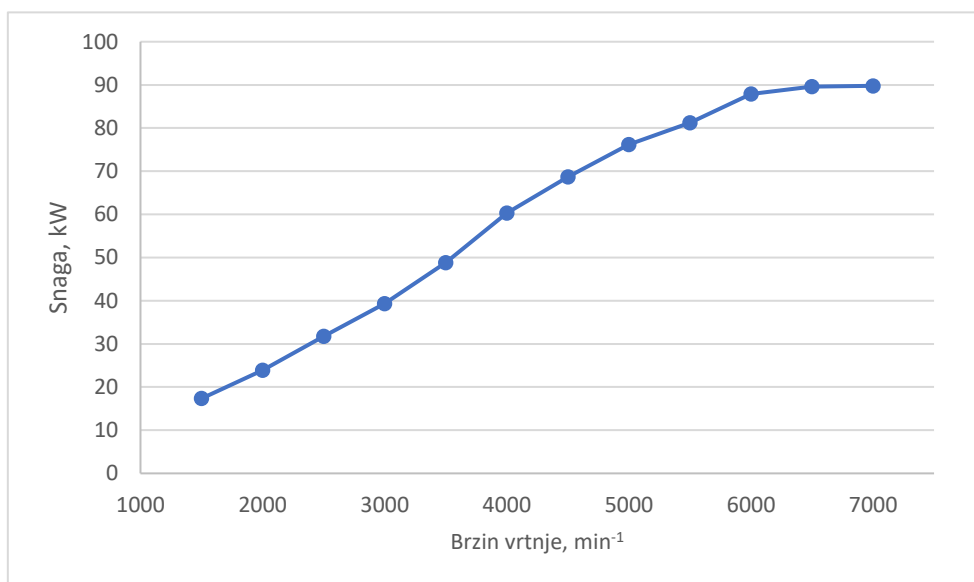


**Slika 4.18. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm**

Na slici 4.18. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.6. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.6. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.6. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.19. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**



**Slika 4.20. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**

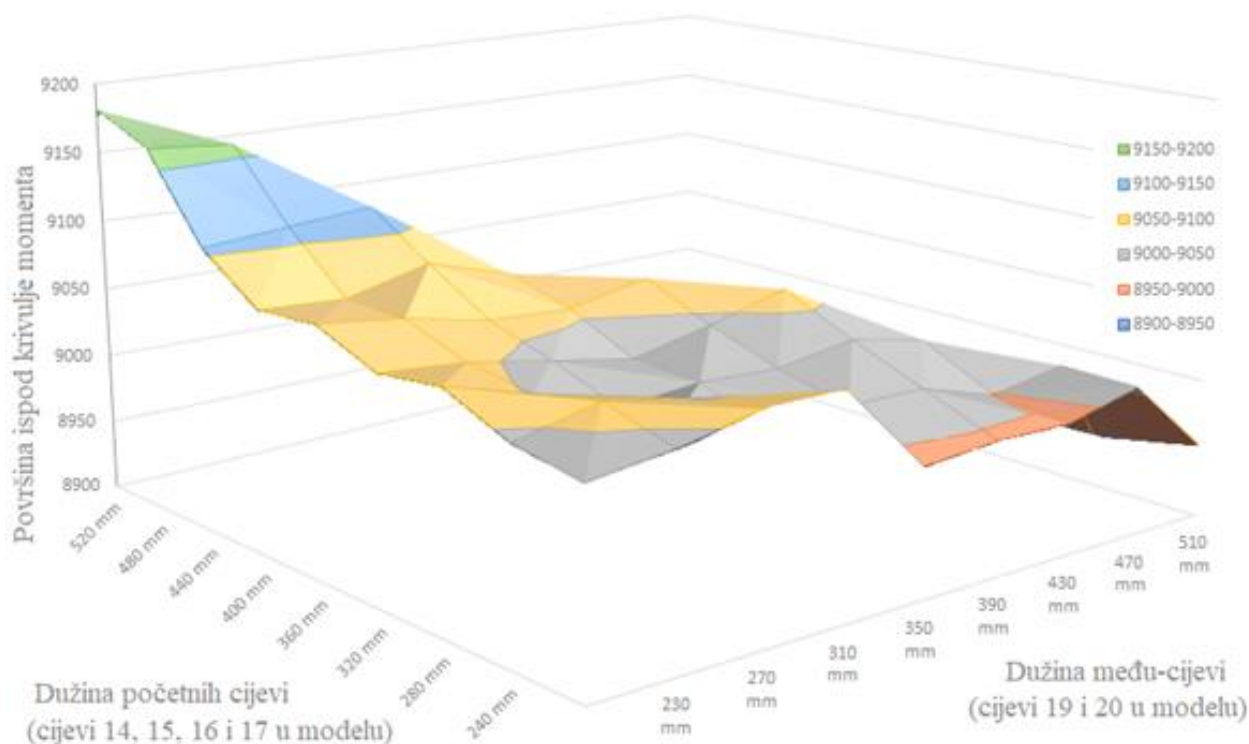
Maksimalna snaga iznosi 89,78 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,79 Nm pri 4500 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.4. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 32 mm

**Tablica 4.7. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm**

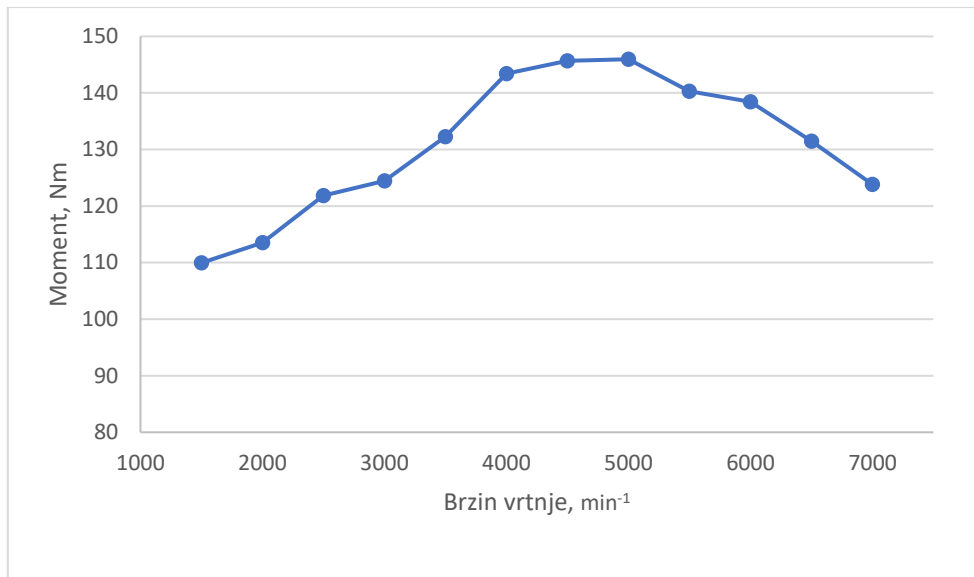
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |         |         |         |        |         |         |         |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm  | 270 mm  | 310 mm  | 350 mm | 390 mm  | 430 mm  | 470 mm  | 510 mm  |
| 200 mm                  | 9037,32                                      | 9044,45 | 9055,88 | 9055,3  | 8991,8 | 8995,77 | 8994,4  | 9007,41 | 8952,55 |
| 240 mm                  | 9045,52                                      | 9058,19 | 9048    | 9010,91 | 9017,1 | 9016,31 | 8999,44 | 9008,33 | -       |
| 280 mm                  | 9065,37                                      | 9048,4  | 9026,2  | 9030,79 | 9028,1 | 9036,81 | 9025,04 | -       | -       |
| 320 mm                  | 9059,16                                      | 9054,26 | 9043,28 | 9032,8  | 9044,9 | 9060,19 | -       | -       | -       |
| 360 mm                  | 9077,45                                      | 9069,92 | 9057,42 | 9054,56 | 9065,9 | -       | -       | -       | -       |
| 400 mm                  | 9073,77                                      | 9070,45 | 9084,97 | 9067,36 | -      | -       | -       | -       | -       |
| 440 mm                  | 9104,12                                      | 9109,21 | 9114,17 | -       | -      | -       | -       | -       | -       |
| 480 mm                  | 9162,92                                      | 9157,78 | -       | -       | -      | -       | -       | -       | -       |
| 520 mm                  | 9181,57                                      | -       | -       | -       | -      | -       | -       | -       | -       |

U tablici 4.7. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 520-190 mm.

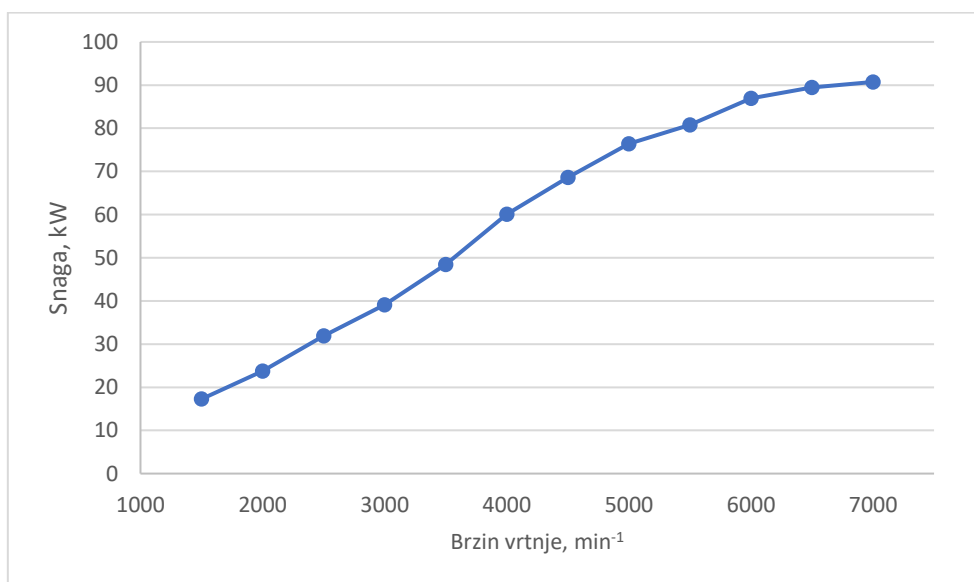


**Slika 4.21. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm**

Na slici 4.21. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.7. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.7. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.7. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.22. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**



**Slika 4.23. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 32 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**

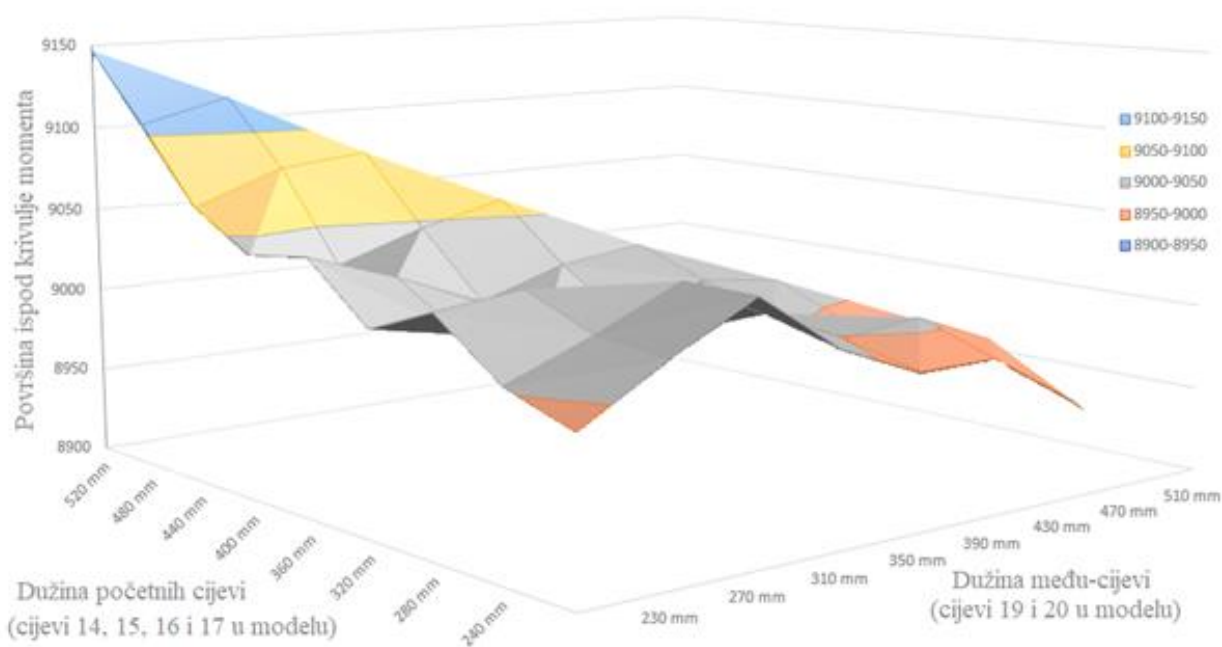
Maksimalna snaga iznosi 90,72 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,97 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.5. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 34 mm

**Tablica 4.8. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm**

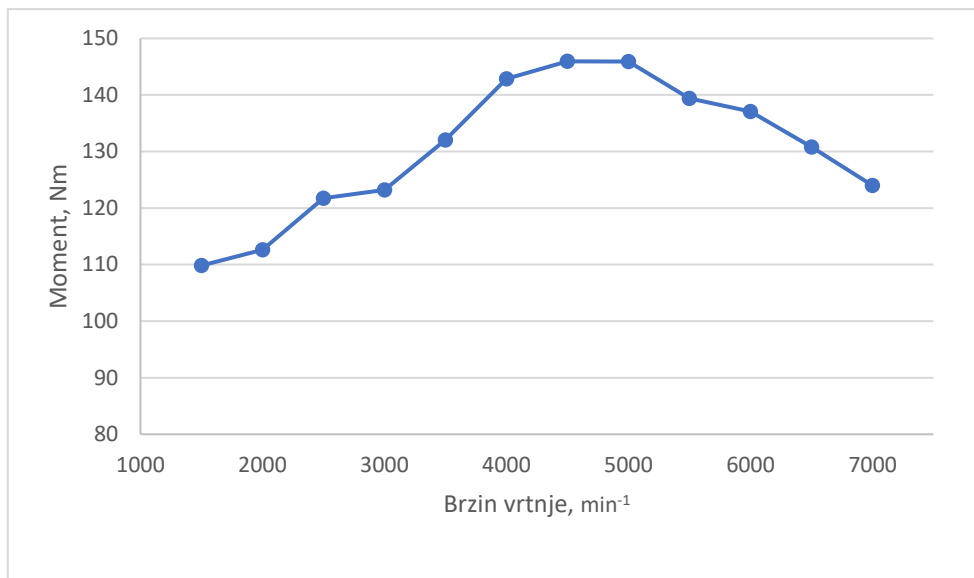
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |         |        |         |         |        |         |        |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm  | 270 mm | 310 mm  | 350 mm  | 390 mm | 430 mm  | 470 mm | 510 mm  |
| 200 mm                  | 8989,4                                       | 9018,2  | 9043,3 | 9008,84 | 8989,33 | 8989,5 | 8960,34 | 8924,9 | 8932,88 |
| 240 mm                  | 9002,9                                       | 9021,98 | 9043,9 | 9019,53 | 8999,3  | 9004,6 | 8985,23 | 8936,5 | -       |
| 280 mm                  | 9032,6                                       | 9038,25 | 9010,4 | 9004,46 | 9005,96 | 8994,4 | 8988,96 | -      | -       |
| 320 mm                  | 9015,5                                       | 9006,17 | 9005,4 | 8998,97 | 9017,95 | 9011,7 | -       | -      | -       |
| 360 mm                  | 9047,4                                       | 9030,33 | 9010   | 9025,87 | 9032,18 | -      | -       | -      | -       |
| 400 mm                  | 9041,8                                       | 9030,04 | 9046,6 | 9058,84 | -       | -      | -       | -      | -       |
| 440 mm                  | 9062,6                                       | 9081,22 | 9086,4 | -       | -       | -      | -       | -      | -       |
| 480 mm                  | 9106,2                                       | 9119,33 | -      | -       | -       | -      | -       | -      | -       |
| 520 mm                  | 9147                                         | -       | -      | -       | -       | -      | -       | -      | -       |

U tablici 4.8. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 520-190 mm.

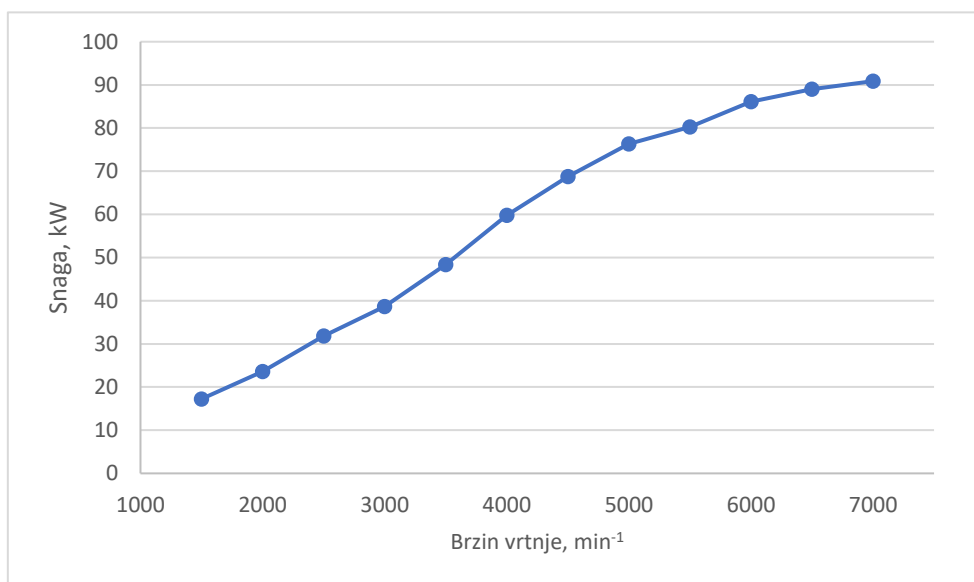


**Slika 4.24. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm**

Na slici 4.24. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.8. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.8. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.8. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.25. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**



**Slika 4.26. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 34 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**

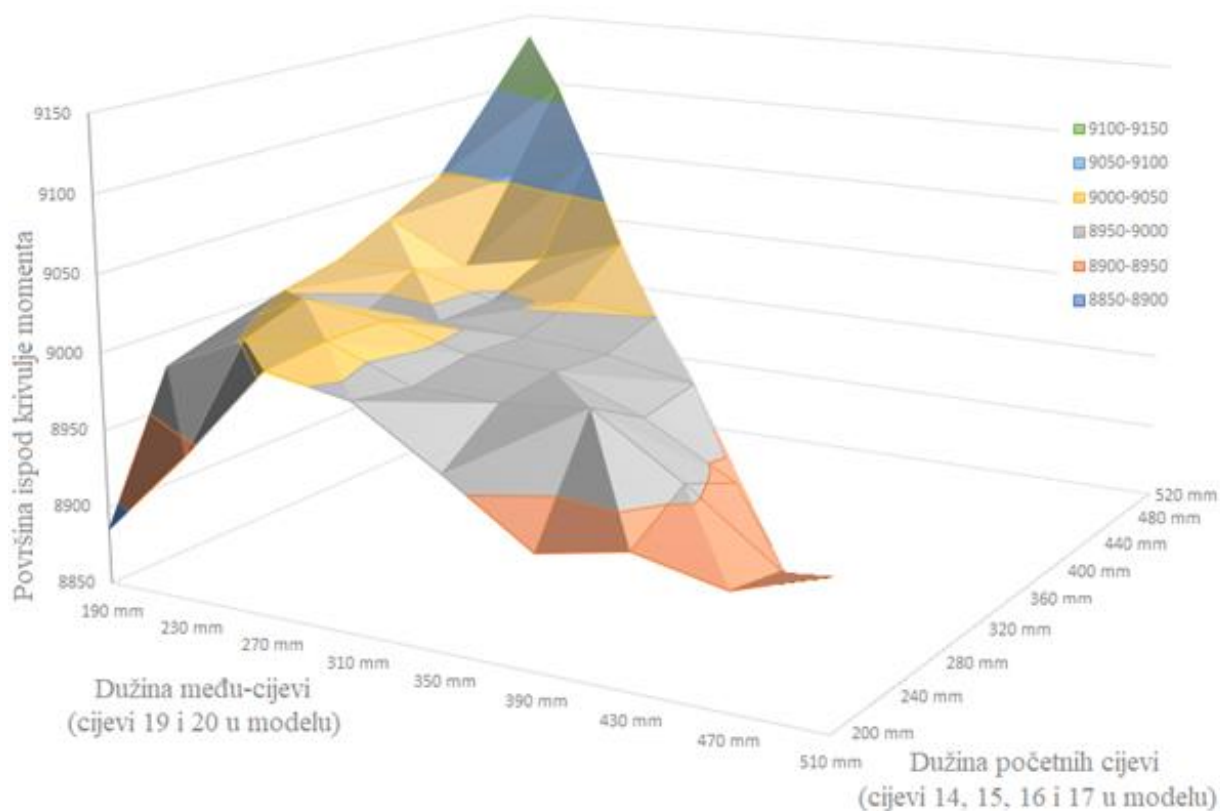
Maksimalna snaga iznosi 90,86 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,95 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.6. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 36 mm

**Tablica 4.9. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm**

| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |        |         |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|----------------------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm | 270 mm  | 310 mm | 350 mm | 390 mm | 430 mm | 470 mm | 510 mm |
| 200 mm                  | 8885,4                                       | 8942,3 | 9005,2  | 8995,4 | 8960,3 | 8922,4 | 8934,1 | 8922   | 8941,6 |
| 240 mm                  | 8977,1                                       | 9002,7 | 9010    | 8988,9 | 8987,7 | 8993,6 | 8956,9 | 8914,7 | -      |
| 280 mm                  | 8990,3                                       | 9016,4 | 9009,23 | 8995,1 | 8992,6 | 8972,1 | 8940,7 | -      | -      |
| 320 mm                  | 9001,3                                       | 8990,8 | 8995,47 | 8992,8 | 8989,2 | 8978,6 | -      | -      | -      |
| 360 mm                  | 9010,3                                       | 9010,7 | 8996,15 | 9003,3 | 9000   | -      | -      | -      | -      |
| 400 mm                  | 9027,6                                       | 8999,8 | 9012,25 | 9029,9 | -      | -      | -      | -      | -      |
| 440 mm                  | 9047                                         | 9053,8 | 9073,43 | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 480 mm                  | 9090,1                                       | 9109,8 | -       | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 520 mm                  | 9134,1                                       | -      | -       | -      | -      | -      | -      | -      | -      |

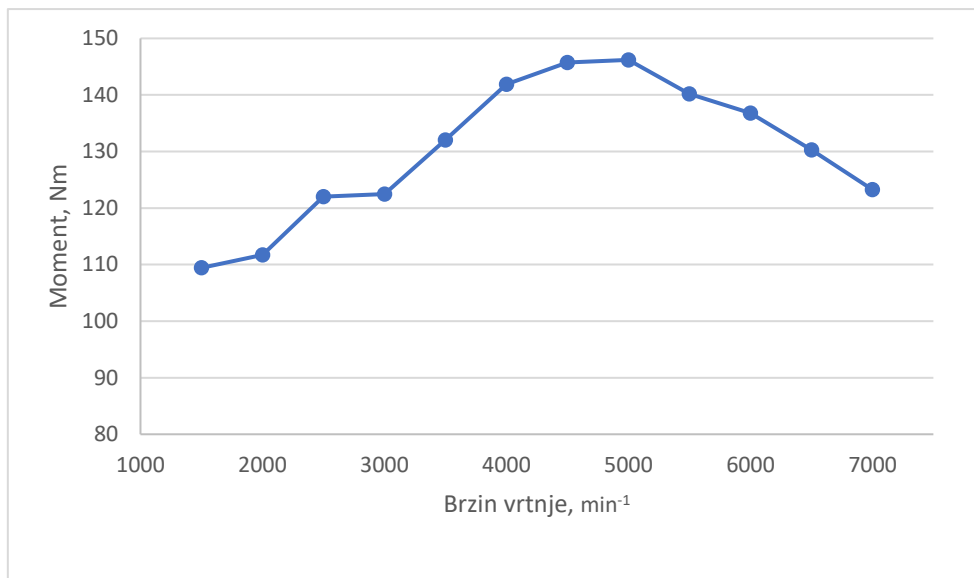
U tablici 4.9. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 520-190 mm.



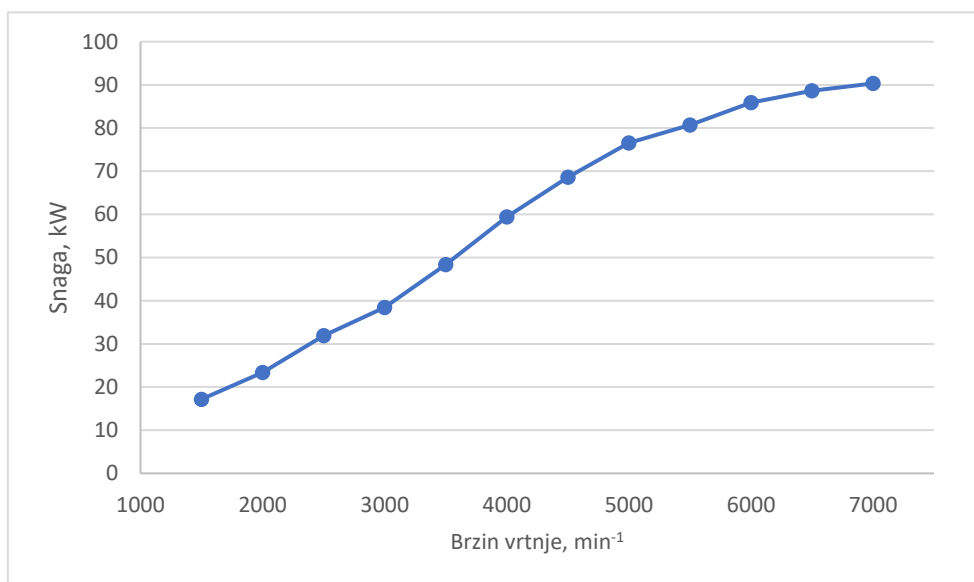
**Slika 4.27. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm**



Na slici 4.27. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.9. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.9. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.9. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.28. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**



**Slika 4.29. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 36 mm i kombinacije dužina cijevi 520-190 mm**

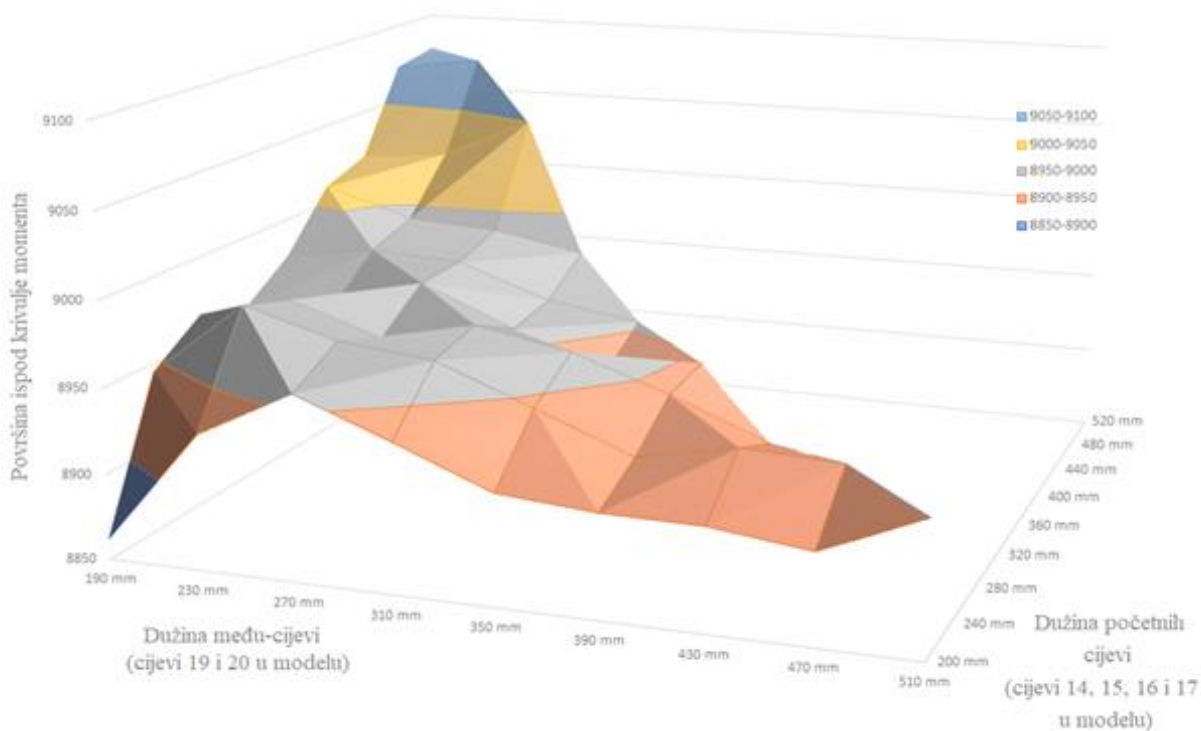
Maksimalna snaga iznosi 90,33 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 146,20 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.7. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 38 mm

**Tablica 4.10. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm**

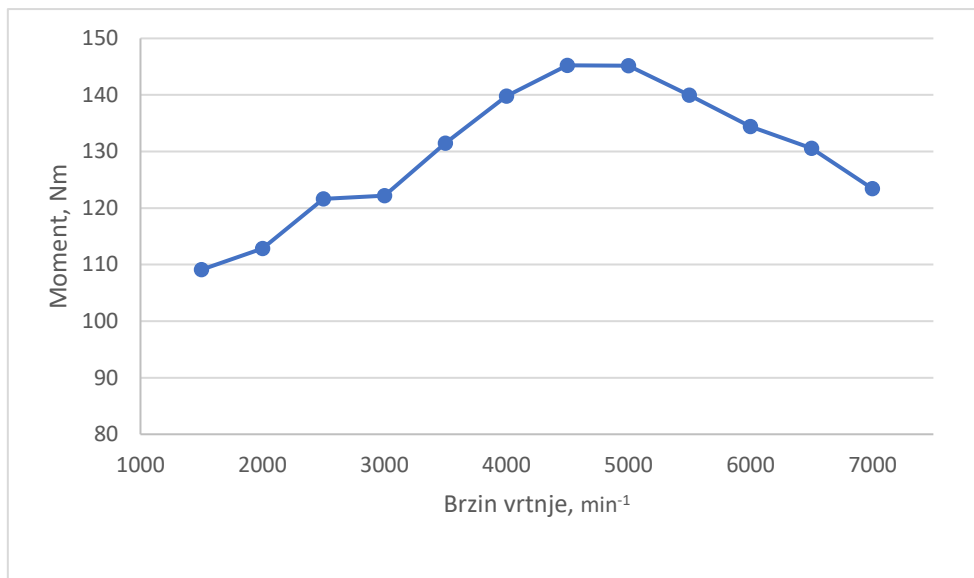
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |        |        |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------|----------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm | 270 mm | 310 mm  | 350 mm  | 390 mm  | 430 mm  | 470 mm  | 510 mm  |
| 200 mm                  | 8862,3                                       | 8929,2 | 8957,8 | 8936,75 | 8914,4  | 8909,95 | 8909,2  | 8902,32 | 8926,76 |
| 240 mm                  | 8944,8                                       | 8989   | 8973,1 | 8967,31 | 8945,5  | 8923,63 | 8934,92 | 8932,17 | -       |
| 280 mm                  | 8965,3                                       | 8979,1 | 8961   | 8973,64 | 8963,03 | 8943,65 | 8921,21 | -       | -       |
| 320 mm                  | 8956,1                                       | 8961,4 | 8980,9 | 8957,67 | 8936,63 | 8947,26 | -       | -       | -       |
| 360 mm                  | 8976,4                                       | 8984,9 | 8981,4 | 8962    | 8953,24 | -       | -       | -       | -       |
| 400 mm                  | 9010                                         | 8993,5 | 8989,9 | 8979,43 | -       | -       | -       | -       | -       |
| 440 mm                  | 9020,1                                       | 9025,2 | 9049,8 | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| 480 mm                  | 9071,7                                       | 9079,1 | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| 520 mm                  | 9077,1                                       | -      | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

U tablici 4.10. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 480-230 mm.

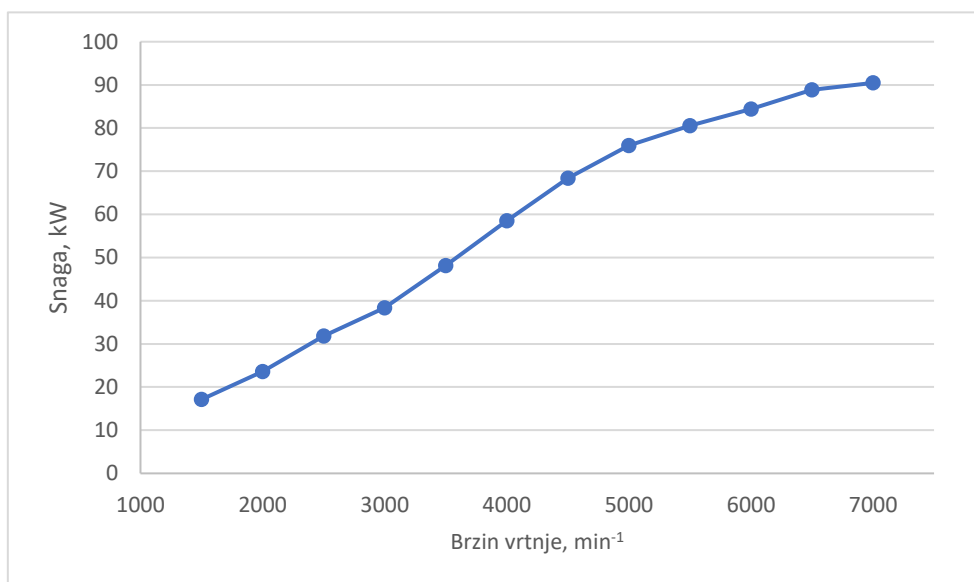


**Slika 4.30. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm**

Na slici 4.30. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.10. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.10. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.10. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.31. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm**



**Slika 4.32. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 38 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm**

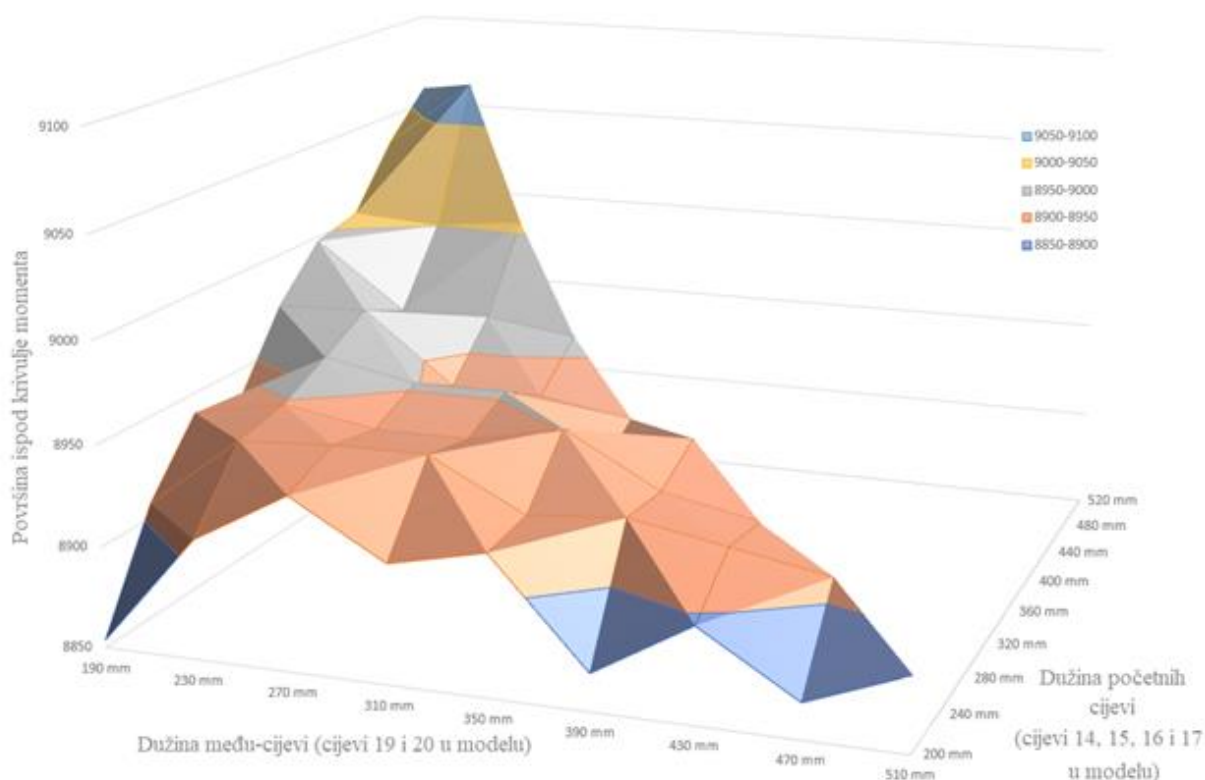
Maksimalna snaga iznosi 90,45 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,24 Nm pri 4500 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.8. Konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1 promjera 40 mm

**Tablica 4.11. Prikaz površina ispod krivulja momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm**

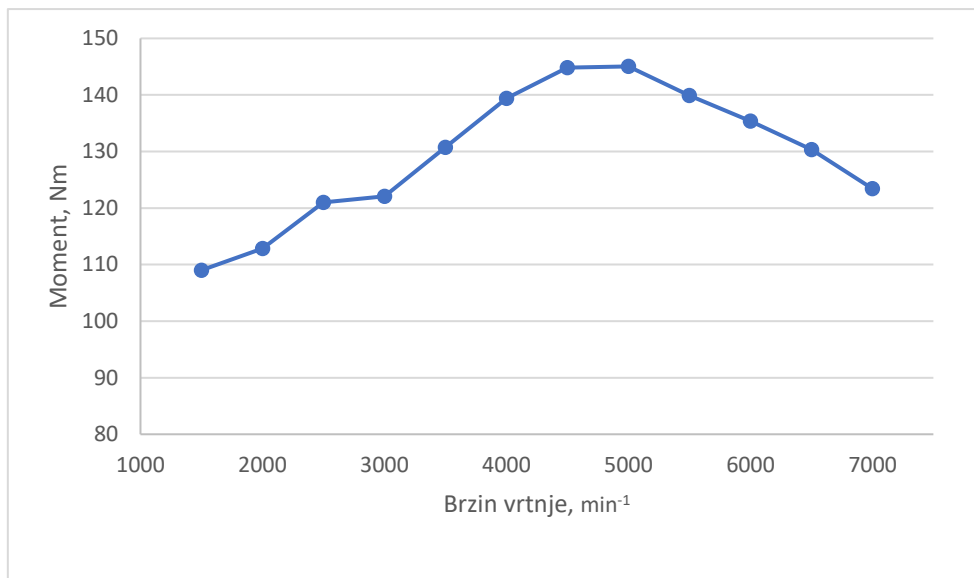
| Dužina početnih cijevi: | Dužina među cijevi (cijevi 19 i 20 u modelu) |         |        |        |        |        |         |        |        |
|-------------------------|----------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
|                         | 190 mm                                       | 230 mm  | 270 mm | 310 mm | 350 mm | 390 mm | 430 mm  | 470 mm | 510 mm |
| 200 mm                  | 8853,63                                      | 8909,02 | 8935,5 | 8908,5 | 8919,1 | 8868,3 | 8896,76 | 8867,4 | 8886,3 |
| 240 mm                  | 8907,02                                      | 8943,51 | 8946,1 | 8946,4 | 8922,1 | 8926,3 | 8917,79 | 8909,1 | -      |
| 280 mm                  | 8939,93                                      | 8949    | 8940,8 | 8940,9 | 8950,6 | 8924,6 | 8914,93 | -      | -      |
| 320 mm                  | 8934,07                                      | 8960,98 | 8951,9 | 8952   | 8914,7 | 8937,4 | -       | -      | -      |
| 360 mm                  | 8972,47                                      | 8974,31 | 8938,2 | 8937,2 | 8929,7 | -      | -       | -      | -      |
| 400 mm                  | 8997,58                                      | 8963,3  | 8963,7 | 8957,2 | -      | -      | -       | -      | -      |
| 440 mm                  | 9003,61                                      | 9000,3  | 9005,2 | -      | -      | -      | -       | -      | -      |
| 480 mm                  | 9035,46                                      | 9070,61 | -      | -      | -      | -      | -       | -      | -      |
| 520 mm                  | 9058,64                                      | -       | -      | -      | -      | -      | -       | -      | -      |

U tablici 4.11. prikazane su ukupne površine ispod svake simulirane krivulje momenta u rasponu od  $3000 \text{ min}^{-1}$  do  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Dijagram koji slijedi će te podatke predočiti puno preglednije. Najveća vrijednost ostvarena je za kombinaciju 480-230 mm.

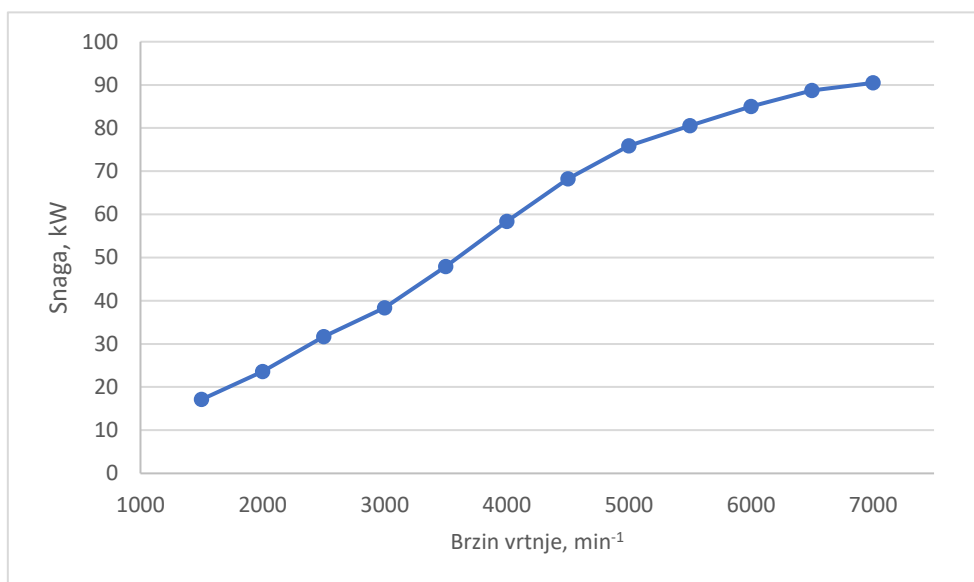


**Slika 4.33. Dijagram usporedbe površina ispod svake krivulje momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm**

Na slici 4.33. jedna os je dužina početnih cijevi a druga je dužina među-cijevi, kao u tablici 4.11. Na z osi su prikazane površine ispod svake od krivulja, također kao u tablici 4.11. Rasponi površina su prikazani u različitim bojama kako bi bilo lakše uočiti nagibe. Svaka točka iz tablice 4.11. je prikazana kao spoj linija na dijagramu.



**Slika 4.34. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm**



**Slika 4.35. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 40 mm i kombinacije dužina cijevi 480-230 mm**

Maksimalna snaga iznosi 90,46 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,05 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

#### 4.2.9. Odabir najpovoljnije konfiguracija ispušnog sustava 4-2-1

Na prethodnim stranicama prikazani su rezultati simulacija za svaki promjer ispušne cijevi zasebno, ako se rezultati usporede dobiva se da su konfiguracije s najvećom površinom ispod krivulje momenta sljedeće:

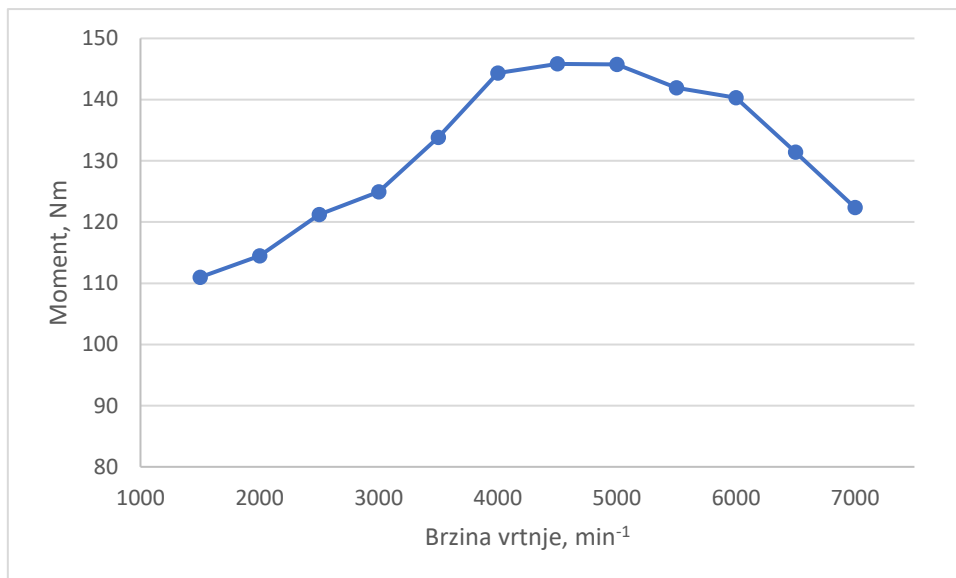
- promjer cijevi 28 mm, dužine početnih cijevi 520 mm i među-cijevi 190 mm, maksimalna snaga iznosi 88,41 kW pri 6500 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 146,61 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>,
- promjer cijevi 30 mm, dužine početnih cijevi 520 mm i među-cijevi 190 mm, maksimalna snaga iznosi 89,78 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,79 Nm pri 4500 min<sup>-1</sup>,
- promjer cijevi 32 mm, dužine početnih cijevi 520 mm i među-cijevi 190 mm, maksimalna snaga iznosi 90,72 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,97 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

Kako je u simulaciji korak promjene dužina bio izrazito grub (zbog velikog broja konfiguracija), za 3 najbolje konfiguracije su ponovljene simulacije s finijim korakom, s ciljem da se preciznije utvrdi optimalna kombinacija dužina ispušnog sustava. Ovog puta su granice intervala dužina prvih cijevi od 490 do 550 mm odnosno 220 do 160 mm za među-cijevi. Korak promjene dužine je 15 mm što daje ukupno 45 kombinacija za 3 različita promjera.

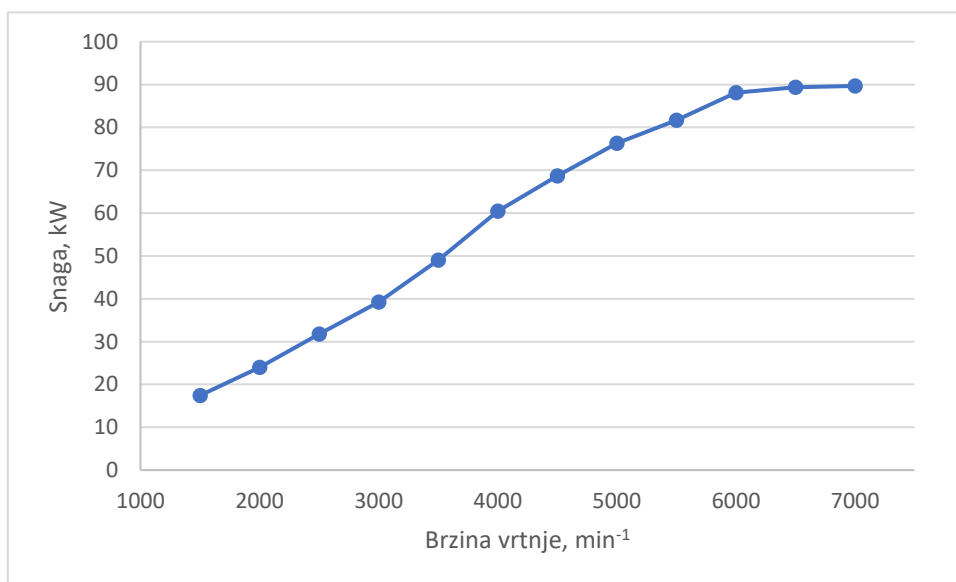
**Tablica 4.12. Prikaz površina ispod krivulja momenta za najpovoljnije konfiguracije ispuha**

| Promjer | Kombinacije dužina ispuha |          |          |          |          |
|---------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|
|         | 490-160                   | 490-175  | 490-190  | 490-205  | 490-220  |
| 28 mm   | 9194,813                  | 9202,417 | 9208,479 | 9209,983 | 9213,45  |
| 30 mm   | 9192,354                  | 9195,093 | 9197,07  | 9184,783 | 9202,319 |
| 32 mm   | 9156,15                   | 9160,246 | 9165,963 | 9167,692 | 9164,725 |
|         | 505-160                   | 505-175  | 505-190  | 505-205  | 520-160  |
| 28 mm   | 9202,808                  | 9200,496 | 9212,654 | 9212     | 9205,125 |
| 30 mm   | 9200,391                  | 9195,801 | 9204,626 | 9209,586 | 9204,123 |
| 32 mm   | 9170,729                  | 9174,563 | 9176,879 | 9177,071 | 9178,192 |
|         | 520-175                   | 520-190  | 535-160  | 535-175  | 550-160  |
| 28 mm   | 9218,758                  | 9213,696 | 9220,373 | 9217,513 | 9215,863 |
| 30 mm   | 9207,851                  | 9210,277 | 9210,126 | 9213,13  | 9224,803 |
| 32 mm   | 9179,846                  | 9181,571 | 9193,133 | 9195,538 | 9200,371 |

Na tablici 4.12 prikazane su sve kombinacije dužina (uz uvjet da je dužina navedenih cijevi maksimalno 710 mm) i površine ispod svih krivulja momenta. Vidljivo je kako najveću površinu ispod krivulje momenta ima kombinacija s promjerom 30 mm, dužinom prvih cijevi 550 mm i dužinom drugih cijevi 160 mm.

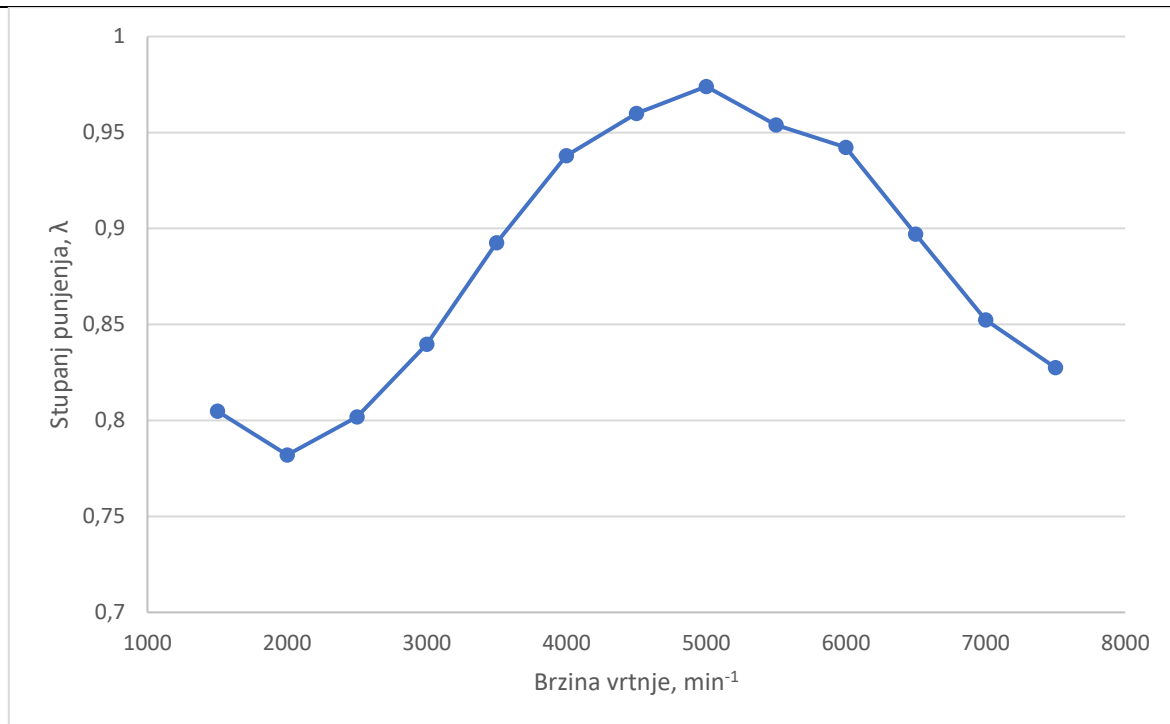


**Slika 4.36. Dijagram momenta za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm**



**Slika 4.37. Dijagram snage za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm**

Maksimalna snaga iznosi 89,67 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> a maksimalni moment iznosi 145,84 Nm pri 5000 min<sup>-1</sup>.

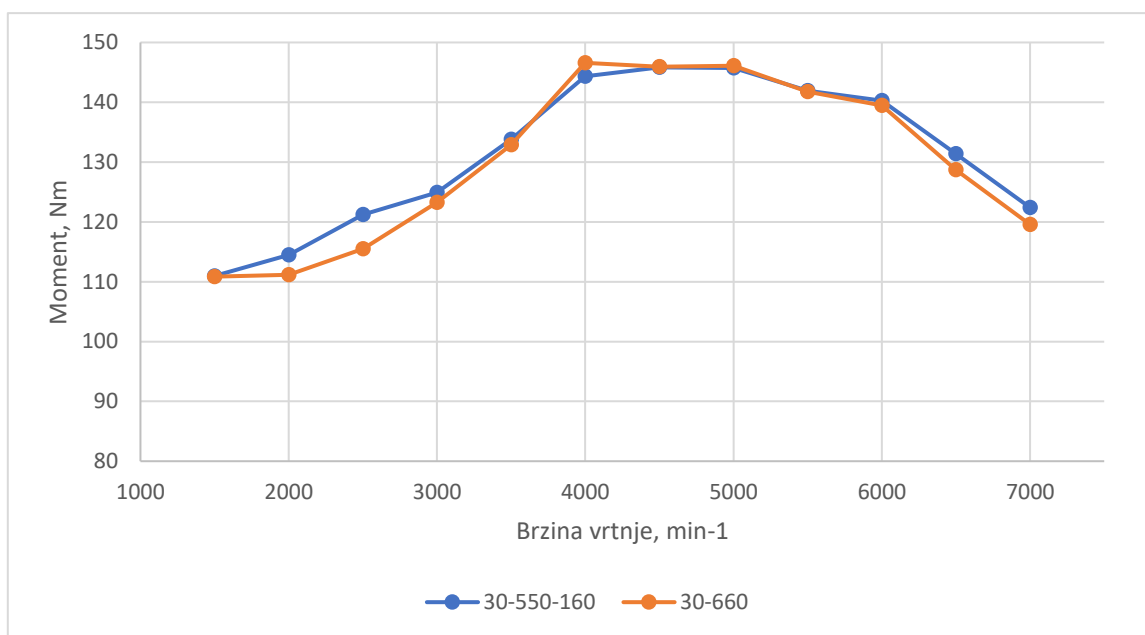


**Slika 4.38. Stupanj punjenja za konfiguraciju 4-2-1 promjera 30 mm  
i kombinacije dužina cijevi 550-160 mm**



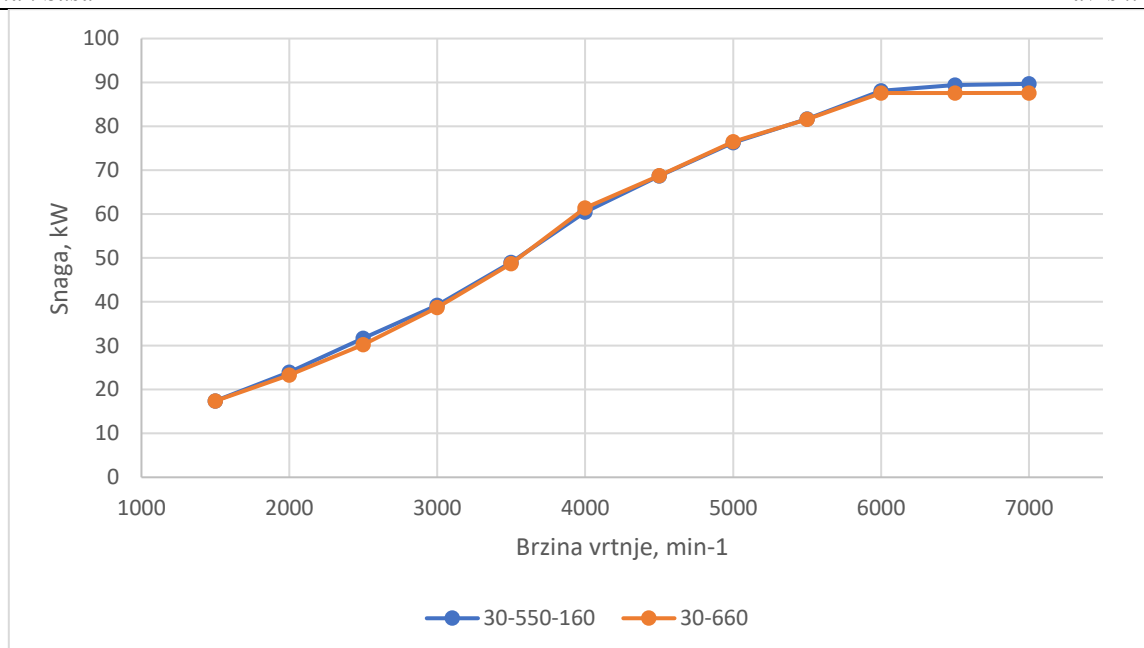
### 4.3. Odabir najpovoljnije konfiguracija ispušnog sustava

Kako bi odredili najpovoljniju konfiguraciju ispušnog sustava na temelju provedenih simulacija, potrebno je usporediti najpovoljniju konfiguraciju 4-1 s najpovoljnijom konfiguracijom 4-2-1.



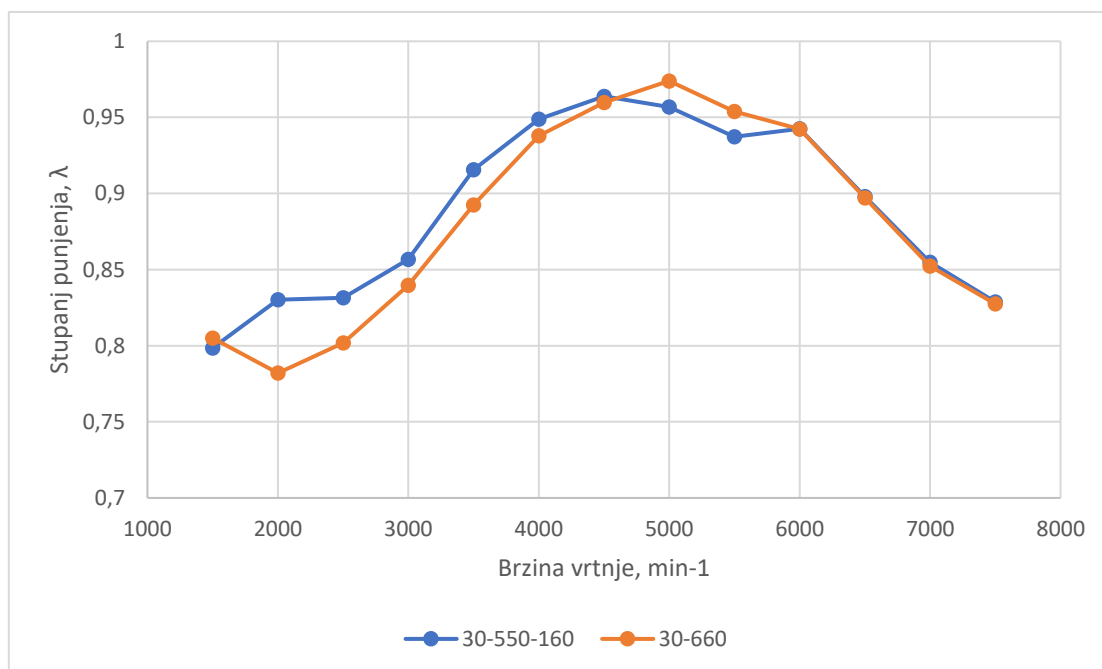
**Slika 4.39. Usporedba krivulja momenta za 4-1 i 4-2-1**

Slika 4.39. prikazuje usporedbu krivulja momenata za obje konfiguracije ispuha. Maksimalni moment za 4-1 ispušnu granu iznosi 146,59 Nm, a za 4-2-1 ispušnu granu 145,83 Nm. Iako maksimalna vrijednost momenta ide u korist 4-1 konfiguraciji, glavni kriterij u cijelom radu je bio površina ispod krivulje momenta. Veću površinu ispod krivulje momenta ima konfiguracija 4-2-1. U svakom slučaju, obje konfiguracija su vrlo slične i razlike su minimalne



**Slika 4.40. Usporedba krivulja snage za 4-1 i 4-2-1**

Na slici 4.40. je moguće vidjeti razliku krivulja snage za uspoređivane konfiguracije ispušnog sustava. Zbog malo većeg momenta u višim okretajima, konfiguracija 4-2-1 ima veću maksimalnu snagu. Maksimalna snaga za konfiguraciju 4-1 iznosi 87,6 kW na 6000 min<sup>-1</sup> dok za konfiguraciju 4-2-1 iznosi 89,67 kW pri 7000 min<sup>-1</sup>.



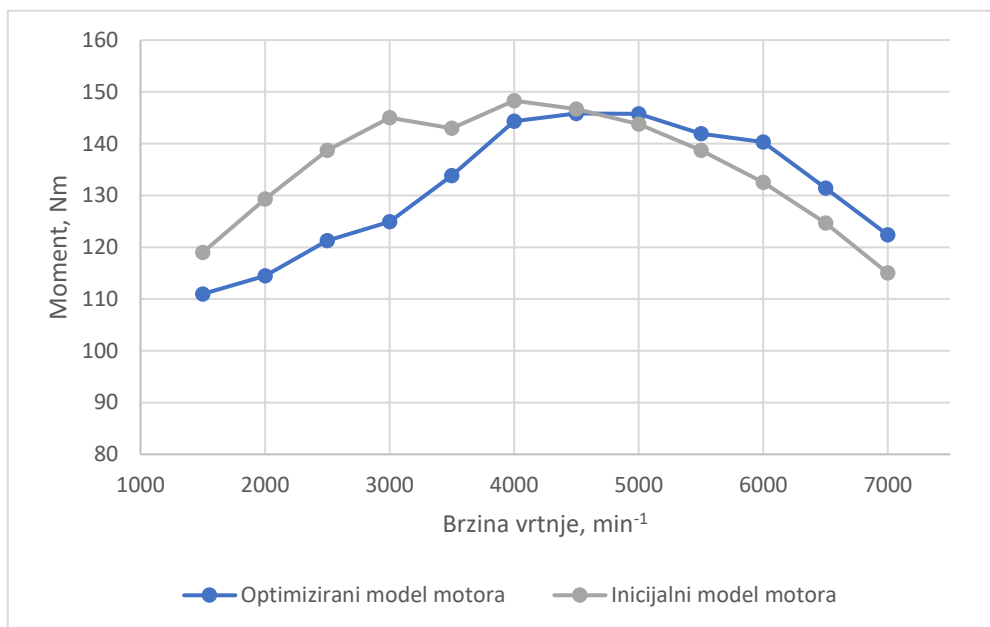
**Slika 4.41. Usporedba krivulja stupnja punjenja za 4-1 i 4-2-1**

Iz usporedbe krivulja stupnja punjenja  $\lambda$  može se uočiti značajna razlika u prvoj polovici raspona brzine vrtnje. Ta je razlika odgovorna za veći moment konfiguracije 4-2-1 pri nižim brzinama vrtnje.

Na temelju svega prikazanog, uzimajući u obzir glavni kriterij, odnosno maksimalnu površinu ispod krivulje momenta, te ostale prikazane usporedbe, odlučeno je da je najpovoljnija konfiguracija ispušnog sustava konfiguracija 4-2-1 s promjerom 30 mm, dužinom prvih cijevi 550 mm i dužinom drugih cijevi 160 mm.

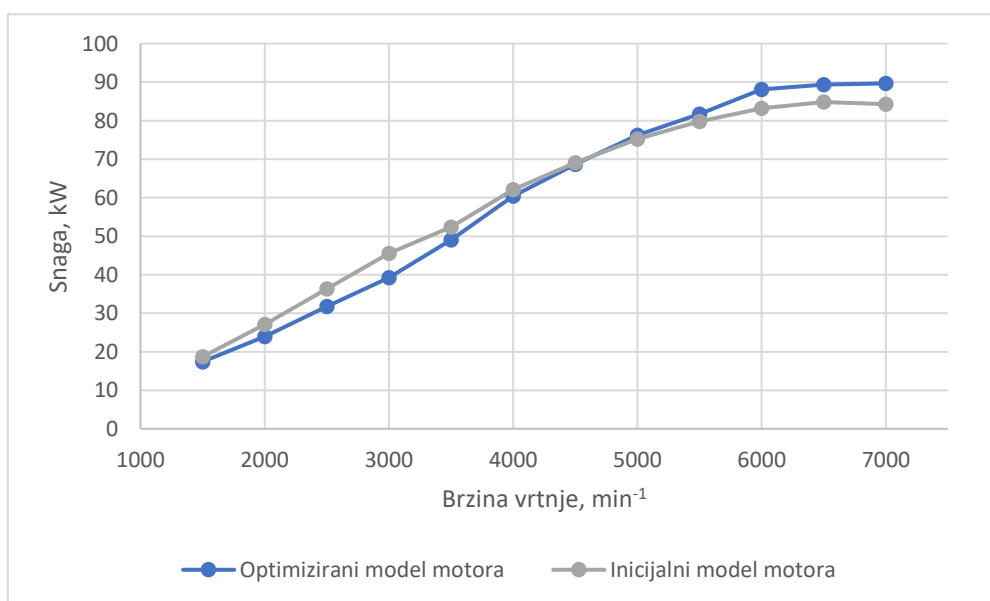
## 5. USPOREDBA OPTIMIZIRANOG USISNOG I ISPUŠNOG SUSTAVA SA INICIJALNIM MODELOM MOTORA

Usporedbom dijagrama momenta, snage i stupnja punjenja inicijalnog modela motora s modelom s optimiziranim usisnim i ispušnim sustavom bit će prikazan ostvareni napredak u performansama motora.



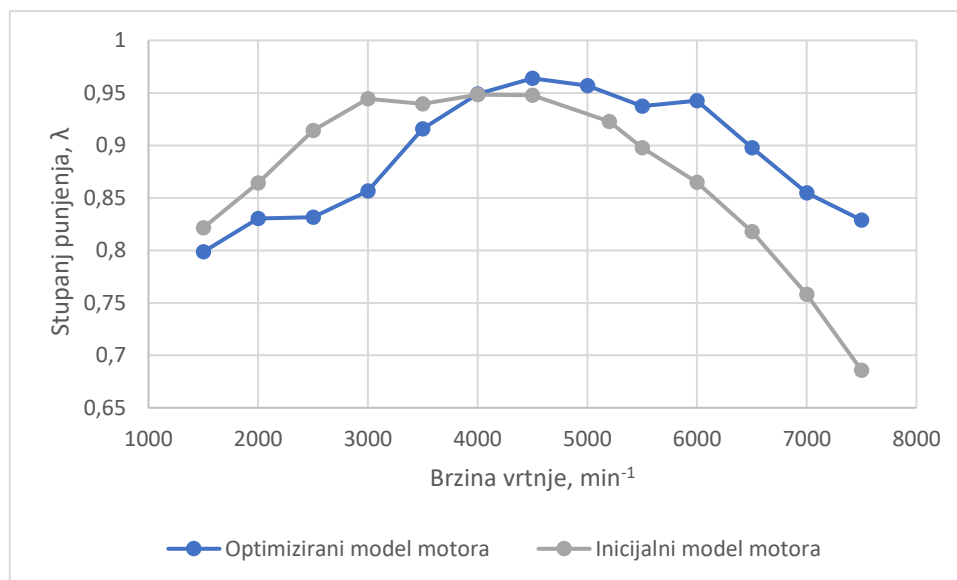
**Slika 5.1. Usporedba krivulja momenta inicijalnog i optimiziranog modela motora**

Maksimalni moment inicijalnog modela motora iznosi 148,3 Nm pri 4000 min<sup>-1</sup>. Maksimalni moment optimiziranog modela motora iznosi 145,84 Nm pri 4500 min<sup>-1</sup> što je smanjenje za 1,7%.



**Slika 5.2. Usporedba krivulja snage inicijalnog i optimiziranog modela motora**

Maksimalna snaga inicijalnog modela motora iznosi 84,84 kW pri 6500 min<sup>-1</sup>. Maksimalna snaga optimiziranog modela motora iznosi 89,67 kW pri 7000 min<sup>-1</sup> što je povećanje za 5,7%.



**Slika 5.3. Usporedba krivulja stupnja punjenja inicijalnog i optimiziranog modela motora**

Kao što je vidljivo na slici 5.3., s optimiziranim modelom motora se, na žalost, nije uspjelo postići rezonantno nabijanje motora jer je stupanj punjenja manji od 1. Bez obzira na to, vidi se značajno povećanje pri višim brzinama vrtnje što rezultira većim momentom te većom maksimalnom snagom.

Moment motora je nakon optimizacije ostao praktički nepromijenjen, odnosno smanjio se za 1,7 % ali se vidi kako je zamaknut u desno, tj. ostvaruje se na višim brzinama vrtnje što za posljedicu ima povećanje snage. U odnosu na inicijalni model, optimirani model proizvodi 5,7% više snage što je značajno povećanje uzme li se u obzir da nije bilo preinaka na samom motoru.

Vjerojatno je jedan od razloga nedostatka momenta na nižim brzinama vrtnje i općenito nižih vrijednosti momenta od početnih nedostatak plenuma u usisnom sustavu jer je vidljiv pad momenta nakon promjene usisnog sustava i uklanjanja plenuma.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su detaljno uspoređene različite konfiguracije usisnih i ispušnih sustava kako bi se pronašla konfiguracija koja donosi najveće povećanje snage motora. U početku je napravljen kratki pregled tehničkog pravilnika te je dan opis prednosti i nedostataka vozila koje je predmet ovog rada. Prikazani su osnovni principi koji se koriste kod optimizacije usisnih i ispušnih sustava na motorima s unutarnjim izgaranjem.

U programskom paketu AVL BOOST napravljen je vrlo detaljan simulacijski model motora čija je krivulja momenta potom usklađena s krivuljom momenta stvarnog motora. Napravljene su opsežne simulacije različitih usisnih i ispušnih sustava te je prikazana analiza dobivenih podataka i odabir najbolje konfiguracije usisnog sustava, najbolje 4-1 konfiguracije ispušnog sustava te najbolje 4-2-1 konfiguracije ispušnog sustava. Nakon toga, prikazana je usporedba najboljih konfiguracija ispuha te je odabrana najbolja kombinacija usisnog i ispušnog sustava. Rezultat je povećanje snage motora za 5,7% te smanjenje momenta za 1,7%. Uz značajno povećanje snage rezultat izvedenih preinaka je mnogo brža reakcija motora na otvaranje zaklopke što je za natjecateljsko vozilo vrlo poželjno.

Kod preinaka na usisnom sustavu došlo je do gubitka snage i momenta te se može zaključiti kako je za daljnje poboljšanje usisnog sustava potrebno ugraditi usisni kolektor. Preporuka je da se kod budućih preinaka svakako razmotri ugradnja adekvatnog usisnog kolektora.

Popratna pojava koja se javlja kod ovakvog usisnog sustava je specifičan zvuk koji dolazi iz usisa, iako nema utjecaja na performanse motora to je svakako pozitivno jer pruža još veći užitak svakom ljubitelja automobila.

Nakon napravljenih preinaka i provedenih simulacija možemo zaključiti da je optimizacijom usisnog i ispušnog sustava motora s unutarnjim izgaranjem moguće postići osjetno povećanje snage motora bez ikakvih preinaka na samom motoru. Usisni i ispušni sustav su naizgled vrlo jednostavni sklopovi no uz primjenu znanja iz raznih područja strojarstva mogu značajno utjecati na performanse motora s unutarnjim izgaranjem.

---

**LITERATURA**

- [1] Dodatak A 09 Pravilniku o auto sportovima, Hrvatski auto i karting savez
- [2] Dodatak A11 Pravilniku o auto sportovima, Hrvatski auto i karting savez
- [3] PRIRUČNIK TKAS 2020., Hrvatski auto i karting savez
- [4] Mihalec, I., Kozarac, D., Lulić, Z. : *Motori s unutarnjim izgaranjem*, FSB, Zagreb 2016.
- [5] Trzesniowski, M. : *Rennwagentechnik*, Springer Vieweg, 2014.
- [6] Sjerić, M. : *Novi fizikalni pod-modeli simulacije radnog ciklusa Ottovog motora*, FSB, Zagreb 2014.
- [7] AVL: *Boost Users Guide*, v2013.2

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc