

Simulacija rada modificiranog Dieselovog motora

Pikutić, Alan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:933635>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alan Pikutić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Alan Pikutić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Momiru Sjeriću na pruženoj pomoći tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se roditeljima, Mireli i Draženu, na pruženoj podršci tijekom studiranja, prijatelju Mladenu na ustupljenom vozilu korištenom u radu, te na kraju, kolegama s Fakulteta uz koje su pauze između predavanja brže prolazile.

Alan Pikutić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Alan Pikutić**

JMBAG: 0035220064

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija rada modificiranog Dieselovog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of modified Diesel engine**

Opis zadatka:

Povećanje maksimalne snage Dieselovog motora obično se provodi izmjenama u upravljačkim mapama rada motora kojima se utječe na tlak prednabijanja, trenutak početka i duljinu otvorenosti visokotlačne brizgaljke. Izmjenama i nadogradnjom uređaja na motoru kao što su turbopunjač, visokotlačna pumpa goriva i brizgaljke moguće je dodatno utjecati na značajke rada motora. U okviru ovog diplomskog rada potrebno je eksperimentalno i simulacijski analizirati promjene u značajkama rada motora kod postupka nadogradnje konstrukcijskih elemenata i upravljačkih mapa za rad Dieselovog motora.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Napraviti pregled značajki odabranog motora i vozila.
- Izraditi termodinamički model motora u programskom paketu AVL Boost™.
- Provesti simulaciju rada originalnog motora te usporediti značajke rada s izmjenama.
- Opisati provedbu izmjene ili nadogradnje uređaja motora (visokotlačna pumpa goriva, brizgaljke, turbopunjač, itd.) ključnih za povećanje snage te obuhvaćanje tih izmjena u simulacijskom modelu motora.
- Izmjeriti maksimalnu efektivnu snagu modificiranog motora.
- Provesti simulaciju rada modificiranog motora te usporediti značajke rada s izmjenama.
- Izmjeriti ubrzanje vozila od 0 do 100 km/h za originalni i modificirani motor.
- Primjenom simulacijskog paketa AVL Boost™ izračunati ubrzanje vozila i rezultate usporediti s izmjenama.
- Analizirati ostvarene rezultate i izvesti zaključke.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

26. rujna 2024.

28. studeni 2024.

5., 6. i 9.12.2024.

Zadatak zadao:

M. Sjerić
Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

Tanja Jurčević Lulić
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. Uvod.....	1
2. Pregled značajki odabranog motora i vozila.....	2
3. Termodinamički model u AVL Boost-u.....	5
4. Simulacija rada originalnog motora i usporedba s izmjerenim vrijednostima.....	10
4.1 Usporedba simulirane i izmjerene efektivne snage i momenta originalnog motora.....	14
5. Izmjene uređaja motora vozila.....	20
5.1 Visokotlačna pumpa goriva.....	20
5.2 Visokotlačne brizgaljke goriva.....	25
5.3 Turbopunjač.....	29
5.4 Senzor tlaka ispušnog kolektora.....	34
5.5 Izmjene radnih mapa računala motora.....	36
6. Simulacija rada modificiranog motora i usporedba s izmjerenim vrijednostima.....	40
6.1 Usporedba simulirane i izmjerene efektivne snage i momenta modificiranog motora.....	44
7. Simulacija i mjerenje ubrzanja vozila.....	48
7.1 Mjerenja ubrzanja stvarnog vozila.....	48
7.2 Simulacija ubrzanja vozila u simulacijskom paketu AVL Boost.....	51
7.3 Usporedba simulacije ubrzanja s izmjerima na stvarnom vozilu.....	55
8. Analiza ostvarenih rezultata.....	56
9. Zaključak.....	62

10. LITERATURA64

POPIS SLIKA

Slika 1. Render odabranog motora [3]	2
Slika 2. Prikaz odabranog modela vozila [4]	4
Slika 3. Prikaz termodinamičkog modela u AVL Boost-u	5
Slika 4. Radna mapa zadanih vrijednosti tlaka nabijanja zraka	6
Slika 5. Radna mapa početka ubrizgavanja goriva	7
Slika 6. Tlak ubrizgavanja goriva tijekom procesa ubrizgavanja kod Common Rail sustava [12]	8
Slika 7. Primjer .dat datoteke za AVL MCC model izgaranja	9
Slika 8. Radna mapa zahtjevanog tlaka ubrizgavanja goriva	9
Slika 9. Podaci zadani Case Explorerom za originalni motor	9
Slika 10. Tlak usisnog zraka u simulaciji originalnog motora	10
Slika 11. Maseni protok zraka u simulaciji originalnog motora	11
Slika 12. Točka početka ubrizgavanja goriva u simulaciji originalnog motora	12
Slika 13. Mase ubrizgavanja goriva po ciklusu u simulaciji originalnog motora	12
Slika 14. Vrijednosti faktora pretička zraka u simulaciji originalnog motora	13
Slika 15. Vrijednosti temperature ispušnih plinova u simulaciji originalnog motora	14
Slika 16. DynoRoad uređaj za mjerenje efektivna snage i momenta [8]	14
Slika 17. Prikaz montiranog DynoRoad uređaja	15
Slika 18. Sučelje aplikacije za zadavanje parametra mjerenja	15
Slika 19. Dijaloški okvir za zadavanje prijenosnog omjera	16
Slika 20. Konačni rezultati mjerenja snage stvarnog vozila	18
Slika 21. Usporedba efektivne snage originalnog motora	19
Slika 22. Usporedba efektivnog momenta originalnog motora	19
Slika 23. Mapa maksimalnog protoka goriva originalne CP4 visokotlačne pumpe goriva	21
Slika 24. Presjek Bosch CP4 visokotlačne pumpe goriva [3]	21
Slika 25. Vrijednosti protoka i prijenosnog omjera CP4 visokotlačne pumpe goriva	22
Slika 26. Presjek Bosch CP3 visokotlačne pumpe goriva [2]	22

Slika 27. Dodatna zupčana pumpa kod CP3 visokotlačne pumpe goriva [2].....	23
Slika 28. Vrijednosti protoka i prijenosnog omjera CP3 visokotlačne pumpe goriva.....	23
Slika 29. Kalibracija regulatora protoka goriva za CP4 (gore) i CP3 pumpu.....	24
Slika 30. Kalibracijska mapa originalnih visokotlačnih brizgaljki.....	25
Slika 31. Kalibracijska mapa protočnijih visokotlačnih brizgaljki.....	26
Slika 32. Skica presjeka originalnih visokotlačnih brizgaljki [1].....	26
Slika 33. Primjer originalne i protočnije visokotlačne brizgaljke.....	28
Slika 34. Linearizacije senzora tlaka goriva.....	28
Slika 35. Kalibracijska mapa regulatora tlaka goriva.....	29
Slika 36. Render Garrett GTB2260VK turbopunjača [1].....	29
Slika 37. Skica dimenzija turbopunjača [10].....	30
Slika 38. Usporedba stvarnih turbopunjača, strana kompresora.....	31
Slika 39. Usporedba stvarnih turbopunjača, strana turbine.....	31
Slika 40. Linarizacija senzora tlaka zraka.....	32
Slika 41. Linearizacija senzora masenog protoka zraka.....	32
Slika 42. Senzori masenog protoka zraka.....	33
Slika 43. Izmijenjena radna mapa zahtjeva tlaka nabijanja zraka.....	33
Slika 44. Linearizacija senzora tlaka ispušnih plinova.....	34
Slika 45. Pločica s prihvatom za crijevo senzora tlaka ispušnih plinova.....	34
Slika 46. Senzor tlaka ispušnih plinova s crijevom i konektorom.....	35
Slika 47. Vrijednosti tlaka ispušnih plinova za modificirani motor.....	35
Slika 48. Originalna radna mapa kuta počeka glavnog ubrizgavanja goriva.....	36
Slika 49. Izmijenjena radna mapa kuta početka glavnog ubrizgavanja goriva.....	37
Slika 50. Originalna radna mapa preračunavanja ind. momenta u potrebnu masu ubrizgavanja.....	37
Slika 51. Izmijenjena radna mapa preračunavanja ind. momenta u potrebnu masu ubrizgavanja.....	38
Slika 52. Originalna radna mapa ograničenja indiciranog momenta motora.....	38
Slika 53. Izmijenjena radna mapa ograničenja indiciranog momenta motora.....	39
Slika 54. Podaci zadani Case Explorerom za modificirani motor.....	40

Slika 55. Tlak zraka u usisnom kolektoru kod modificiranog motora.....	40
Slika 56. Maseni protok zraka kod modificiranog motora	41
Slika 57. Točka početka ubrizgavanja goriva u simulaciji modificiranog motora	41
Slika 58. Mase ubrizgavanja goriva po ciklusu u simulaciji modificiranog motora.....	42
Slika 59. Vrijednosti faktora pretička zraka u simulaciji modificiranog motora.....	43
Slika 60. Vrijednosti temperature ispušnih plinova u simulaciji modificiranog motora	43
Slika 61. Konačni rezultati mjerenja snage stvarnog vozila. modificirani motor.....	45
Slika 62. Usporedba vrijednosti efektivne snage i momenta za originalni i modificirani motor	46
Slika 63. Efektivna snaga simulacije modificiranog motora	47
Slika 64. Efektivni moment simulacije modificiranog motora.....	47
Slika 65. Mjerenje ubrzanja originalnog vozila, 0-100km/h	48
Slika 66. Mjerenje ubrzanja modificiranog vozila, 0-100 km/h	49
Slika 67. Mjerenje ubrzanja originalnog vozila, 100-200 km/h	49
Slika 68. Mjerenje ubrzanja modificiranog vozila, 100-200 km/h	50
Slika 69. Prikaz termodinamičkog modela motora s vozilom i ECU-om u AVL Boost-u.....	51
Slika 70. Dijaloški okvir modula <i>Vehicle</i>	52
Slika 71. Željena brzina tijekom simulacije ubrzanja 0-100 km/h	52
Slika 72. Željena brzina tijekom simulacije ubrzanja 100-200 km/h	53
Slika 73. Rezultati simulacije ubrzanja 0-100 km/h, originalni motor	53
Slika 74. Rezultati simulacije ubrzanja 100-200 km/h, originalni motor	54
Slika 75. Rezultati simulacije ubrzanja 0-100 km/h, modificirani motor.....	54
Slika 76. Rezultati simulacije ubrzanja 100-200 km/h, modificirani motor.....	55
Slika 77. Usporedba srednjeg indiciranog tlaka originalnog i modificiranog motora.....	56
Slika 78. Usporedba vršne temperature izgaranja originalnog i modificiranog motora	57
Slika 79. Usporedba vršnog tlaka izgaranja za originalni i modificirani motor	57
Slika 80. Usporedba trajanja izgaranja za originalni i modicirani motor	58
Slika 81. Usporedba emisije čađe za originalni i modificirani motor.....	58
Slika 82. Usporedba emisije dušikovih oksida originalnog i modificiranog motora.....	59

Slika 83. Usporedba emisije ugljikovog monoksida originalnog i modificiranog motora60
Slika 84. Usporedba specifične potrošnje goriva originalnog i modificiranog motora60
Slika 85. Usporedba efektivnog stupnja djelovanja originalnog i modificiranog motora61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podaci odabranog motora	2
Tablica 2. Tehnički podaci odabranog vozila	3
Tablica 3. Log mase ubrizganog goriva i tlaka nabijanja, originalni motor	6
Tablica 4. Log točke početka i trajanja ubrizgavanja goriva	8
Tablica 5. Rezultati mjerenja snage stvarnog vozila, originalni motor	17
Tablica 6. Usporedba utjecaja brizgaljki na rad motora	27
Tablica 7. Usporedba dimenzija turbopunjača.....	30
Tablica 8. Rezultati mjerenja snage stvarnog vozila, modificirani motor	44
Tablica 9. Usporedba izmjerenih i simuliranih vremena ubrzanja	55
Tablica 10. Izračun specifične emisije dušikovih oksida.....	59

SAŽETAK

Zadatak rada je eksperimentalno i simulacijski analizirati promjene u značajkama rada Dieselog motora uslijed izmjene radnih uređaja motora i upravljačkih mapa računala motora u svrhu povećanja efektivne snage motora. Simulacijska analiza rada motora rađena je u programskom paketu AVL Boost. Eksperimentalna analiza rađena je na stvarnom vozilu pomoću mjernih uređaja opisanih u radu. Prvi korak rada izrada je termodinamičkog modela originalnog motora u programskom paketu AVL Boost. Termodinamički model rađen je po uzoru na stvarni model i karakteristike motora u modelu detaljno su uspoređene s karakteristikama stvarnog motora. Nakon toga je provedena izmjena određenih radnih uređaja motora, kako na stvarnom motoru, tako i na termodinamičkom modelu motora. Rezultati dobiveni simulacijom i mjerenjem ponovno su uspoređeni. Dodatno, provedena je i simulacijska i eksperimentalna usporedba ubrzanja vozila prije i nakon modifikacija motora. Na kraju su analizirani dobiveni rezultati.

Ključne riječi: Diesel motor, upravljanje motorom s unutarnjim izgaranjem, simulacija, radni uređaji motora, AVL Boost

SUMMARY

The objective of this study is to experimentally and through simulations analyze the changes in the operating characteristics of a Diesel engine resulting from modifications to engine components and engine control unit maps, with the aim of increasing the engine's effective power output. The simulation analysis was conducted using the AVL Boost software. Experimental analysis was performed on a real vehicle using measurement devices described in the study.

The first step of the study involved developing a thermodynamic model of the original engine in the AVL Boost software. The thermodynamic model was created based on the real engine, with its characteristics being thoroughly compared to those of the actual engine. Subsequently, certain engine components were modified, both on the real engine and in the engine model. The results obtained through simulation and measurement were then compared again.

Additionally, a comparative analysis of vehicle acceleration before and after the engine modifications was conducted, both through simulations and experimentally. Finally, the obtained results were analyzed.

Keywords: Diesel engine, internal combustion engine management, simulation, internal combustion engine devices, AVL Boost

1. Uvod

Kako se motor s unutarnjim izgaranjem sastoji od više radnih uređaja koji su upravljani od strane računala motora, karakteristike motora mogu se izmijeniti izmjenom radnih uređaja. Primjerice, masa goriva koja će moći biti izgorena u svakom ciklusu ovisit će o masi zraka koja je dobavljena motoru koja će kod motora s turbo-prednabijanjem, kakav je odabran i u radu, ovisiti o karakteristikama turbopunjača, najveći protok goriva koju će se moći dobiti motoru ovisiti će od karakteristikama dobavnih i visokotlačnih pumpi goriva, dok će najveća masa goriva koja se može ubrizgati po ciklusu ovisiti o protočnosti brizgaljki goriva. Cilj rada je modifikacija radnih uređaja i upravljačkih mapa računala Dieselog motora s ciljem povećanja efektivne snage. Rad se sastoji od nekoliko dijelova koji se ugrubo mogu podijeliti na:

- izrada simulacijskog modela originalnog motora i usporedbe sa stvarnim izmjerima
- odabir i izmjena potrebnih radnih uređaja motora
- izrada simulacijskog modela modificiranog motora i usporedbe sa stvarnim izmjerima
- simulacija ubrzanja vozila s originalnim i modificiranim motorom te usporedba s izmjerima stvarnog vozila
- analiza dobivenih rezultata i zaključak

Literatura korištena u radu dobrim dijelom se sastojala od materijala preuzetih od strane proizvođača vozila, proizvođača radnih uređaja te materijala korištenih na ranijim kolegijima na Fakultetu.

2. Pregled značajki odabranog motora i vozila

Motor odabran za rad je trolitreni V6 Diesel motor proizvođača Volkswagen. Radi se o motoru iz Volkswagenove EA896 obitelji motora koji se ugrađivao u razne modele Volkswagen grupacije (Volkswagen, Audi, Porsche...). Izvorno je predstavljen 2003. godine kao Euro4 motor, a temeljito je redizajniran 2007. godine kako bi zadovoljio strože ekološke norme. U ovom radu rađeno je na redizajniranoj inačici motora koja zadovoljava ekološku normu Euro5 i prikazana je na slici 1.



Slika 1. Render odabranog motora [3]

Tehnički podaci odabranog motora navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Tehnički podaci odabranog motora

Kod motora	CEXA
Broj i raspored cilindara	6 cilindara, V konfiguracija
Radni obujam motora	2967 cm ³
Broj ventila po cilindru	4
Provrta cilindra	83 mm

Hod klipa	91,4 mm
Kompresijski omjer	16.8:1
Redoslijed paljenja	1-4-3-6-2-5
Ekološka norma (EU)	Euro 5
Prednabijanje	Turbopunjač - Garrett GTB2260VK
Visokotlačna pumpa goriva	Bosch CP4R65
Najveća efektivna snaga	176 kW / 239 KS @ 3500-4000 min ⁻¹
Najveći efektivni moment	500 Nm @ 1500-3000 min ⁻¹
Upravljanje motorom	Bosch EDC17CP04

Motor je ugrađen u vozilo Volkswagen Phaeton. Radi se o dosad jedinom Volkswagenovom modelu F-segmenta predstavljenim 2001. godine. Proizvodio se do 2016. godine, a tijekom svog životnog vijeka pojavio se u četiri blaga redizajna. Prvi model nosio je oznaku GP0 (njem. *große Produktpflege*), a zadnji redizajn GP4. Vozilo korišteno u ovom radu proizvedeno je 2010. godine, a radi se o GP2 modelu. Tablica 2. prikazuje tehničke podatke odabranog vozila.

Tablica 2. Tehnički podaci odabranog vozila

Masa praznog vozila	2325 kg
Duljina	5059 mm
Širina	1903 mm
Visina	1450 mm
Vrsta pogona	Stalni pogon na sva četiri kotača
Koeficijent otpora zraka, c_w	0,31
Površina poprečnog presjeka vozila	2,36 m ²
Dimenzije pneumatika	235/55 R17
Dinamički polumjer kotača	0,3348 m
Mjenjač	6 brzina, automatski
Prijenosni omjer 1. stupnja prijenosa	4,16
Prijenosni omjer 2. stupnja prijenosa	2,33

Prijenosni omjer 3. stupnja prijenosa	1,51
Prijenosni omjer 4. stupnja prijenosa	1,14
Prijenosni omjer 5. stupnja prijenosa	0,87
Prijenosni omjer 6. stupnja prijenosa	0,69
Omjer osovine redukcije	3,28
Ubrzanje vozila 0-100 km/h	8,3 s
Najveća brzina vozila	237 km/h

Slika 2. prikazuje odabrani model vozila.

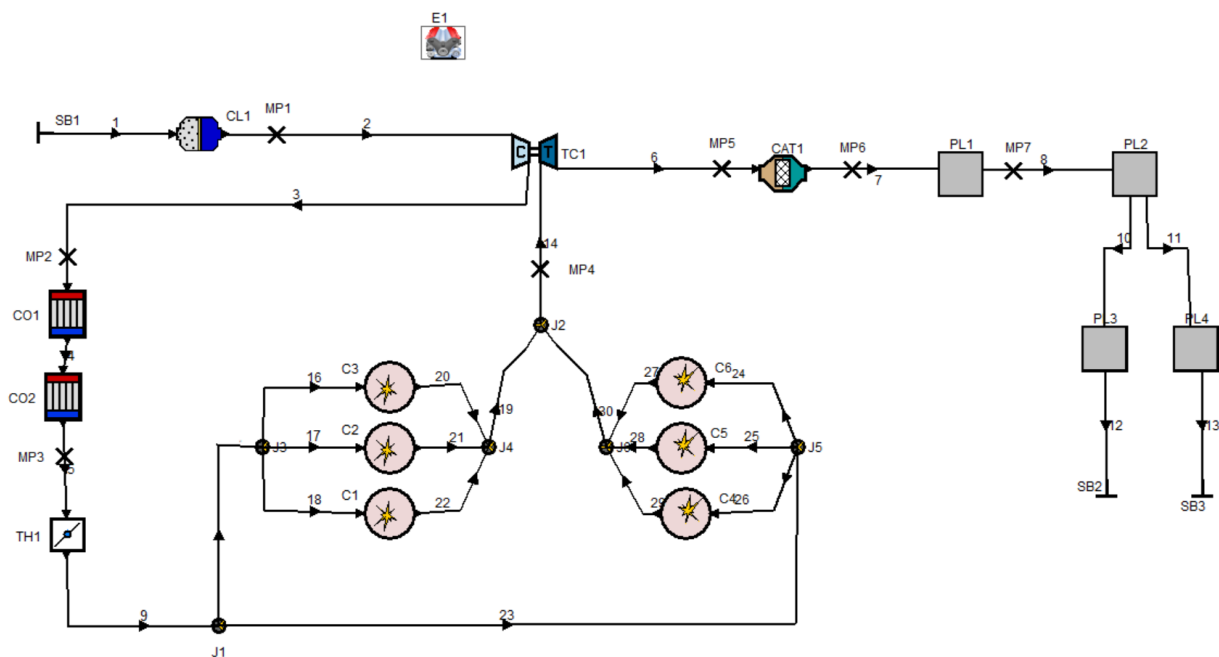


Slika 2. Prikaz odabranog modela vozila [4]

3. Termodinamički model u AVL Boost-u

Prvi korak rada izrada je termodinamičkog modela odabranog motora u programskom paketu AVL Boost. Termodinamički model napravljen je po uzoru na stvaran motor, promjeri i duljine usisnih i ispušnih cijevi izmjerene su na stvarnom motoru i unesene u model. Također, radni parametri motora zadani u modelu u Boostu-u uzeti su direktno iz stvarnih radnih mapa računala motora i potvrđeni su logiranjem i mjerenjem na stvarnom motoru, što je detaljnije prikazano u idućem poglavlju.

Termodinamički model sastoji se od: motora, šest cilindara, filtera zraka, turbopunjača, dva hladnjaka stlačenog zraka, zaklopke, katalizatora i četiri plenuma koji u modelu preuzimaju ulogu prigušivača zvuka. Slika 3. prikazuje shemu termodinamičkog modela u AVL Boost-u. Mjerne točke u modelu približno su postavljene na mjesta gdje su na stvarnom motoru postavljeni određeni senzori.



Slika 3. Prikaz termodinamičkog modela u AVL Boost-u

Parametri rada motora u simulaciji uzeti su iz radnih mapa stvarnog računala motora i iz podataka dobivenih pomoću OBD logova provedenih na stvarnom vozilu. Radne mape računala motora sadržane su u internoj flash memoriji računala. U ovom slučaju radi se o Boschovom računalu EDC17CP04 s TC1796 internom flash memorijom. Sadržaj dotične memorije očitana je pomoću SAE-J2534 sučelja [7], koji je kasnije u radu korišten i za flashanje

memorije. Radne mape su u sadržaju flash memorije pronađene, a kasnije i uređivane pomoću programskog paketa WinOLS [5].

Tlak nabijanja zraka, odn. *pressure ratio* kompresora u termodinamičkom modelu AVL Boost zadan pomoću Case Explorera za svaku radnu točku koja je bila simulirana. Podaci su prvotno izvučeni iz radne mape zadanih vrijednosti tlaka zraka u usisnom kolektoru u ovisnosti o količini ubrizganog goriva i brzini vrtnje motora prikazanoj na slici 4., a kasnije su uređene vrijednostima izmjenjenim na vozilu, odn. logovima. Logovi su prikupljeni koristeći programski paket VehiCAL Logger [6] koji je s vozilom bio povezan pomoću SAE-J2534 sučelja [7].

rpm	mg/hub	2.5000	4.0000	10.0000	15.0000	20.0000	25.0000	35.0000	45.0000	55.0000	65.0000
1000.000	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1300.00	1400.00	1400.00	1400.00
1250.000	1000.00	1048.00	1077.00	1106.00	1198.00	1260.00	1444.00	1630.00	2000.00	2000.00	2000.00
1400.000	1000.00	1048.00	1077.00	1106.00	1210.00	1355.00	1550.00	1829.00	2100.00	2100.00	2100.00
1500.000	1000.00	1062.00	1103.00	1146.00	1225.00	1420.00	1672.00	1978.00	2250.00	2250.00	2250.00
1750.000	1000.00	1079.00	1140.00	1196.00	1279.00	1493.00	1800.00	2095.00	2350.00	2350.00	2350.00
2000.000	1000.00	1094.00	1163.00	1225.00	1340.00	1607.00	1932.00	2193.00	2450.00	2450.00	2450.00
2250.000	1000.00	1130.00	1221.00	1279.00	1420.00	1752.00	2049.00	2330.00	2495.00	2500.00	2500.00
2500.000	1000.00	1162.00	1255.00	1332.00	1506.00	1844.00	2104.00	2330.00	2495.00	2500.00	2500.00
2600.000	1021.00	1179.00	1270.00	1363.00	1542.00	1852.00	2098.00	2334.00	2495.00	2500.00	2500.00
2750.000	1109.00	1215.00	1309.00	1389.00	1559.00	1850.00	2092.00	2338.00	2498.00	2500.00	2500.00
3250.000	1218.00	1281.00	1369.00	1448.00	1587.00	1839.00	2063.00	2284.00	2500.00	2500.00	2500.00
3750.000	1332.00	1397.00	1447.00	1515.00	1633.00	1836.00	2031.00	2150.00	2475.00	2500.00	2500.00
4250.000	1420.00	1460.00	1510.00	1582.00	1689.00	1830.00	2018.00	2146.00	2440.00	2440.00	2440.00
4500.000	1450.00	1481.00	1531.00	1605.00	1720.00	1825.00	2016.00	2146.00	2400.00	2400.00	2400.00
4750.000	1462.00	1512.00	1569.00	1657.00	1763.00	1840.00	2012.00	2146.00	2370.00	2370.00	2370.00
5000.000	1450.00	1520.00	1569.00	1680.00	1780.00	1817.00	2003.00	2146.00	2370.00	2370.00	2370.00

Slika 4. Radna mapa zadanih vrijednosti tlaka nabijanja zraka

Vrijednosti mase ubrizganog goriva po cilindru i tlaka nabijanja zraka izmjerene na stvarnom vozilu prikazuje tablica 3.

Tablica 3. Log mase ubrizganog goriva i tlaka nabijanja, originalni motor

Brzina vrtnje	Masa ubrizgavanja goriva po ciklusu	Tlak zraka u usisnom kolektoru
min ⁻¹	mg/ciklus	hPa
1499	26,64	1107
1752	63,65	1951
2003	62,6	2393
2258,5	62,55	2509
2507,5	62,92	2482
2754,5	64,82	2481
2996	65,72	2501
3246	65,89	2510
3501,5	62,55	2483
3750,5	61,01	2439

4001	59,04	2419
4249,5	56,62	2385
4424,5	52,43	2340

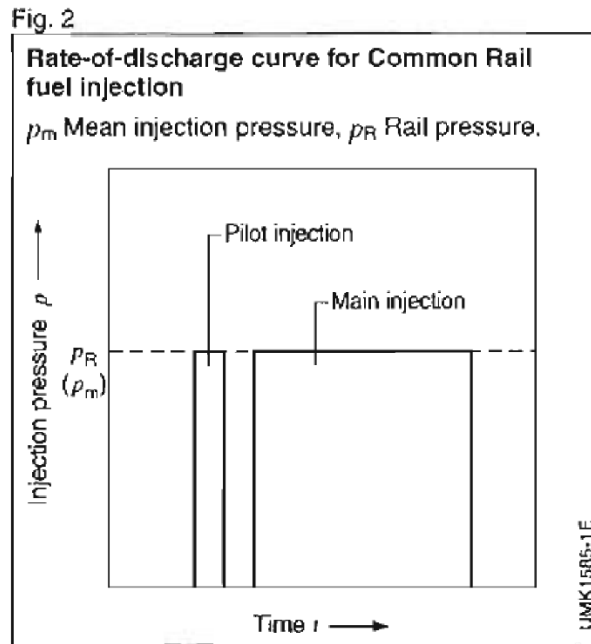
Točke početka i kraja ubrizgavanja goriva zadane su sličnim postupkom. Prvotne vrijednosti u Boost su unesene temeljem radne mape početka ubrizgavanja goriva prikazane na slici 5.

mg/hub	rpm	1250.000	1750.000	2200.000	2750.000	3250.000	3750.000	4250.000	4750.000	5000.000	5150.000
5.0000		1.9775	1.9775	1.9775	6.9653	6.9653	6.9653	7.9761	8.4814	8.4814	8.4814
10.0000		1.9775	1.9775	1.9775	6.9653	6.9653	6.9653	7.9761	9.4482	9.4482	9.4482
15.0000		-0.0220	3.4717	3.9551	6.9653	7.4707	6.9653	8.9648	11.9751	11.9751	11.9751
20.0000		0.9668	0.9668	2.4829	6.9653	8.7671	12.2168	10.6567	16.9629	16.9629	16.9629
25.0000		-0.0220	-0.0220	2.3071	6.9653	8.9648	12.5244	13.0957	17.9736	17.9736	17.9736
30.0000		-0.0220	0.4614	2.6587	9.1406	10.4590	12.6782	14.2822	17.9736	17.9736	17.9736
35.0000		-0.0220	1.4722	3.0103	9.5801	10.4590	12.6782	14.2603	17.9736	22.9614	20.9619
40.0000		0.9668	2.9663	3.3618	9.8657	10.4590	13.5791	15.7324	17.9736	24.9609	20.9619
50.0000		0.0000	3.3838	4.5483	11.0083	12.5024	15.4028	19.9512	25.5322	26.4990	22.5439
55.0000		0.0000	4.9658	6.9873	9.9976	12.7881	16.7071	19.9951	25.5103	27.4658	27.4658

Slika 5. Radna mapa početka ubrizgavanja goriva

Kako bi model izgaranja u Boost-u približno modelirao stvarni motor, potrebno je odrediti točke kraja ubrizgavanja goriva. Poznavajući točku početka u jedinici zakreta KV i vrijeme ubrizgavanja goriva u jedinici vremena, lako je izračunati točku kraja početka izgaranja u jedinici zakreta KV. Kao model izgaranja odabran je AVL MCC model kojemu je potrebno definirati točku početka i kraja ubrizgavanja goriva u jedinici zakreta KV, te faktor ROI (*rate of injection*).

Kako je kod Common Rail sustava ubrizgavanja goriva tlak ubrizgavanja goriva konstantan u tijekom cijele duljine ubrizgavanja, kako je prikazano slici 6. [12], faktor ROI u modelu izračunan je tako da ubrizgavanja goriva tijekom cijelog trajanja ubrizgavanja bude jednakog intenziteta, kako je i glavno ubrizgavanja (*Main injection*) prikazano na slici 6. Faktor ROI u tom slučaju jednak je $1/DOI$ i njegove vrijednosti su uz ostale vrijednosti potrebne za računanje faktora ROI prikazane u tablici 4.

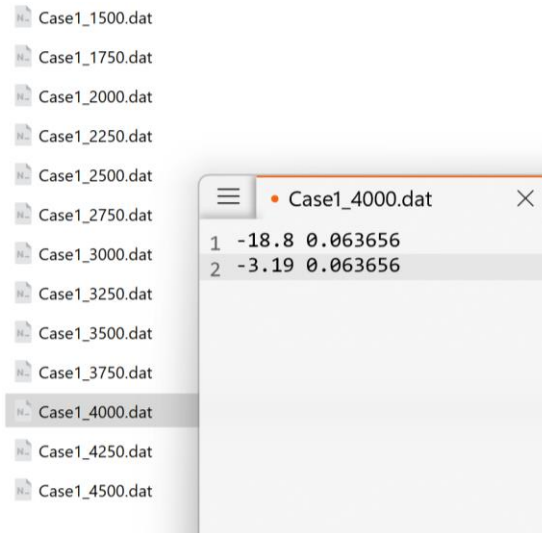


Slika 6. Tlak ubrizgavanja goriva tijekom procesa ubrizgavanja kod Common Rail sustava [12]

Tablica 4. Log točke početka i trajanja ubrizgavanja goriva

Brzina vrtnje	Vrijeme ubrizgavanja goriva	Točka početka ubrizgavanja goriva	Točka kraja ubrizgavanja goriva	Trajanje ubrizgavanja goriva	Faktor AVL ROI
min^{-1}	us	$^{\circ}\text{KV}$	$^{\circ}\text{KV}$	$^{\circ}\text{KV}$	-
1499	435,2	-2,9224	-6,84	3,91	0,255481
1752	848,8	4,5044	-4,42	8,92	0,112075
2003	773,6	6,5039	-2,79	9,30	0,10756
2258,5	709,2	7,7344	-1,88	9,61	0,104054
2507,5	701,6	9,2065	-1,35	10,56	0,094737
2754,5	721,2	10,5029	-1,42	11,92	0,083898
2996	680	11,3818	-0,84	12,22	0,081808
3246	690	12,2827	-1,16	13,44	0,074413
3501,5	646,4	13,9746	0,39	13,58	0,073637
3750,5	654,4	17,2925	2,57	14,73	0,067907
4001	654,4	18,8965	3,19	15,71	0,063656
4249,5	624,4	20,4785	4,56	15,92	0,062813
4424,5	580,8	22,0605	6,64	15,42	0,064857

Vrijednosti izračunate temeljem podataka iz tablice 4. u model su unesene pomoću .dat datoteka. Jedan primjer takve datoteke prikazan je na slici 7. Potrebno je napomenuti da Boost negativne vrijednosti kuta KV uzima kao vrijednosti prije GMT, dok je na stvarnom motoru obrnuto.



Slika 7. Primjer .dat datoteke za AVL MCC model izgaranja

Potrebno je još zadati vrijednosti tlakova ubrizgavanja goriva koje su u model unesene temeljem vrijednosti preuzetih iz radne mape zahtijevanog tlaka ubrizgavanja goriva u ovisnosti o brzini vrtnje motora te mase ubrizganog goriva prikazanoj na slici 8.

Basiskennfeld für den Raildruck-Sollwert, bei Einspr.Charakt. 1 *

mg/hub	rpm	860.000	1000.000	1250.000	1500.000	1750.000	2000.000	2250.000	2400.000	2750.000	3250.000	3750.000	4250.000	4750.000	5000.000
2.5000	300000	340000	450000	500000	530000	560000	590000	610000	635000	695000	740000	780000	800000	800000	800000
5.0000	300000	350000	450000	500000	550000	580000	600000	618000	635000	731700	757000	787900	805000	805000	805000
10.0000	300000	375000	500000	629300	671700	726000	725000	725000	763300	772900	782900	803700	813300	813300	813300
15.0000	325000	395000	525000	666700	756700	850000	845000	848300	838300	850000	850000	850000	908000	908000	908000
17.5000	370000	427500	575000	750000	875000	925000	920000	905000	901700	900000	900000	938500	962700	962700	962700
20.0000	435000	495000	650000	800000	925000	1000000	991700	980000	975000	981700	976700	977000	1034700	1034700	1034700
22.5000	479000	585000	700000	862500	962500	1075000	1065000	1066700	1068300	1099200	1096700	1096500	1126700	1126700	1126700
25.0000	515000	630000	750000	925000	1000000	1150000	1155000	1160000	1163300	1216700	1216700	1216000	1250700	1250700	1250700
30.0000	555000	675000	850000	1037500	1150000	1250000	1265000	1266700	1298300	1386700	1396700	1400000	1450700	1450700	1450700
35.0000	560400	800000	950000	1150000	1250000	1400000	1396700	1413300	1411700	1516700	1668000	1700000	1750000	1800000	1800000
40.0000	550000	800000	1020000	1150000	1250000	1400000	1393300	1425000	1460000	1615000	1700000	1800000	1800000	1800000	1800000
45.0000	550000	800000	1020000	1150000	1250000	1400000	1394000	1438500	1544000	1700000	1800000	1800000	1800000	1800000	1800000
50.0000	550000	800000	1020000	1150000	1250000	1400000	1550000	1550000	1585000	1700000	1800000	1800000	1800000	1800000	1800000
55.0000	550000	800000	1020000	1160000	1250000	1400000	1550000	1550000	1585000	1700000	1800000	1800000	1800000	1800000	1800000
65.0000	550000	800000	1020000	1160000	1250000	1400000	1550000	1550000	1602000	1799000	1800000	1800000	1800000	1800000	1800000

Slika 8. Radna mapa zahtijevanog tlaka ubrizgavanja goriva

Case Set u Case Exploreru, temeljem kojih je model zadan, na kraju izgleda kako je prikazano na slici 9.

Case Set 1	Eng_spd	lnj_qty	Prs_ratio	Piston_wall_temp	Liner_Temp_TDC	Liner_Temp_BTC	Calibration_factor	Rail_pSetPoint	AVLMCC_ROI
	rpm	mg	[-]	degC	degC	degC	[-]	bar	
1500	1500	28	1.1	250	220	125	1	1100	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_1500.dat
1750	1750	62	1.95	250	220	125	1	1270	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_1750.dat
2000	2000	63	2.4	250	220	125	1	1400	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_2000.dat
2250	2250	63	2.5	260	230	125	1	1550	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_2250.dat
2500	2500	64	2.5	270	230	130	1.05	1570	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_2500.dat
2750	2750	64	2.5	270	240	135	1.05	1600	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_2750.dat
3000	3000	65	2.5	280	240	135	1.1	1680	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_3000.dat
3250	3250	65	2.5	280	240	145	1.1	1740	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_3250.dat
3500	3500	63	2.5	290	260	145	1.1	1800	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_3500.dat
3750	3750	61	2.45	290	260	145	1.07	1800	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_3750.dat
4000	4000	59	2.4	290	230	140	1.07	1800	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_4000.dat
4250	4250	56	2.35	290	270	150	1.02	1800	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_4250.dat
4500	4500	52	2.2	290	270	150	1.02	1800	AVLMCC_ROI\CaseSet1\Case1_4500.dat

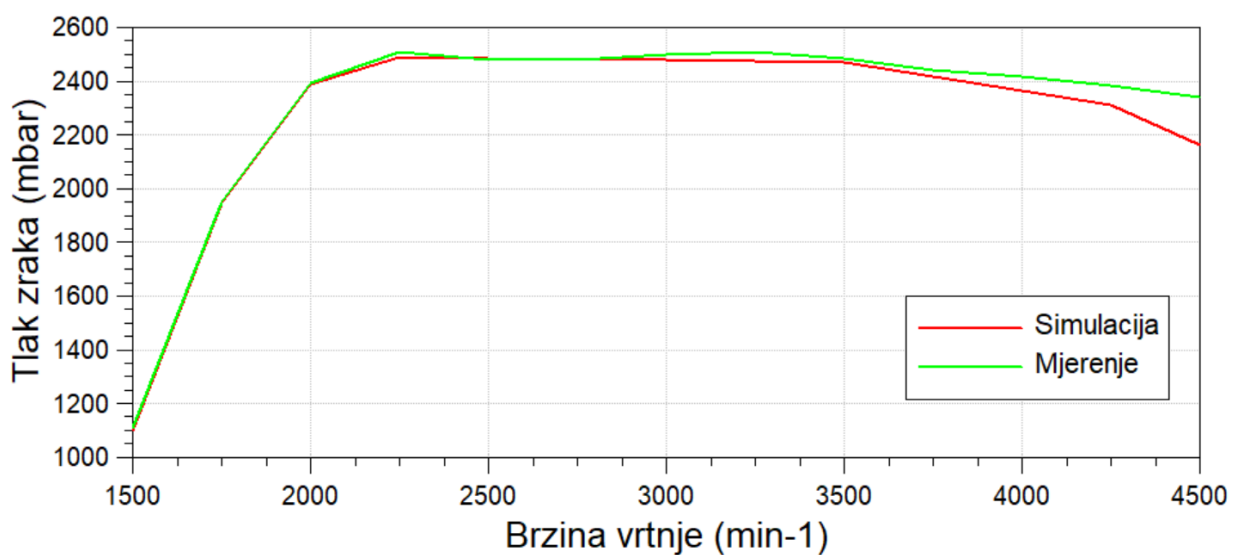
Slika 9. Podaci zadani Case Explorerom za originalni motor

4. Simulacija rada originalnog motora i usporedba s izmjerenim vrijednostima

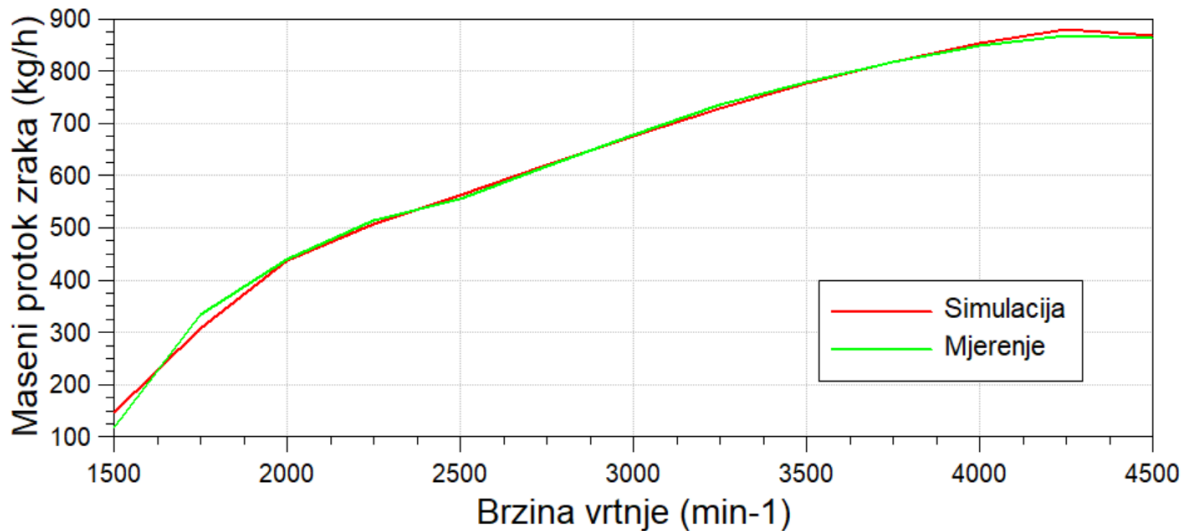
U programskom paketu AVL Boost provedena je simulacija rada kroz cijeli raspon brzine vrtnje motora. Kako je model napravljen po uzoru na stvarni motor, ukoliko model vjerodostojno modelira stvarni motor, dobiveni podaci moraju biti približno jednaki onima izmjerenima na stvarnom motoru.

Pomoću Impress Charta (dodatak programskom paketu AVL Bost) dobivene su vrijednosti masenog protoka zraka, tlaka zraka u usisnom kolektoru, mase ubrizganog goriva, točke početka ubrizgavanja goriva, faktora pretička zraka, temperature ispušnih plinova na ulazu u turbopunjač, efektivne snage i efektivnog momenta. Kako Impress Chart podatke prikazuje u obliku dijagrama, tako su oni prikazani i na idućim slikama.

Analiza podataka započeta je podacima vezanima za zrak koji ulazi u motor, točnije tlakom zraka u usisnog zraka mjerenim na MP3, te protokom zraka mjerenim na MP1. MP3 približno je postavljen na mjesto MAP senzora na stvarnom motoru, a MP1 na mjesto MAF senzora. Podaci dobiveni na ove dvije mjerne točke prikazani su na slici 10 i slici 11. krivuljama crvene boje, dok su zelenim krivuljama na istim dijagramima prikazane veličine izmjerene na stvarnom vozilu. Istim bojama označene su krivulje u svim dijagramima u radu.



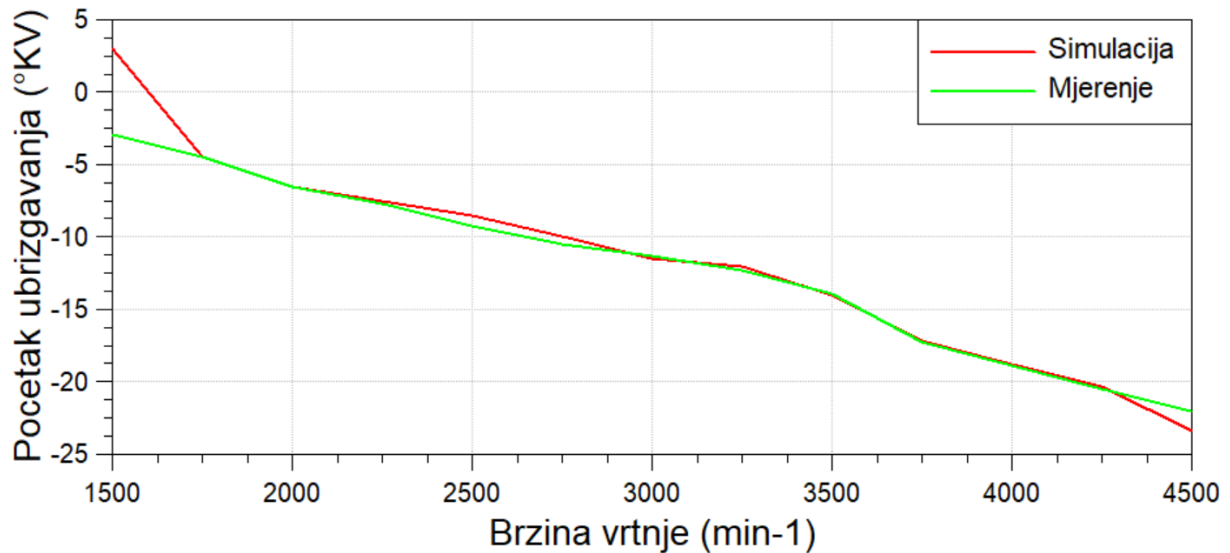
Slika 10. Tlak usisnog zraka u simulaciji originalnog motora



Slika 11. Maseni protok zraka u simulaciji originalnog motora

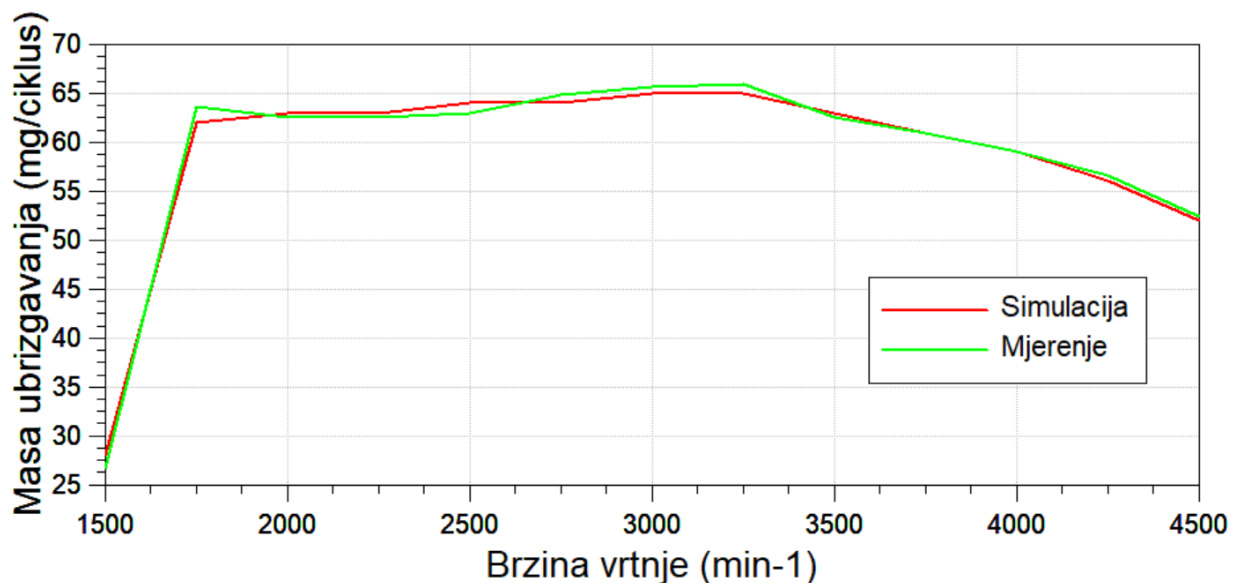
Kako je omjer tlakova na kompresoru (*pressure ratio*) za svaku radnu točku zadan pomoću Case Explorera, bilo je i očekivano da će vrijednosti tlaka zraka biti slične onima na stvarnom motoru. Međutim, maseni protok zraka nije zadan u modelu, nego on ovisi i o tlaku nabijanja i o volumetričkoj efikasnosti modeliranog motora. Kako su njegove vrijednosti i dalje slične stvarnim, zaključuje se da model vjerno simulira protok zraka kroz motor. Manje odstupanje vidljivo je na radnoj točki 4500 min⁻¹, gdje je tlak zraka u stvarnom motoru nešto veći nego kod modeliranog, ali kako na tim brzinama vrtnje motoru već počinje padati efektivna snaga, ovo odstupanje neće predstavljati problem.

Kako su mase ubrizganog goriva i točke početka ubrizgavanja direktno zadane preko Case Explorera, očekivano je da će model u ovom pogledu vjerno pratiti stvaran motor. Vrijednosti točke početka ubrizgavanja u simulaciji originalnog motora prikazane su na slici 12., a vrijednosti mase ubrizganog goriva po ciklusu na slici 13.



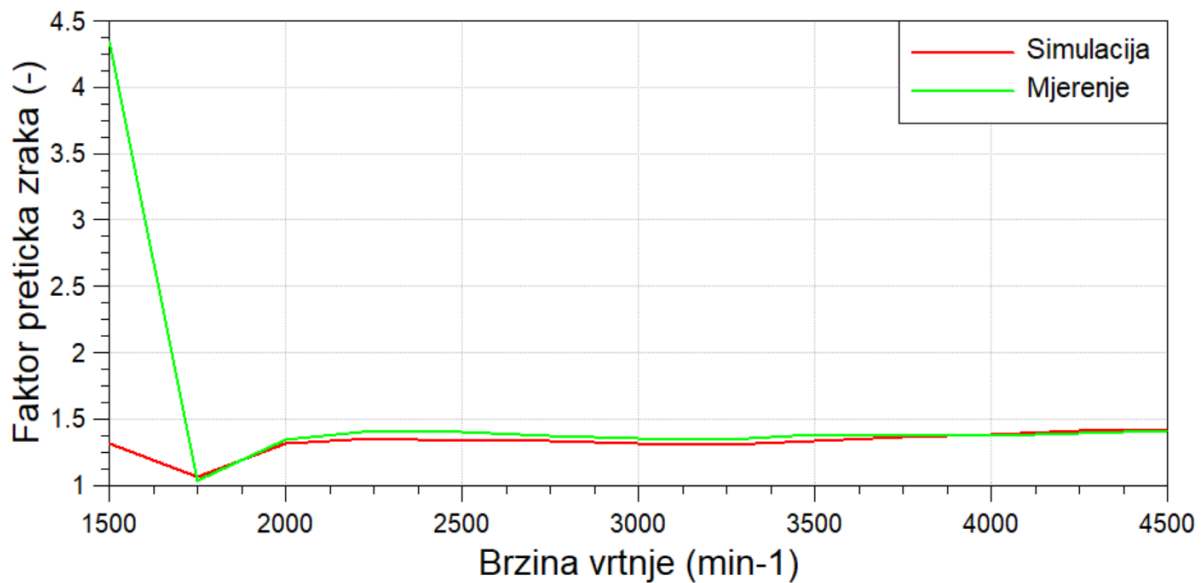
Slika 12. Točka početka ubrizgavanja goriva u simulaciji originalnog motora

Kako se krivulje na slici 12. i slici 13. podudaraju cijelim rasponom brzine vrtnje motora, zaključuje se da model ispravno simulira točke ubrizgavanje i količinu ubrizganog goriva. Manja razlika vidi se kod kuta početka ubrizgavanja za radnu točku 1500 min^{-1} , ali kako se radi o radnoj točki s najmanjom efektivnom snagom, ovo ne predstavlja problem za nastavak rada. Kako u Impress Chartu nije moguće dobiti podatak o duljini trajanja ubrizgavanja, nego samo o duljini trajanja izgaranja, nije bilo moguće usporediti duljine trajanja ubrizgavanja. Međutim, kako su duljine trajanja ubrizgavanja definirane u AVL MCC modelu, zaključuje se da i one ispravno simuliraju stvarni motor.



Slika 13. Mase ubrizgavanja goriva po ciklusu u simulaciji originalnog motora

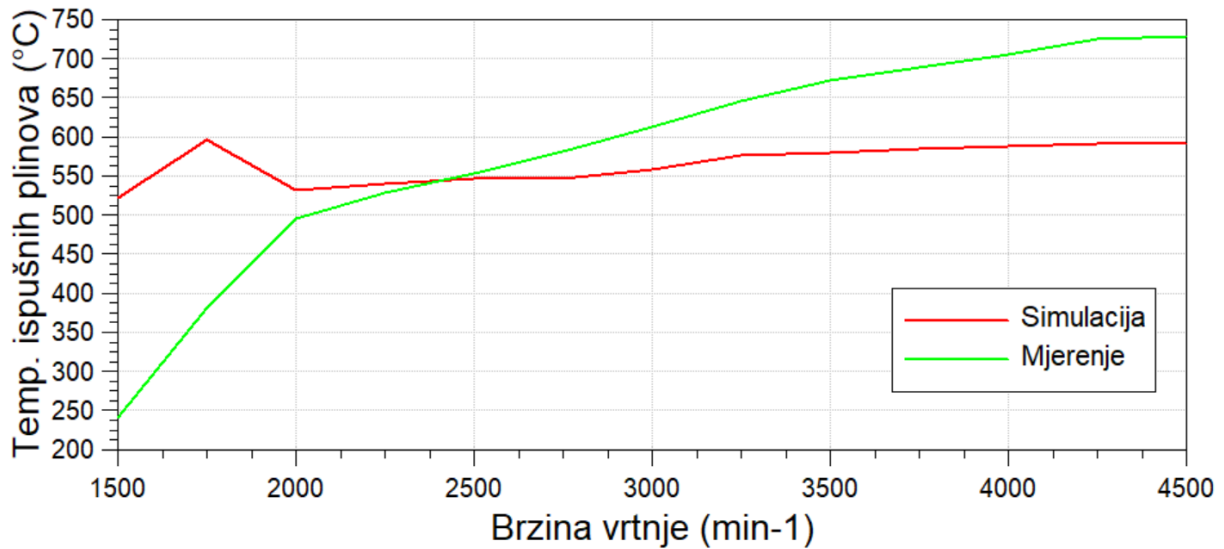
Od logiranih vrijednosti ostalo je još usporediti one za faktor pretička zraka i temperature ispušnih plinova. Temperatura ispušnih plinova mjerena je na MP4 koji je približno postavljen na mjesto gdje je postavljen senzor temperature ispušnih plinova na ulazu u turbo punjač. Uspoređivanjem vrijednosti krivulja sa slike 14. vidljivo je da se vrijednosti faktora pretička zraka približno podudaraju, osim vrijednosti za 1500 min^{-1} gdje stvari motor radi sa siromašnijom smjesom goriva i zraka. Međutim, kako za okvire ovoga rada veću težinu nose vrijednosti oko 4000 min^{-1} , gdje motor daje najveću efektivnu snagu, ova razlike ne predstavlja problem za daljnje simulacije u radu.



Slika 14. Vrijednosti faktora pretička zraka u simulaciji originalnog motora

Slika 15. pokazuje vrijednosti temperature ispušnih plinova na MP4. Vidljivo je da vrijednosti dobivene simulacijom pokazuju linearni trend rasta porastom brzine vrtnje motora. Veliki skok na 1750 min^{-1} može se protumačiti osjetno bogatijom smjesom goriva i zraka u toj radnoj točki. Kako se bogatijim smjesama u Diesel motoru ostvaruju veće temperature ispušnih plinova, Boost-u je vjerojatno to bio bitniji faktor prilikom izračuna temperature. Međutim, linearni trend rasta na stvarnom motoru počinje od osjetno nižih do osjetno viših temperatura nego u simulaciji. Ovo se može pripisati nepoznavanju svih tehničkih podataka motora, kao što su točan dijagram podizaja ventila, ali i točnih vrijednosti temperatura temeljem kojih Boost računa prijenos topline. Radi se o vrijednosti temperatura stijenke klipa, cilindra i glave motora koje su zadane temeljem iskustvenih vrijednosti. Obzirom na tu činjenicu, model nije dalje dorađivan kako bi i temperature ispušnih plinova vjerno pratile stvarni motor. Također, zbog nepoznavanja točnih mapa kompresora i turbine turbopunjača, u modelu je korišten

pojednostavljeni (*Simplified model*) turbopunjača što je također jedan od mogućih uzroka navedenih razlika.



Slika 15. Vrijednosti temperature ispušnih plinova u simulaciji originalnog motora

4.1 Usporedba simulirane i izmjerene efektivne snage i momenta originalnog motora

Mjerenje efektivne snage i efektivnog momenta na stvarnom vozilu odrađeno je uređajem DynoRoad talijanske tvrtke Magicmotorsport [8] prikanom na slici 16. Radi se o uređaju koji pomoću akceleracije vozila tijekom vožnje na punom opterećenju može izmjeriti efektivnu snagu i moment motora.



Slika 16. DynoRoad uređaj za mjerenje efektivna snage i momenta [8]

Uređaj se montira na jedan od vijaka kotača vozila kako je prikazano slikom 17.



Slika 17. Prikaz montiranog DynoRoad uređaja

Uređaj se pomoću Bluetooth bežične razmjene podataka komunicira s Android/iOS uređajem na kojem je instalirana aplikacija uređaja. Aplikacija služi za zadavanje parametara mjerenja koji su uređaju potrebni kako bi napravio mjerenje snage. Parametri potrebni za mjerenje su: norma pomoću koje uređaj računa mehaničke gubitke između kotača i koljenastog vratila, masa vozila prilikom mjerenja te dimenzija pneumatika. Jedno od sučelja aplikacije pomoću kojeg se zadaju navedeni parametri prikazano je na slici 18.

NORMALIZATION

DIN 70020 SAE J1349 EWG 80/1269 NONE

VEHICLE WEIGHT PRESSURE TEMP.

2425 KG 999 hPa 20 °C

TIRE SIZE

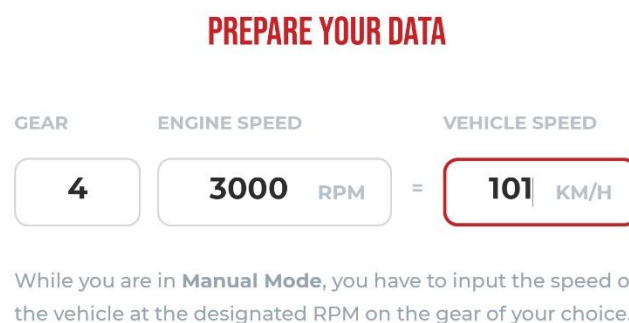
235 / 55 R 17

Slika 18. Sučelje aplikacije za zadavanje parametra mjerenja

U samom uređaju prikazanom na slici 16. nalazi se akcelerometar koji mjeri broj okretaja kotača. Temeljem podataka prikazanih na slici 18. i brzine vrtnje kotača uređaju je poznata brzina kretanja vozila. Unesena je masa vozila od 2425 kg koja je nešto veća od deklarirane i napisane u tablici 2. zbog dvojice putnika u vozilu, te dodatnog tereta koji je u trenutku mjerenja bio u vozilu (rezervi kotač, oprema korištena za mjerenje i logiranje).

Prilikom ubrzanja vozila, uređaj mjeri njegovo ubrzanje. Obzirom da je uređaju tada poznata i masa i akceleracija vozila, uređaj može izračunati snagu vozila na kotačima. Dodaju li se tome iznosi mehaničkih gubitaka između kotača i koljenastog vratila te otpora vožnje, koje se prema odabranoj normi mjeri tako da se vozilo nakon mjerenja pusti da usporava u praznom hodu, dolazi se do iznosa efektivne snage motora.

Uređaju je potrebno još, u stupnju prijenosa u kojem se vrši mjerenje, dati informaciju o brzini vozila na određenoj brzini vrtnje motora. Za vozilo u radu za mjerenje je odabran četvrti stupanj prijenosa u kojem vozilo pri brzini vrtnje motora od 3000 min^{-1} ostvaruje brzinu kretanja od 101 km/h. Ovaj korak nužan je kako bi uređaj mogao napraviti dijagram efektivne snage i momenta u odnosu na brzinu vrtnje motora, obzirom da je uređaju poznata samo brzina kretanja vozila, ne i brzina vrtnje motora. Drugim riječima, uređaj na ovaj način dobije informaciju o prijenosnom omjeru između motora i kotača za stupanj prijenosa u kojemu se vrši mjerenje. Dijaloški okvir pomoću kojeg se uređaju zadaje ovaj parametar prikazan je na slici 19.



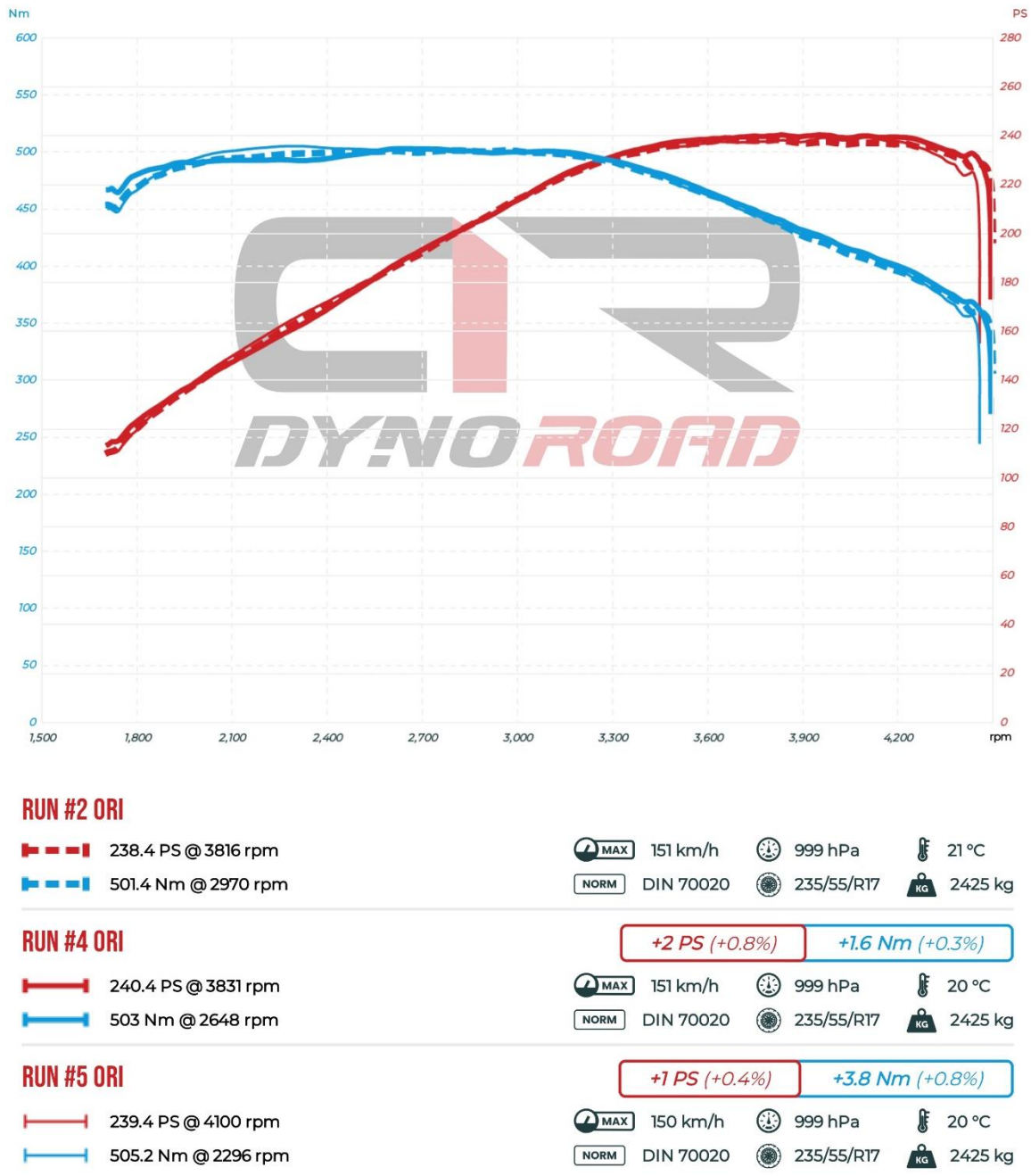
Slika 19. Dijaloški okvir za zadavanje prijenosnog omjera

Napravljeno je ukupno 5 mjerenja čiji su rezultati prikazani u tablici 5. Mjerenja koja su rezultirala najvećom i najmanjom efektivnom snagom neće se uzimati u obzir (siva pozadina u tablici), kako bi se dobila što točnija brojka.

Tablica 5. Rezultati mjerenja snage stvarnog vozila, originalni motor

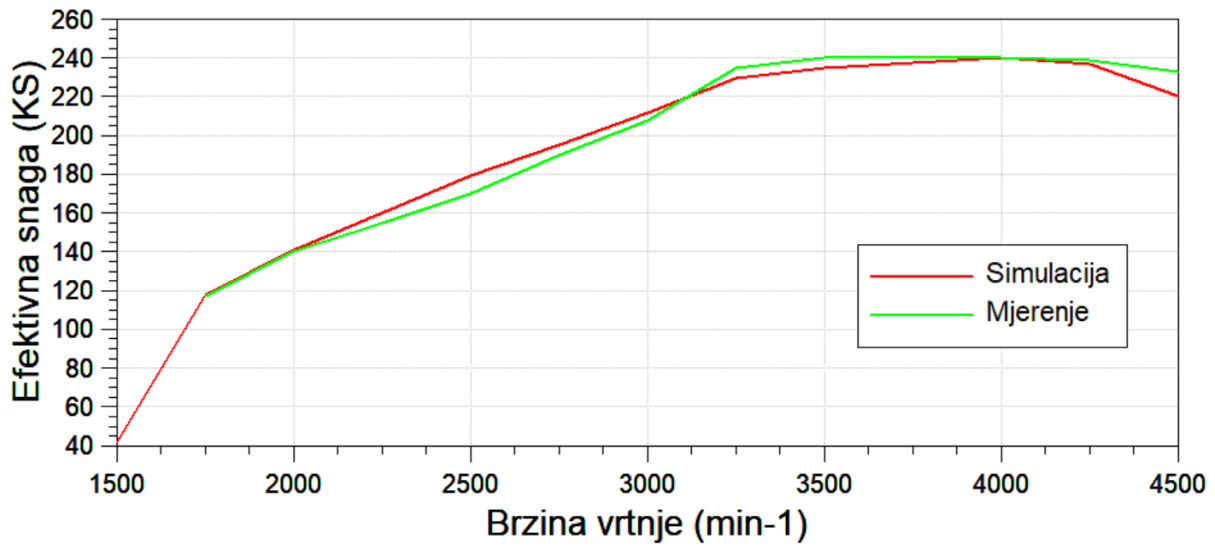
Broj mjerenja	Maksimalna efektivna snaga	Maksimalni efektivni okretni moment
#1	244 KS @ 3739 min-1	510 Nm @ 2560 min-1
#2	238 KS @ 3816 min-1	501 Nm @ 2970 min-1
#3	236 KS @ 4225 min-1	507 Nm @ 2249 min-1
#4	240 KS @ 3831 min-1	503 Nm @ 2648 min-1
#5	239 KS @ 4100 min-1	505 Nm @ 2296 min-1

Preostaju tako tri mjerenja od koji se nalaze unutra +/- jednog KS i dva Nm više ili manje od prosjeka mjerenja. Kako se ovdje radi o razlikama manjima od jedan posto, zaključuje se da je mjerenje ispravno, te se time potvrđuju deklarirane i simulirane vrijednosti efektivne snage i efektivnog momenta vozila. Ova tri mjerenja prikazana su dijagramom na slici 20. gdje je vidljivo da se u cijelom rasponu brzine vrtnje motora sva tri mjerenja gotovo poklapaju.

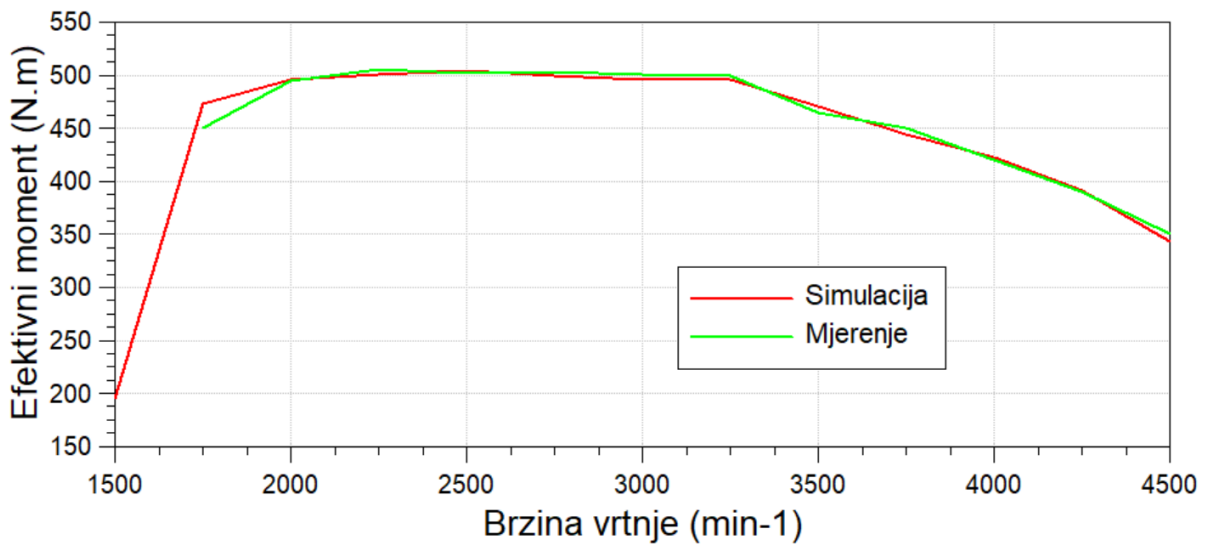


Slika 20. Konačni rezultati mjerenja snage stvarnog vozila

Na kraju poglavlja, ostalo je još usporediti vrijednosti efektivne snage i efektivnog momenta simuliranog i stvarnog motora. Slika 21. prikazuje usporedbu simulirane efektivne snage i efektivne snage izmjerene na stvarnom vozilu. Slika 22. pokazuje isto za efektivni moment. Uočljivo je da se vrijednosti podudaraju s vrijednostima deklariranima za odabrano vozilo navedenim u tablici 1.



Slika 21. Usporedba efektivne snage originalnog motora



Slika 22. Usporedba efektivnog momenta originalnog motora

5. Izmjene uređaja motora vozila

Kako bi se mogli odabrati izmijenjeni radni uređaji, odabran je okvirni cilj modifikacija motora. Umjesto dosadašnje mase ubrizgavanja 59 mg/ciklusu na brzini vrtnje motora od 4000 min⁻¹ modifikacijama želi se omogućiti ubrizgavanje i izgaranje 95 mg/ciklusu. Iz same mase ubrizgavanja i brzine vrtnje moguće je dobiti okvirnu vrijednost potrebnog protoka goriva, protoka zraka i vremena ubrizgavanja goriva.

5.1 Visokotlačna pumpa goriva

Pomoću podatka o brzini vrtnje motora i masi ubrizgavanja goriva, pomoću izraza () moguće je izračunati protok ubrizganog goriva.

$$IV = \frac{IQ}{\rho_{gorivo}} = \frac{95 \text{ mg/ciklusu}}{0,83 \text{ kg/m}^3} = 114,5 \frac{\text{mm}^3}{\text{ciklusu}} \quad (5.1)$$

$$Q_{v,gorivo} = 6 \cdot IV \cdot 2 \cdot \frac{n}{T} = 6 \cdot 114,5 \cdot 2 \cdot \frac{4000}{4 \cdot 60} = 22900 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \quad (5.2)$$

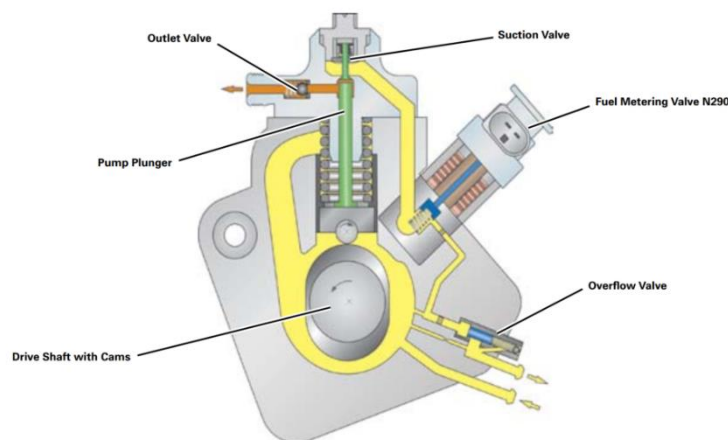
Kako je izračunato u izrazima (5.1)-(5.2) potreban protok ubrizganog goriva iznosi 22 900 mm³/s. Ovdje je uračunan samo protok ubrizganog goriva, bez goriva korištenog za podmazivanje visokotlačne pumpe goriva i visokotlačnih brizgaljki goriva, koje se preko povrata goriva na oba elementa vraća u spremnik goriva, te goriva koje će se vratiti kroz regulator tlaka na visokotlačnom spremniku (*rail*).

Originalni motor ima Bosch CP4R65 visokotlačnu pumpu goriva. Na slici 23. prikazana je mapa u kojoj su spremljeni podaci o njenom maksimalnom protoku te je vidljivo da maksimalni protok kroz visokotlačnu pumpu na brzini vrtnje 4000 min⁻¹ iznosi 25760 mm³/s što je otprilike 10% više od potrebnog protoka ubrizganog goriva. Usporedi li se to s originalnim protokom ubrizganog goriva, gdje se na 4000 min⁻¹ prema podacima iz tablice 3. ubrizgava 59 mg/ciklusu čime se dobiva protok od oko 14200 mm³/s, zaključuje se da maksimalni protok visokotlačne pumpe nije dovoljno veći od potrebnog protoka ubrizgavanja goriva.

Maximaler Durchfluss der Pumpe als Funktion der Drehzahl *										
rpm	200.000	700.000	1000.000	1500.000	2000.000	2500.000	3000.000	3500.000	4000.000	4500.000
	1290.0	4510.0	6440.0	9660.0	12880.0	16100.0	19320.0	22540.0	25760.0	28980.0

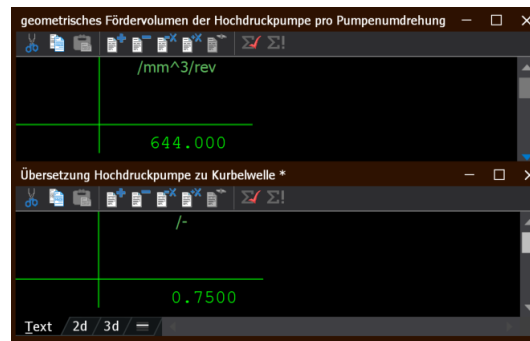
Slika 23. Mapa maksimalnog protoka goriva originalne CP4 visokotlačne pumpe goriva

Originalna CP4R65 visokotlačna pumpa sastoji se od dva klipa koji tlače gorivo, a pogonjeni su bregastim vratilom. Kako nije pronađena skica CP4 pumpe s dva radna klipa, na slici 24. prikazan je presjek CP4 pumpe s jednim klipom preuzet iz [3].



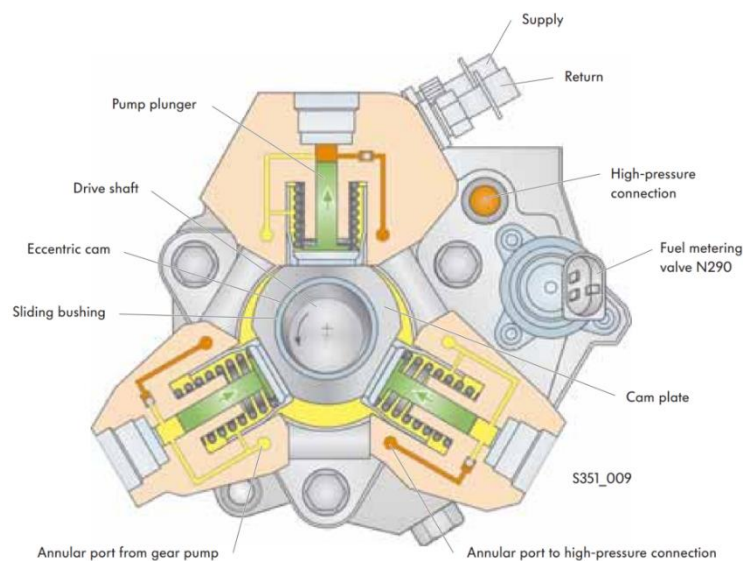
Slika 24. Presjek Bosch CP4 visokotlačne pumpe goriva [3]

Oznaka „R65“ u nazivu visokotlačne pumpe odnosi se na smjer vrtnje (R – *right*) i na približan protok goriva koji pumpa gura jednim svojim okretajem, koji u ovom slučaju iznosi oko 650 mm³/s (broj 65 u oznaci pumpe). Navedena brojka potvrđena je i uvidom u vrijednosti kojima je u računalu motora definiran protok pumpe ostvaren jednim okretajem, te prijenosni omjer između vratila visokotlačne pumpe te radilice prikazane na slici 25.



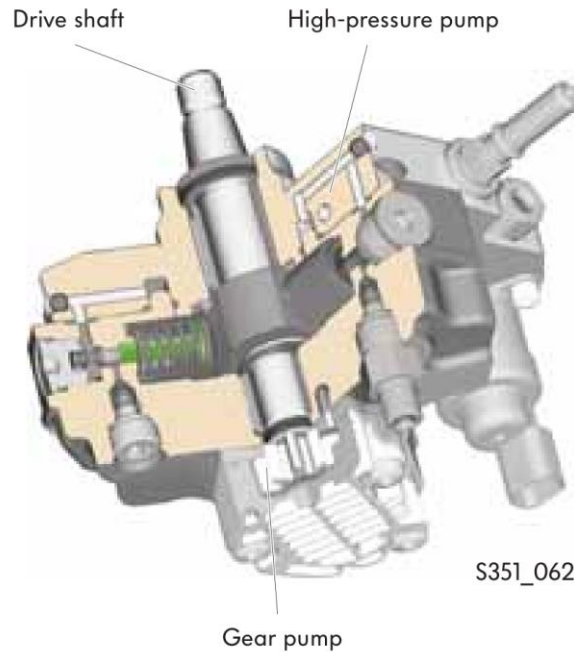
Slika 25. Vrijednosti protoka i prijenosnog omjera CP4 visokotlačne pumpe goriva

Kao zamjena originalne visokotlačne pumpe goriva odabrana je Bosch CP3R90 pumpa. Radi se od pumpe koja je bila ugrađena na ranije verzije (Euro 4) motora spomenute u prvome poglavlju. Za razliku od originalne CP4 pumpe, ova pumpa ima tri radna klipa pogonjena ekscentričnim vratilom s trokutastim izrezom čiji je presjek prikazan na slici 26. Osim samog broja klipova, bitno je uočiti razliku u kontaktu klipa i vratila. Gledano u presjeku, kod CP4 pumpe taj dodir je u točki, dok je kod CP3 pumpe dodir u liniji.



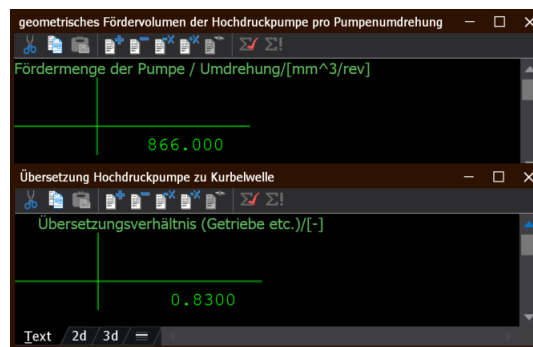
Slika 26. Presjek Bosch CP3 visokotlačne pumpe goriva [2]

Dodatno, jedna od bitnijih razlika CP3 i CP4 pumpe je dodatna zupčana pumpa prikazana na slici 27. koja kod CP3 pumpe služi za povećanje tlaka goriva do 5,5 bara prije samog ulaza u pumpu [2].



Slika 27. Dodatna zupčana pumpa kod CP3 visokotlačne pumpe goriva [2]

Slika 28. prikazuje vrijednosti protoka i prijenosnog omjera CP3 visokotlačne pumpe goriva. Usporede li se navedene vrijednosti s onima sa slike 25., vidljivo je da CP3 pumpa može dati otprilike 35% više protoka goriva. Razlika je vidljiva i u prijenosnom omjeru između vratila visokotlačne pumpe i koljenastog vratila (remenica CP3 pumpe jedan zub je manja od one za CP4 pumpu), zbog koje je brzina vrtnje CP3 pumpe nešto veća od CP4.



Slika 28. Vrijednosti protoka i prijenosnog omjera CP3 visokotlačne pumpe goriva

Na obje pumpe montiran je i regulator protoka goriva čija je zadaća kontrola protoka goriva koji ulazi u pumpu. Kako motor nije stalno pod maksimalnim opterećenjem, nije mu stalno potreban maksimalan protok goriva te se protok goriva može smanjiti s obzirom na opterećenje motora. Smanjenjem protoka smanjuje se i snaga potrebna za pogon visokotlačne pumpe čijim smanjenjem se smanjuje snaga mehaničkih gubitaka motora, a time raste mehanički i efektivni

stupanj djelovanja. Također, smanjeno je i zagrijavanje goriva zbog njegovog tlačenja. Kako regulatori protoka goriva nisu jednaki za obje pumpe, potrebno izmijeniti kalibraciju regulatora (odnos jakosti struje na regulatoru i protoka goriva) u računalu motora. Kalibracije oba regulatora prikazane su na slici 29.

Kennlinie zur Umrechnung von Volumenstrom nach Strom *

mm3/s	-710.0	-700.0	0.0	2350.0	6150.0	11200.0	21000.0	27000.0	31100.0	31260.0
	1750.00	1720.00	1650.00	1550.00	1450.00	1300.00	1000.00	700.00	520.00	0.00

(Sollwert (Volumenstrom) von der Raildruckregelung)/mA

Kennlinie zur Umrechnung von Volumenstrom nach Strom *

mm3/s	-930.0	-920.0	-900.0	0.0	1890.0	9310.0	20720.0	33330.0	34720.0	39830.0
	1700.00	1680.00	1650.00	1620.00	1350.00	1200.00	1000.00	760.00	700.00	0.00

(Sollwert (Volumenstrom) von der Raildruckregelung)/mA

Slika 29. Kalibracija regulatora protoka goriva za CP4 (gore) i CP3 pumpu

Također, jedan od kriterija odabira visokotlačne pumpe je i tlak ubrizgavanja goriva koji je u modificiranom motoru 2200 bar. Originalna CP4 pumpa radi na maksimalnom tlaku od 1800 bar i ne može dati željeni tlak u modificiranom motoru. Ovaj kriterij dodatno je pojašnjen u poglavlju o visokotlačnim brizgaljkama goriva.

5.2 Visokotlačne brizgaljke goriva

Originalne visokotlačne brizgaljke prikazane na slici 32. predviđene su za tlakove ubrizgavanja do 1800 bar i kalibrirane su do volumena ubrizgavanja 90 mm³/ciklusu (približno 75 mg/ciklusu goriva) kako se može vidjeti na slici 30. gdje je prikazana njihova kalibracijska mapa koja se sastoji od vrijednosti vremena otvaranja igle brizgaljke u ovisnosti o trenutnom tlaku ubrizgavanja i volumenu ubrizgavanja.

Kennfeld zur Umrechnung von Einspritzmengen in Ansteuerdauer. Gilt für alle Einspritzungen. *

tiET_MAP auf dem Applikationswerkzeug/us

mm ³ /inj	40.0000	60.0000	80.0000	90.0000
hPa	30.0000	50.0000	70.0000	90.0000
100000	1830.000	1998.400	2206.800	2332.400
200000	1709.200	1869.200	2079.200	2231.200
250000	1431.600	1744.000	1920.000	2046.800
300000	1224.400	1471.600	1708.800	1872.000
400000	950.000	1157.600	1418.400	1605.600
500000	800.800	966.400	1168.400	1412.800
600000	703.600	857.600	1007.200	1227.600
700000	628.000	769.200	930.400	1112.000
800000	571.200	700.800	844.800	988.000
900000	518.800	647.200	774.400	902.800
1000000	485.600	603.600	714.400	831.200
1100000	458.400	564.400	670.000	766.800
1200000	436.400	529.600	628.800	717.600
1400000	400.000	482.400	569.200	651.200
1600000	374.800	452.000	522.000	600.800
1800000	352.400	421.200	488.800	562.000
1900000	346.000	410.000	476.800	548.400

Slika 30. Kalibracijska mapa originalnih visokotlačnih brizgaljki

Visokotlačne brizgaljke odabrane za nadogradnju motora su brizgaljke koje su tvornički ugrađivane na motor 2.0 BiTDI s 176 kW čija je kalibracijska mapa prikazana na slici 27. Odabrane brizgaljke u „svom originalnom“ motoru rade na maksimalnom tlaku od 2500 bar, a kalibrirane su do volumena ubrizgavanja 140 mm³/ciklusu, čime zadovoljavaju kriterij ubrizgavanja 95mg/ciklusu pri tlaku 2200 bar.

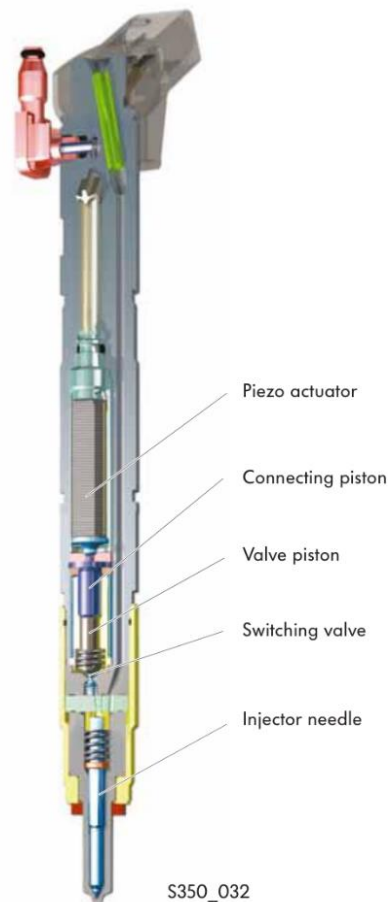
Kennfeld zur Umrechnung von Einspritzmengen in Ansteuerdauer. Gilt für alle Einspritzungen. *

tiET_MAP auf dem Applikationswerkzeug/us

mm ³ /inj	35.0000	48.0000	60.0000	75.0000	90.0000	120.0000	140.0000
hPa							
100000	1722.000	2056.400	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000
200000	1722.000	2056.400	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000
250000	1512.400	1873.200	2090.800	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000
300000	1350.400	1661.200	1930.000	2164.000	2164.000	2164.000	2164.000
400000	1074.000	1332.400	1608.000	1909.200	2164.000	2164.000	2164.000
500000	902.400	1124.000	1324.400	1609.200	1878.800	2164.000	2164.000
600000	796.000	988.400	1153.200	1391.200	1638.400	1803.200	1803.200
700000	708.000	890.400	1035.200	1225.200	1443.200	1803.200	1803.200
800000	651.600	810.400	945.200	1108.000	1291.200	1413.200	1413.200
900000	604.400	745.600	870.000	1030.400	1182.400	1413.200	1413.200
1000000	572.000	693.200	806.400	950.000	1101.200	1387.200	1413.200
1200000	497.200	616.000	716.000	853.200	971.600	1202.000	1202.000
1400000	450.800	560.000	648.000	769.600	882.000	1104.400	1202.000
1600000	410.000	497.600	590.400	695.200	796.000	988.400	1068.000
1900000	362.800	438.800	520.400	613.200	702.400	880.400	985.600
2200000	334.800	394.800	464.800	559.600	638.000	790.400	883.200
2500000	314.000	364.000	424.800	507.600	592.400	747.200	826.400

Slika 31. Kalibracijska mapa protočnijih visokotlačnih brizgaljki

Usporedbom vrijednosti sa slike 30. i slike 31. može se dobiti dojam koliko su odabrane brizgaljke protočnije od originalnih, primjerice - originalnim brizgaljkama je potrebno 774 us za ubrizgavanje 90 mm³/ciklusu pri 1800 bar, dok veće mogu ubrizgati 120 mm³/ciklusu za gotovo jednako vrijeme (790 us) pri 2200 bar.



Slika 32. Skica presjeka originalnih visokotlačnih brizgaljki [1]

U programskom paketu AVL Boost napravljena je usporedba rada motora u radnoj točki 4000 min⁻¹ i masom ubrizgavanja 95 mg/ciklusu s originalnim i protočnijim visokotlačne brizgaljke. Kako je nepoznato vrijeme ubrizgavanja za slučaj 95 mg/ciklusu pri tlaku ubrizgavanja 1800 bar, uzeta je ekstrapolirana vrijednost vremena otvaranja igle koje je preračunata u zakret koljenastog vratile te je dobivena vrijednost od duljine trajanja ubrizgavanja od 21.84° KV. Rezultati usporedbe navedeni su u tablici 6.

Usporedbom simulacija rada motora s jednim i drugim brizgaljkama simulacijskim rezultatima zaključeno je da s jednakom točkom kraja ubrizgavanja, te s jednakim vrijednostima vršnog tlaka i temperature izgaranja, motor s protočnijim brizgaljkama zbog kraćeg vremena ubrizgavanja ima 10 KS veću efektivnu snagu (376,3 KS i 387,0 KS). Ostale vrijednosti navedene u tablici 6. nisu se uvelike mijenjale. Može se zaključiti da se protočnijim brizgaljkama za jednaku masu ubrizgavanja može postići veća efektivna snaga motora ili za jednaku efektivnu snagu manje opterećenje (vršni tlak izgaranja, vršna temperatura izgaranja) motora.

Tablica 6. Usporedba utjecaja brizgaljki na rad motora

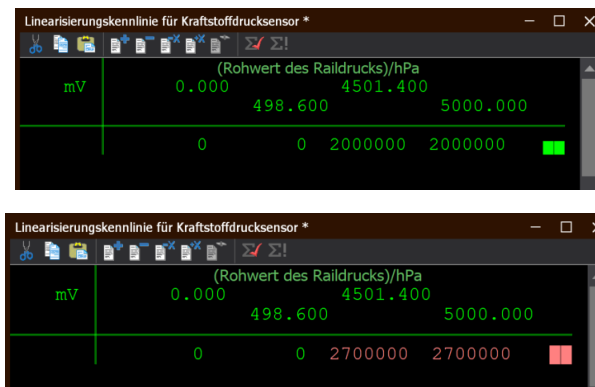
	Originalne brizgaljke	Protočnije brizgaljke
Točka početka ubrizgavanja goriva, °KV	-22,8	-17,8
Točka kraja ubrizgavanja goriva, °KV	-0,96	-0,88
Točka početka izgaranja, °KV	-19,27	-15,16
Duljina trajanja izgaranja, °KV	80,34	67,92
Točka kraja izgaranja, °KV	61,07	52,76
Kašnjenje paljenja, °KV	-3,53	-2,64
IMEP, bar	31,41	32,21
Efektivna snaga, KS	376,3	387,0
Efektivni moment, Nm	660,8	679,5
Faktor pretička zraka, -	1,1853	1,1849
Vršna temp. izgaranja, °C	2308	2315
Vršni tlak izgaranja, bar	401,6	401,8

Na slici 33. prikazana je jedna originalna (gore) i jedna protočnija visokotlačna brizgaljka.



Slika 33. Primjer originalne i protočnije visokotlačne brizgaljke

Osim samih visokotlačnih brizgaljki potrebno je promijeniti i senzor tlaka goriva. Originalni senzor može mjeriti tlakove od najviše 2000 bar, a zamijenjen je senzorom koji može mjeriti do vrijednosti tlakova 2700 bar. Linearizacije, odn. mape pomoću kojih računalo motora može pretvoriti signal senzora - napon - u fizikalnu veličinu – tlak – prikazane su na slici 34.



Slika 34. Linearizacije senzora tlaka goriva

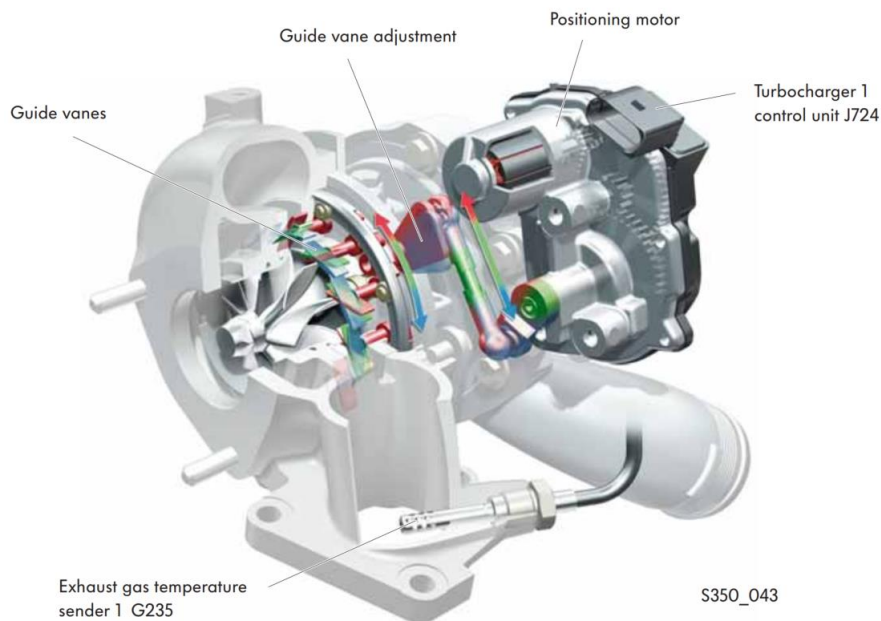
Na kraju, potrebno je još provjeriti može li regulator tlaka uspješno regulirati željeni tlak. Kako je prema radnoj mapi kalibracije originalnog regulatora tlaka prikazanoj na slika 35. vidljivo da je originalni regulator kalibriran do gotovo 2800 bar, regulator nije potrebno mijenjati.

Kennlinie zur Umrechnung von Druck nach Strom *										
(Drucksollwert von der Raildruckregelung für das Druckregelventil)/mA										
hPa	0	138100	277300	622200	1085100	1408400	1734000	2022500	2366700	2792000
	150.00	340.00	487.00	732.00	975.00	1120.00	1264.00	1408.00	1605.00	1850.00

Slika 35. Kalibracijska mapa regulatora tlaka goriva

5.3 Turbopunjač

Kako je izgaranjem osjetno veće mase goriva motoru potrebno osigurati i osjetno veću masu zraka, iduća nadogradnja koja je napravljena je izmjena turbopunjača. Na originalnom motoru ugrađen je Garretov turbopunjač oznake GTB2260VK prikazan na slici 36. koji u originalnom motoru radi s tlakom nabijenog zraka 2,5 bar (apsolutno) i maksimalnim protokom od nešto manje od 900 kg/h kao što je vidljivo iz podataka u tablici 3. Kako se u modificiranom motoru planira ubrizgavati 95 mg/ciklus na 4000 min^{-1} što je oko 50% više nego kod originalnog motora gdje se na istoj brzini vrtnje ubrizgava oko 59 mg/ciklusu, zaključuje se da je potreban turbopunjač koji može osigurati oko 50% veći protok zraka.



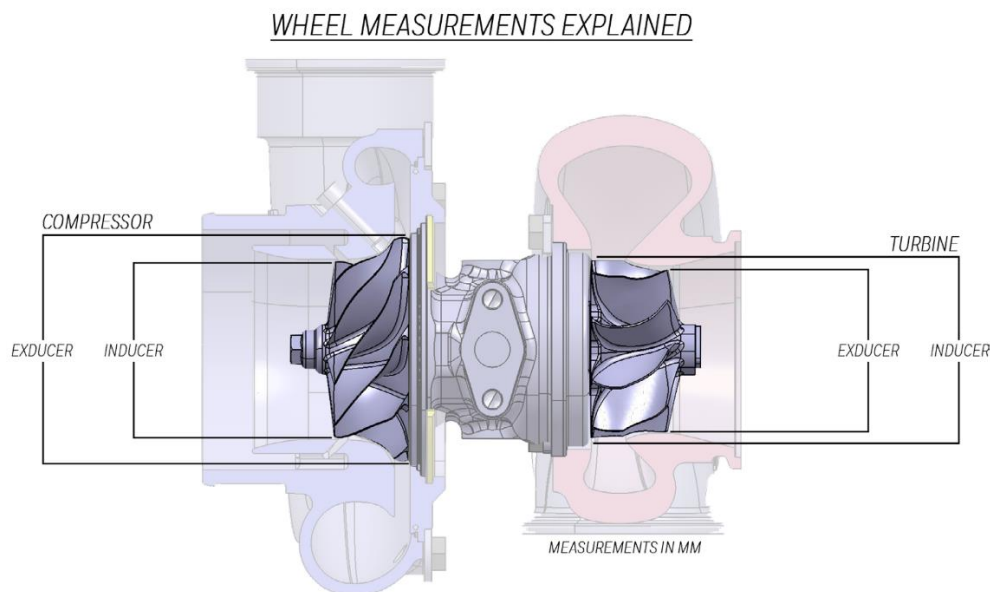
Slika 36. Render Garrett GTB2260VK turbopunjača [1]

Navedeni turbopunjač zamijenjen je Garretovim GTB2565VZK turbopunjačem. Radi se o turbopunjaču s jednakim kućištem kao i originalnim, što je uvelike olakšalo ugradnju, ali s većim impelerima kompresora i turbine te nešto drugačijim ležajem osovine impelera. Poznate dimenzije oba impelera, kao neke od ostalih dimenzija turbopunjača navedene su u tablici 7.,

a na slici 37. prikazana je skica turbopunjača u presjeku s navedenim dimenzijama. *Inducer* se odnosi na promjer impelera na mjestu gdje struja plinova ulazi u impeler, a *exducer* na mjestu gdje struja plinova izlazi iz impelera. Dodatno, za ova turbopunjača izračunat je *trim* odn. dimenzija koja se odnosi na odnos površina *inducera* i *exducera*. *Trim* impelera utječe na performanse impelera promjenom kapaciteta mogućeg protoka zraka. Zadrže li se svi ostali faktori fiksnim, impeler s većim *trimom* moći će strujiti veći protok zraka od onoga s manjim. [13]

Tablica 7. Usporedba dimenzija turbopunjača

	GTB2260VK	GTB2565VZK
Kompresor, <i>exducer</i> , mm	60	65
Kompresor, <i>inducer</i> , mm	45	55
<i>Trim</i> , kompresor, -	56.25	71.6
Turbina, <i>exducer</i> , mm	46	50



Slika 37. Skica dimenzija turbopunjača [10]

Navedene razlike u dimenzijama moguće je i na slici 38. gdje je prikazana je usporedba oba stvarna turbopunjača sa strane kompresora te na slici 39. gdje je prikazan usporedba oba stvarna turbopunjača sa strane turbine.

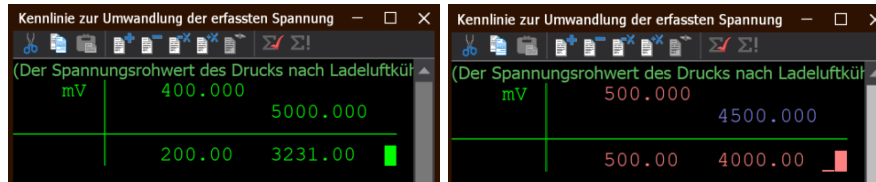


Slika 38. Usporedba stvarnih turbopunjača, strana kompresora



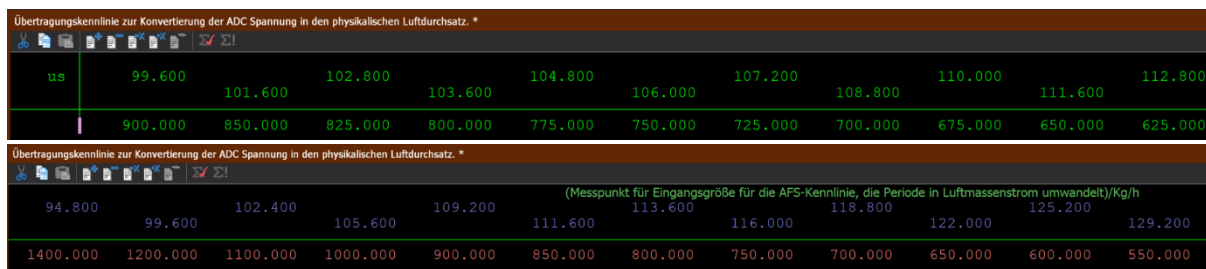
Slika 39. Usporedba stvarnih turbopunjača, strana turbine

Osim samog turbopunjača, potrebno je zamijeniti i senzor tlaka zraka, te senzor masenog protoka zraka. Originalni senzor tlaka zraka ima mjerno područje od 200 do 3231 mBar što nije dovoljno za željeni apsolutni tlak nabijanja od 3400 mBar. Senzor je zamijenjen drugim koji ima očitavanje mjerno područje od 500 do 4000 mBar čime zadovoljava željene kriterije. Linearizacije oba senzora prikazane su na slici 40.



Slika 40. Linarizacija senzora tlaka zraka

Originalni senzor masenog protoka zraka ima najveće očitavanje od 900 kg/h što je tek malo više od protoka koji prolazi kroz originalni motor. Senzor je zamijenjen senzorom s najvećim očitanjem od 1400 kg/h što je dovoljno za željenu radnu točku motora. Linearizacije oba senzora prikazane su na slici 41.



Slika 41. Linearizacija senzora masenog protoka zraka

Osim samog senzora masenog protoka zraka, potrebno je zamijeniti i crijevo zraka između senzora masenog protoka zraka i ulaza u turbopunjač. Naime, novi senzor masenog protoka zbog većeg protoka zraka kojemu je namijenjen, ima i veći promjer kućišta senzora zbog čega se originalno crijevo više ne može koristiti. Crijevo je zamijenjeno crijevom s 3.0 BiTDI motora istog proizvođača koje originalno dolazi s većim senzorom masenog protoka zraka. Novo crijevo cijelom svojom duljinom ima veći promjer od originalnog. Kako je stoga i promjer cijevi na ulazu u turbopunjač veći, izrađen je adapter koji omogućuje prihvat cijevi na turbopunjač. Oba senzora masenog protoka zraka sa prikladnim crijevima prikazana su na slici 42. Originalni senzor i crijevo na slici 42. su prikazani lijevo, a novo crijevo sa spomenutim adapterom desno.



Slika 42. Senzori masenog protoka zraka

Na kraju, mehaničke promjene napravljene na motoru potrebno je popratiti i promjenama radnih mapa računala motora. U ovome slučaju, jedna od glavnih promjena je ona mape zahtjeva vrijednosti tlaka nabijanja u ovisnosti o masi ubrizganog goriva i brzini vrtnje motora. Originalne vrijednosti navedene radne mape već su prikazane na slici 4., a mapa korigirana vrijednostima za veći turbopunjač pokazana je na slici 43.

Kennfeld: Basis-Ladedruck-Sollwert für die erste auf Einspritzmenge basierte Betriebsart *

(Einspritzmenge für die Sollwertbildung der Ladedruckregelung, Motordrehzahl)/hPa

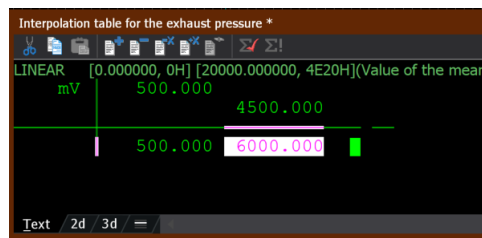
rpm	mg/hub	30.0000	40.0000	50.0000	60.0000	70.0000	80.0000	90.0000
1000.000	1000.00	1200.00	1400.00	1400.00	1700.00	1900.00	2200.00	
1250.000	1270.00	1444.00	1720.00	2080.00	2400.00	2450.00	2500.00	
1400.000	1290.00	1550.00	1829.00	2120.00	2450.00	2550.00	2600.00	
1500.000	1350.00	1680.00	2200.00	2250.00	2500.00	2600.00	2800.00	
1750.000	1380.00	1790.00	2250.00	2350.00	2600.00	2650.00	2800.00	
2000.000	1400.00	1830.00	2350.00	2400.00	2700.00	2750.00	2850.00	
2250.000	1400.00	1930.00	2450.00	2450.00	2800.00	2850.00	2900.00	
2500.000	1420.00	1950.00	2450.00	2500.00	2900.00	3000.00	3100.00	
2600.000	1420.00	1950.00	2450.00	2500.00	3000.00	3150.00	3300.00	
2750.000	1420.00	1950.00	2450.00	2550.00	3050.00	3200.00	3400.00	
3250.000	1450.00	1950.00	2450.00	2650.00	3100.00	3200.00	3400.00	
3750.000	1515.00	1980.00	2450.00	2700.00	3100.00	3200.00	3400.00	
4250.000	1582.00	2018.00	2450.00	2700.00	3100.00	3200.00	3400.00	
4500.000	1605.00	2016.00	2246.00	2700.00	3100.00	3200.00	3400.00	
4750.000	1657.00	2012.00	2246.00	2700.00	3100.00	3200.00	3300.00	
5000.000	1680.00	2003.00	2246.00	2700.00	3100.00	3200.00	3300.00	

Text 2d / 3d / = / <

Slika 43. Izmijenjena radna mapa zahtjeva tlaka nabijanja zraka

5.4 Senzor tlaka ispušnog kolektora

Kako bi se model motora u Boostu što vjernije usporedio sa stvarnim motorom, te kako bi se prilikom kalibriranja većeg turbopunjača izbjegle previsoke vrijednosti tlaka u ispušnom kolektoru, na modificirani motor ugrađen je i senzor tlaka ispušnog kolektora. Senzor je spojen na konektor koji se inače koristi za senzor diferencijalnoga tlaka filtera čestica čađe koji je za potrebe mjerenja privremeno stavljen van funkcije. Navedeni konektor bio je jedina opcija za povezivanje senzora tlaka ispušnog kolektora sa računalom motora, s obzirom da je ovo bio jedini dostupan konektor s tri pina (nužno za povezivanje bilo kojeg senzora tlaka). Ugrađeni senzor ima mjerno područje 500-6000 mBar, što je i više nego dovoljno za pretpostavljene vrijednosti tlaka ispušnih plinova. Linearizacija navedenog senzora prikazan je na slici 44.



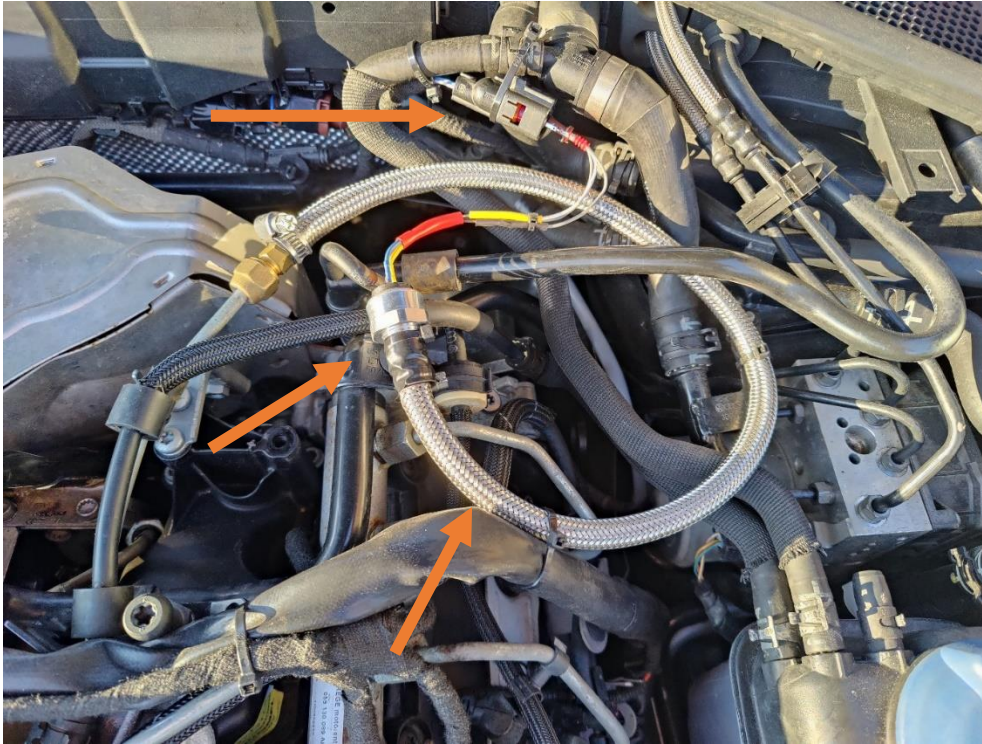
Slika 44. Linearizacija senzora tlaka ispušnih plinova

Do senzora tlaka ispušnih plinova provučena je cijev od ulaza ispušnog kolektora u turbopunjač, točnije od prirubnice namijenjene za crijevo sustava za povrat ispušnih plinova. Za potrebe mjerenja sustav za povrat ispušnih plinova privremeno je stavljen van funkcije. Na prirubnicu spomenutog crijeva stavljanja je pločica s prihvatom za crijevo koje je provučeno do senzora tlaka ispušnih plinova. Navedena pločica prikazana je na slici 45.



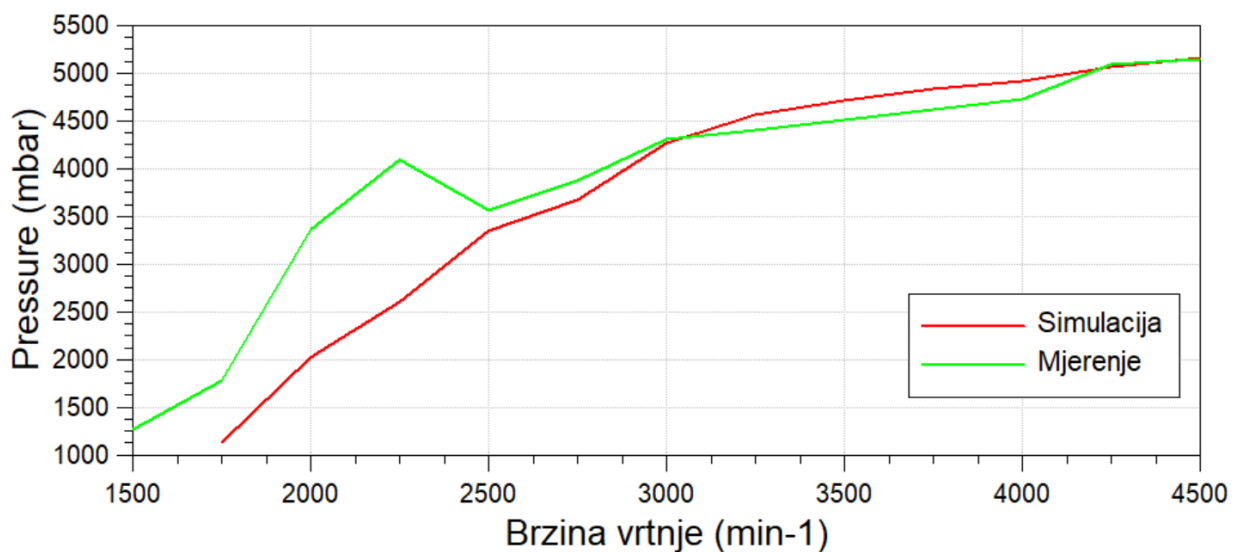
Slika 45. Pločica s prihvatom za crijevo senzora tlaka ispušnih plinova

Na slici 46. strelicama su naznačeni senzor tlaka ispušnih plinova, crijevo provučeno od pločice sa slike 45. do senzora te konektor spomenut ranije u poglavlju.



Slika 46. Senzor tlaka ispušnih plinova s crijevom i konektorom

Kako je mjesto mjerenja tlaka na stvarnom motoru približno jednako mjestu gdje se nalazi i senzor temperature ispušnih plinova, u Boost simulaciji su vrijednosti senzora tlaka ispušnih plinova uzete s MP4. Slika 47. prikazuje vrijednosti dobivene simulacijom (crvena krivulja) i vrijednosti dobivene mjerenjem na stvarnom motoru (zeleno krivulja).



Slika 47. Vrijednosti tlaka ispušnih plinova za modificirani motor

Vršna vrijednost tlaka ispušnih plinova na brzini vrtnje od otprilike 2250 min⁻¹ rezultat je pregresivne kalibracije radne mape vrijednosti pozicije lopatica varijabilne geometrije za veći turbopunjač koja je kasnije korigirana. Bitno je primijetiti da su iznosi vrijednosti na brzinama vrtnje većima od 3000 min⁻¹ približno (otprilike +/- 5%) jednake onima simuliranim u Boostu, čime se potvrđuje da otpori strujanja cijevi, katalizatora i plenuma u Boostu vjerno simuliraju strujanje u stvarnom motoru.

5.5 Izmjene radnih mapa računala motora

Nakon svih navedenih izmjena, potrebno je odraditi još neke izmjene u programu računala motora kako bi motor s izmijenjenim radnim uređajima mogao pravilno raditi i u potpunosti iskoristiti potencijal izmijenjenih radnih uređaja. Obzirom da je ukupno izmijenjeno više stotina radnih mapa programa motora, te da sam način funkcioniranja računala motora nije uža tema rada, ovdje su navedene samo neke od bitnijih i većih radnih mapa koje su izmijenjene. Na slici 48. prikazana je originalna mapa kuta početka glavnog ubrizgavanja goriva u ovisnosti o masi ubrizgavanja goriva i brzini vrtnje motora.

mg/hub	rpm	1750.000	2200.000	2750.000	3250.000	3750.000	4250.000	4750.000	5000.000	5150.000
5.0000		1.9775	1.9775	6.9653	6.9653	6.9653	7.9761	8.4814	8.4814	8.4814
10.0000		1.9775	1.9775	6.9653	6.9653	6.9653	7.9761	9.4482	9.4482	9.4482
15.0000		3.4717	3.9551	6.9653	7.4707	6.9653	8.9648	11.9751	11.9751	11.9751
20.0000		0.9668	2.4829	6.9653	8.7671	12.2168	10.6567	16.9629	16.9629	16.9629
25.0000		-0.0220	2.3071	6.9653	8.9648	12.5244	13.0957	17.9736	17.9736	17.9736
30.0000		0.4614	2.6587	9.1406	10.4590	12.6782	14.2822	17.9736	17.9736	17.9736
35.0000		1.4722	3.0103	9.5801	10.4590	12.6782	14.2603	17.9736	22.9614	20.9619
40.0000		2.9663	3.3618	9.8657	10.4590	13.5791	15.7324	17.9736	24.9609	20.9619
50.0000		3.3838	4.5483	11.0083	12.5024	15.4028	19.9512	25.5322	26.4990	22.5439
55.0000		4.9658	6.9873	9.9976	12.7881	16.7871	19.9951	25.5103	27.4658	27.4658

Slika 48. Originalna radna mapa kuta početka glavnog ubrizgavanja goriva

Za točnu promjenu vrijednosti kuteva početka ubrizgavanja potrebno je bilo izračunati razliku duljine trajanja ubrizgavanja između originalnih i izmijenjenih visokotlačnih brizgaljki. Kako se postotna razlika u protočnosti originalnih i izmijenjenih brizgaljki mijenja s promjenom tlaka i volumena ubrizgavanja goriva, većinu točaka početka ubrizgavanja bilo je potrebno posebno izračunati. Kako su izmijenjene brizgaljke nešto protočnije od originalnih, vrijednosti kuta početka ubrizgavanja za manje mase ubrizgavanja pomaknute se su nešto kasnije, odn, bliže GMT. Također, kako se u modificiranom motoru ubrizgane mase goriva po ciklusu znatno veće nego kod originalnog, y-os radne mape bilo je potrebno povećati sa najveće

vrijednosti 55 mg/ciklusu do 95 mg/ciklusu. Izmijenjena radna mapa prikazana je na slici 49. Treba napomenuti da u računalu motora zbog više modova rada motora (Bosch EOM, *engine operating mode*) postoji 30 sličnih radnih mapa kuta početka ubrizgavanja goriva od kojih su sve izmijenjene na sličan način. Većina mapa, kao i one navedene u nastavku poglavlja, se iz istog razloga pojavljuju više puta, između ostaloga, tako se i došlo do više ranije navedenog broja promijenjenih radnih mapa.

mg/hub	rpm	1750.000	2200.000	2750.000	3250.000	3750.000	4250.000	4750.000	5000.000	5150.000
5.0000	1.4722	1.4722	5.9546	5.9546	5.9546	7.9761	8.4814	8.4814	8.4814	8.4814
10.0000	1.4722	1.4722	5.9546	5.9546	5.9546	7.9761	9.4482	9.4482	9.4482	9.4482
15.0000	2.9663	3.4497	5.9546	6.4600	5.9546	8.9648	11.9751	11.9751	11.9751	11.9751
20.0000	0.4614	1.9775	5.9546	7.7563	11.2061	10.6567	16.9629	16.9629	16.9629	16.9629
25.0000	-0.5054	1.8018	5.9546	7.9541	11.5137	13.0957	17.9736	17.9736	17.9736	17.9736
30.0000	-0.0220	2.1533	7.1191	9.4482	11.6675	14.2822	17.9736	17.9736	17.9736	17.9736
40.0000	0.9668	2.5049	7.1191	9.4482	11.6675	14.2603	17.9736	19.9731	20.9619	20.9619
60.0000	6.2842	6.2842	6.6797	9.2944	12.5684	15.7324	17.9736	22.9395	23.9502	23.9502
80.0000	6.4819	6.1963	6.5918	9.2944	12.0850	16.7871	20.7642	23.7744	25.1807	25.1807
95.0000	7.2949	7.4927	8.0859	11.4917	15.0952	20.1929	24.7852	27.3779	27.5757	27.5757

Slika 49. Izmijenjena radna mapa kuta početka glavnog ubrizgavanja goriva

Idući primjer radna mape odnosi se na radnu mapu preračunavanja željenog indiciranog momenta motora u potrebnu masu ubrizgavanja po ciklusu u ovisnosti o brzini vrtnje motora. Navedena originalna mapa prikazana je na slici 50. Kako je na slici moguće vidjeti, mapa je kalibrirana do najvećeg indiciranog momenta od 650 Nm, odn. masa ubrizgavanja od 76 mg/ciklusu.

rpm	Nm	175.000	200.000	250.000	300.000	350.000	400.000	470.000	540.000	650.000
630.000	23.9000	28.0700	36.6800	47.2800	57.8500	63.0000	76.0000	86.0700	99.9200	99.9200
670.000	20.9000	25.0700	33.6800	44.2800	54.8500	60.0000	73.0000	83.0700	96.9200	96.9200
1000.000	19.2000	22.4000	30.0000	37.3000	48.0500	55.0000	66.7000	78.3500	91.2500	91.2500
1250.000	18.6000	21.6000	27.4700	33.5700	40.6000	47.7000	60.0300	71.3000	85.4700	85.4700
1500.000	18.3000	21.1000	26.7300	32.3200	38.6000	44.4000	53.9000	65.3000	81.4800	81.4800
1750.000	18.1000	20.9000	26.5500	32.0300	37.5000	43.2000	51.5000	61.0000	78.5000	78.5000
2000.000	18.0000	20.5000	26.4500	32.0800	36.8000	43.4000	50.9000	59.9000	76.6000	76.6000
2250.000	17.6000	20.2000	26.2000	31.8500	36.2000	42.4000	49.9000	58.9000	76.3000	76.3000
2500.000	17.1000	19.6000	25.0000	30.5000	36.0000	41.5000	49.6000	59.3000	76.6700	76.6700
2750.000	16.9000	19.3000	24.7000	29.9300	35.9000	41.2000	49.3000	60.0000	76.9000	76.9000
3000.000	16.7000	19.2000	24.7000	29.9300	35.8600	41.4000	49.7000	60.0000	76.4000	76.4000
3250.000	16.7000	19.3000	24.8000	30.2700	36.1600	41.7000	50.1000	61.5000	76.9500	76.9500
3500.000	16.8300	19.6000	25.1000	30.5000	36.3600	42.2000	50.5000	62.0000	76.5800	76.5800
3750.000	16.8500	19.7000	25.2000	30.7000	36.6600	42.8000	51.8000	63.7200	77.1800	77.1800
4000.000	17.2000	19.8000	25.3000	31.1000	37.0600	43.6000	53.3000	65.8200	76.6800	76.6800
4500.000	17.3000	20.0000	25.9000	31.8000	38.4600	46.0000	56.5000	71.8200	83.6800	83.6800

Slika 50. Originalna radna mapa preračunavanja ind. momenta u potrebnu masu ubrizgavanja

Važnost ove radne mape je između ostaloga u činjenici da iz njih računalno motora dobiva podatak o trenutnom indiciranom momentu motora, koji se dijeli s ostalim računalima na vozilu pa tako i računalom automatskog mjenjača. Pogrešnom kalibracijom navedene radne mape, podatak o trenutnom momentu motora ne bi bio točan. Neki od problema koji bi mogli nastati u tom slučaju uključuju trzav rad automatskog mjenjača. Vrijednosti masa ubrizgavanja goriva

u izmijenjenoj mapi dobiveni su pomoću matematičke ekstrapolacije te uspoređivanjem s vrijednostima nekih sličnih stvarnih motora istog proizvođača veće snage (npr. 3.0 TDI 255 kW). Konačna izmijenjena radna mapa preračunavanja indiciranog momenta u potrebnu masu ubrizgavanja po ciklusu prikazana je na slici 51.

rpm	175.000	200.000	300.000	400.000	500.000	600.000	700.000	800.000	900.000
630.000	23.9000	28.0700	47.2800	63.0000	81.0000	93.0000	99.0000	106.0000	117.0000
670.000	20.9000	25.0700	44.2800	60.0000	78.0000	90.0000	97.5000	105.0000	116.5000
1000.000	19.2000	22.4000	37.2900	48.0000	57.0000	69.4000	82.1000	102.7000	115.4000
1250.000	18.6000	21.6000	35.5700	47.7000	56.2000	68.9000	81.5000	100.8000	114.7000
1500.000	18.3000	21.1000	32.3200	44.4000	55.2000	68.0000	80.8000	94.1000	113.6000
1750.000	18.1000	20.9000	32.0300	43.2000	54.5000	66.9000	80.0000	91.3000	111.0000
2000.000	18.0000	20.5000	32.0700	43.4000	54.0000	65.7000	78.5000	89.3000	110.0000
2250.000	17.6000	20.2000	31.8500	42.4000	53.7000	64.9000	77.7000	89.3000	109.0000
2500.000	17.1000	19.6000	30.5000	41.5000	53.7000	65.0000	77.4000	89.8000	109.0000
2750.000	16.9000	19.3000	29.9300	41.2000	53.0000	64.7000	76.5900	89.8000	108.6000
3000.000	16.7000	19.2000	29.9300	41.4000	52.8000	64.5000	76.7000	89.8000	108.5000
3250.000	16.7000	19.3000	30.2700	41.7000	52.6000	64.9000	78.0000	91.2000	110.6000
3500.000	16.8300	19.6000	30.5000	42.2000	53.1000	65.3000	79.5000	93.6000	113.5000
3750.000	16.8500	19.7000	30.7000	42.8000	53.7000	66.2000	81.4000	96.0000	115.6000
4000.000	17.2000	19.8000	31.1000	43.6000	54.1000	67.7000	83.2000	97.9000	116.6000
4500.000	17.3000	20.0000	31.8000	45.5000	55.8000	71.3000	88.2000	102.7000	118.3000

Slika 51. Izmijenjena radna mapa preračunavanja ind. momenta u potrebnu masu ubrizgavanja

Kao posljednji primjer uzeta je radna mapa ograničenja indiciranog momenta motora u ovisnosti o brzini vrtnje motora i atmosferskog tlaka zraka. Navedena originalan radna mapa prikazana je na slici 52. Svrha navedene radne mape je zaštita motora od previsokih vrijednosti momenta.

rpm	hPa	700.00	800.00	900.00	950.00
400.000	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000
800.000	350.000	350.000	355.000	350.000	350.000
1000.000	350.000	370.000	395.000	395.000	395.000
1250.000	400.000	420.000	450.000	485.000	485.000
1400.000	485.000	494.000	512.000	512.000	512.000
1500.000	505.000	518.000	530.000	565.000	565.000
1750.000	525.000	541.000	561.000	581.000	581.000
2000.000	541.000	560.000	591.000	610.000	610.000
2250.000	553.000	571.000	599.000	620.000	620.000
2500.000	544.000	570.000	591.000	611.000	611.000
2750.000	535.000	559.500	579.000	603.000	603.000
3000.000	522.000	545.500	564.200	585.000	585.000
3250.000	494.000	519.000	540.000	564.000	564.000
3500.000	461.000	484.000	507.000	531.000	531.000
3750.000	420.000	448.000	475.000	504.000	504.000
4000.000	380.800	411.000	442.000	475.000	475.000
4250.000	345.700	378.000	413.000	445.000	445.000
4400.000	321.500	355.000	392.000	424.000	424.000
4500.000	300.800	340.600	377.500	413.000	413.000
4750.000	256.400	300.000	339.500	381.000	381.000
5000.000	0.000	70.100	159.100	351.000	351.000
5500.000	0.000	0.000	40.000	149.000	149.000

Slika 52. Originalna radna mapa ograničenja indiciranog momenta motora

Kako modificirani motor ima znatno veći indicirani moment od originalnoga, potrebno je povećati vrijednosti ograničenja momenta. Vrijednosti su povećane tek od brzina vrtnja 2250 min⁻¹, a izmijenjena radna mapa prikazana je na slici 53.

rpm	hPa	700.00	800.00	900.00	950.00
400.000		350.000	350.000	350.000	350.000
800.000		350.000	350.000	355.000	350.000
1000.000		350.000	370.000	395.000	395.000
1250.000		400.000	420.000	450.000	485.000
1400.000		485.000	494.000	512.000	512.000
1500.000		505.000	518.000	530.000	565.000
1750.000		525.000	541.000	561.000	581.000
2000.000		541.000	560.000	591.000	610.000
2250.000		553.000	571.000	610.000	630.000
2500.000		544.000	570.000	720.000	745.000
2750.000		535.000	559.500	760.000	790.000
3000.000		522.000	545.500	780.000	820.000
3250.000		494.000	519.000	780.000	820.000
3500.000		461.000	484.000	780.000	820.000
3750.000		420.000	448.000	780.000	820.000
4000.000		380.800	411.000	780.000	790.000
4250.000		345.700	378.000	780.000	790.000
4400.000		321.500	355.000	693.300	770.000
4500.000		300.800	340.600	548.400	600.000
4750.000		256.400	300.000	427.700	480.000
5000.000		0.000	70.100	159.100	351.000
5500.000		0.000	0.000	40.000	149.000

Slika 53. Izmijenjena radna mapa ograničenja indiciranog momenta motora

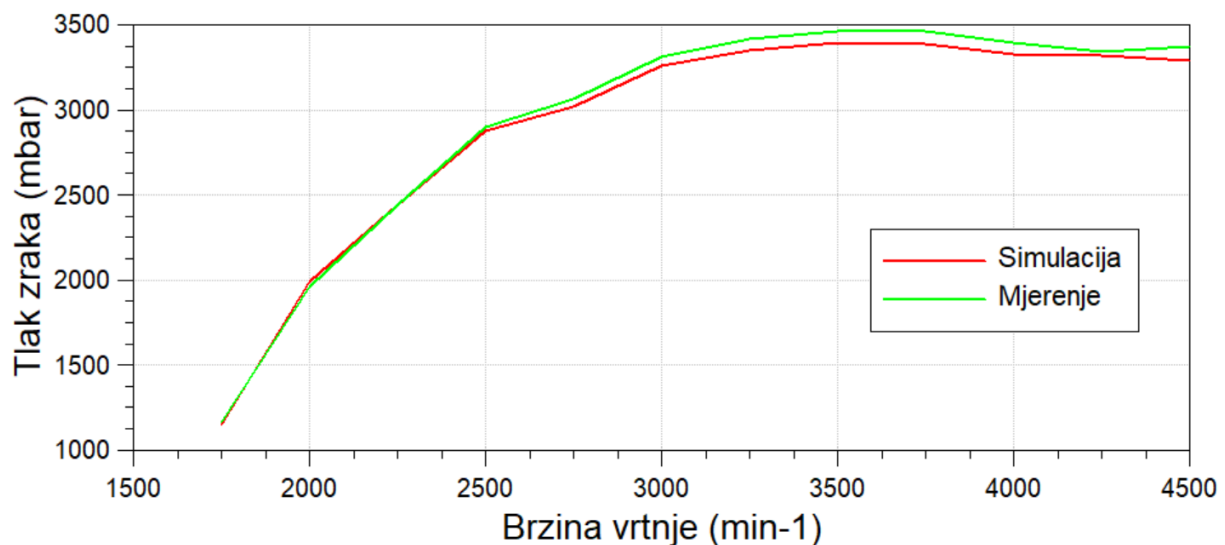
6. Simulacija rada modificiranog motora i usporedba s izmjerenim vrijednostima

Jednakim postupkom kao i u poglavljima 3. i 4. napravljena je simulacija modificiranog motora. Model u Boost-u jednak je onome ranije navedenom i objašnjenom u radu, uz izmjenu zadanih parametara rada modela zadanim Case Explorerom prikazanim na slici 54.

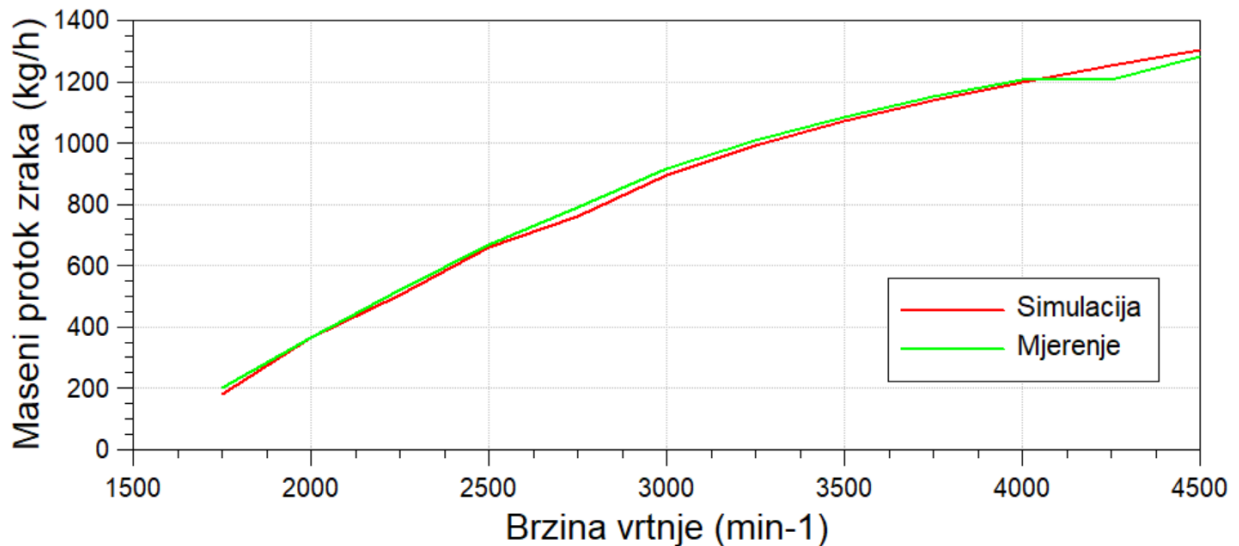
Case Set MOD	Eng_spd	Inj_qty	Prs_ratio	Piston_wall_temp	Head_Liner_Temp_TDC	Liner_Temp_BTC	Calibration_factor	Rail_pSetPoint	AVLMCC_ROI
	rpm	mg	[-]	degC	degC	degC	[-]	bar	
1750	1750	42.5	1.15	250	220	125	0.95	1100	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_1750.dat
2000	2000	58	2	250	220	125	0.95	1600	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_2000.dat
2250	2250	72	2.45	260	230	125	0.95	1900	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_2250.dat
2500	2500	82	2.9	270	230	130	0.95	2100	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_2500.dat
2750	2750	88	3.05	270	240	135	0.95	2100	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_2750.dat
3000	3000	93	3.3	280	240	135	0.95	2150	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_3000.dat
3250	3250	95	3.4	280	240	145	0.95	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_3250.dat
3500	3500	97.5	3.45	290	260	145	0.95	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_3500.dat
3750	3750	99.5	3.45	290	260	145	1.1	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_3750.dat
4000	4000	97	3.4	290	230	140	1.1	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_4000.dat
4250	4250	94	3.4	290	270	150	1.12	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_4250.dat
4500	4500	92.5	3.38	290	270	150	1.2	2200	AVLMCC_ROI\CaseSetMOD\Case1_4500.dat

Slika 54. Podaci zadani Case Explorerom za modificirani motor

Jedini parametar Case Explorera koji je bilo potrebno procijeniti je Calibration Factor, koji se odnosi na vrijednosti Piston, Head i Linear Calibration Factor vezane za prijenos topline izgaranja. Rezultati simulacije modificiranog motora prikazani su u idućim dijagramima, a rezultati logova izmjerenih na stvarnom vozilu u tablicama. Slika 55. prikazuje krivulju tlaka zraka u usisnom kolektoru u simulaciji modificiranog motora i krivulju tlaka zraka izmjerenog na stvarnom modificiranom motoru.



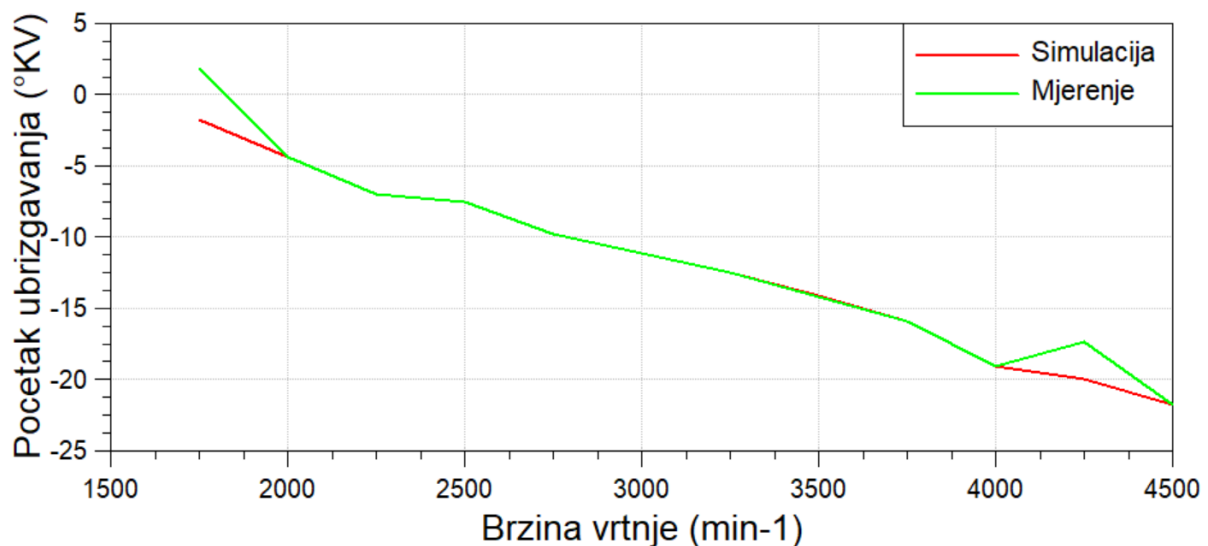
Slika 55. Tlak zraka u usisnom kolektoru kod modificiranog motora



Slika 56. Maseni protok zraka kod modificiranog motora

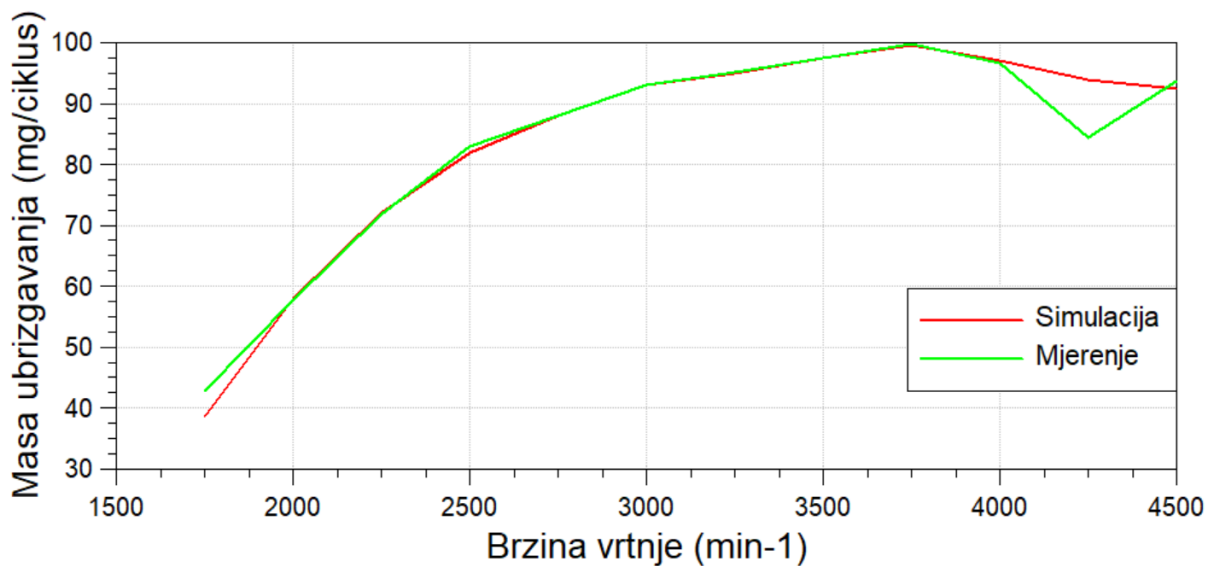
Slika 56. prikazuje masenog protoka zraka u simulaciji modificiranog motora i krivulju tlaka zraka izmjenjenog na stvarnom modificiranom motoru. Vidljivo je, kao i simulaciji originalnog motora, strujanje zraka kroz motor dovoljno dobro modelirano.

Slika 57. prikazuje točke početka glavnog ubrizgavanja goriva u simulaciji modificiranog motora zajedno s onima izmjerenim na stvarnom modificiranom motoru, a na slici 58. prikazane su mase ubrizgavanja po ciklusu.



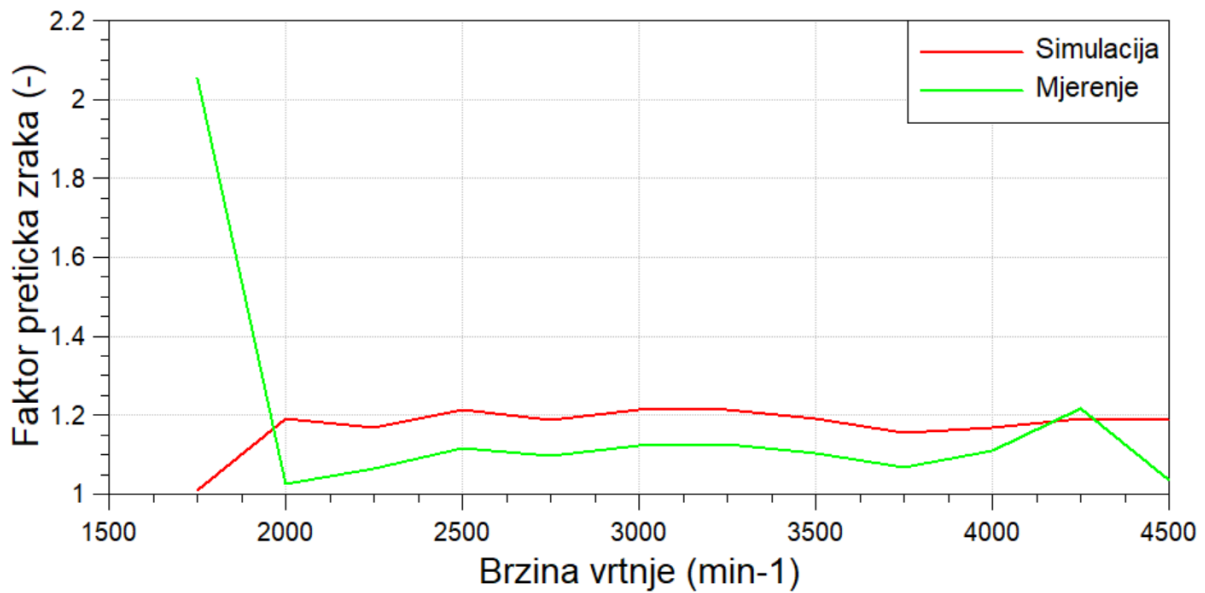
Slika 57. Točka početka ubrizgavanja goriva u simulaciji modificiranog motora

Uspoređujući vrijednosti simulirane vrijednosti točki početka ubrizgavanja goriva i masa glavnog ubrizgavanja po ciklusu, može se vidjeti da simulirani model pravovremeno počinje ubrizgavati gorivo. Manje razlike vidljive su kod radne točke 4250 min^{-1} . Naime, u stvarnom vozilu, zbog većih masa ubrizgavanja, te zbog većih temperatura usisnog zraka, ostvarene su temperature ispušnih plinova na ulazu u turbopunjač blizu 900°C , kako je i prikazano u nastavku poglavlja. Računalo motora u tom trenutku počinje smanjivati masu ubrizgavanja po ciklusu kako bi zaštitilo motor od previsokih temperatura, te je iz tog razloga na slici 58. na 4250 min^{-1} vidljivo kašnjenje početka ubrizgavanja goriva, a na slici 59. smanjenje mase ubrizgavanja goriva.



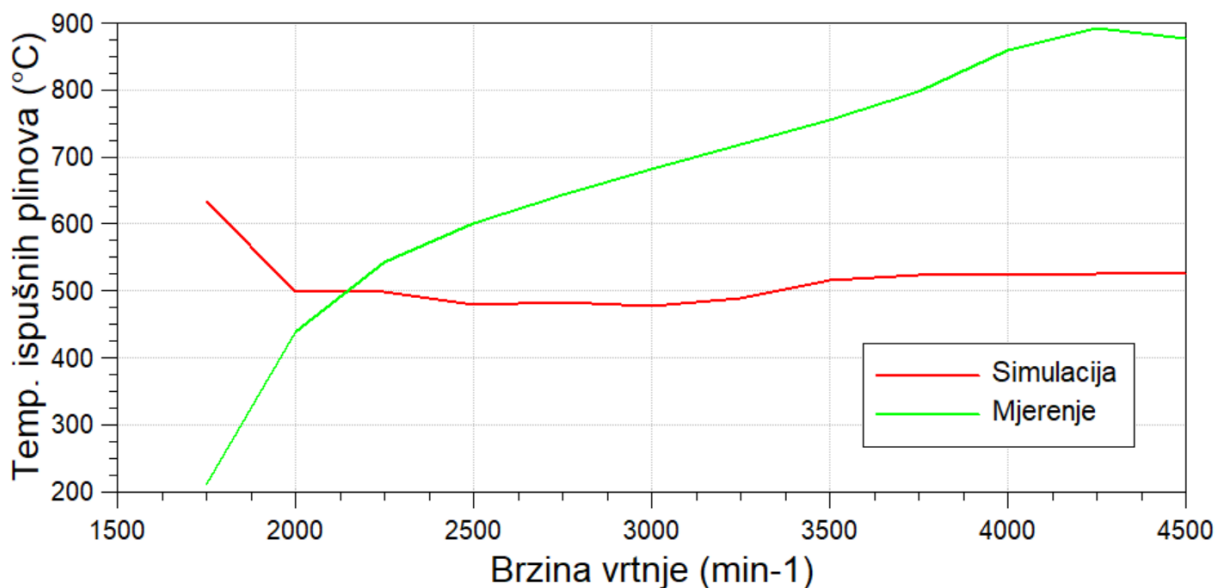
Slika 58. Mase ubrizgavanja goriva po ciklusu u simulaciji modificiranog motora

Na slici 59. pokazan je dijagram vrijednosti faktora pretička zraka u simulaciji modificiranog motora, a na slici 60. vrijednosti temperatura ispušnih plinova na ulazu u turbopunjač.



Slika 59. Vrijednosti faktora pretička zraka u simulaciji modificiranog motora

Uspoređujući simulirane vrijednosti s onima izmjerenim na stvarnom modificiranom motoru, vidljivo je da su vrijednosti faktora pretička zraka nešto manje u stvarnom motoru. Glavni uzrok ove razlike je u nešto većem zagrijavanju usisnog zraka u stvarnom motoru čime je smanjena i gustoća zraka. Simulirani model koristi pojednostavljen modela turbopunjača te ne može dovoljno dobro simulirati zagrijavanje zraka na izlazu iz kompresora turbopunjača. Isto vrijedi i za temperaturu ispušnih plinova, koja je u simulaciji osjetno manja nego kod stvarnog motora.



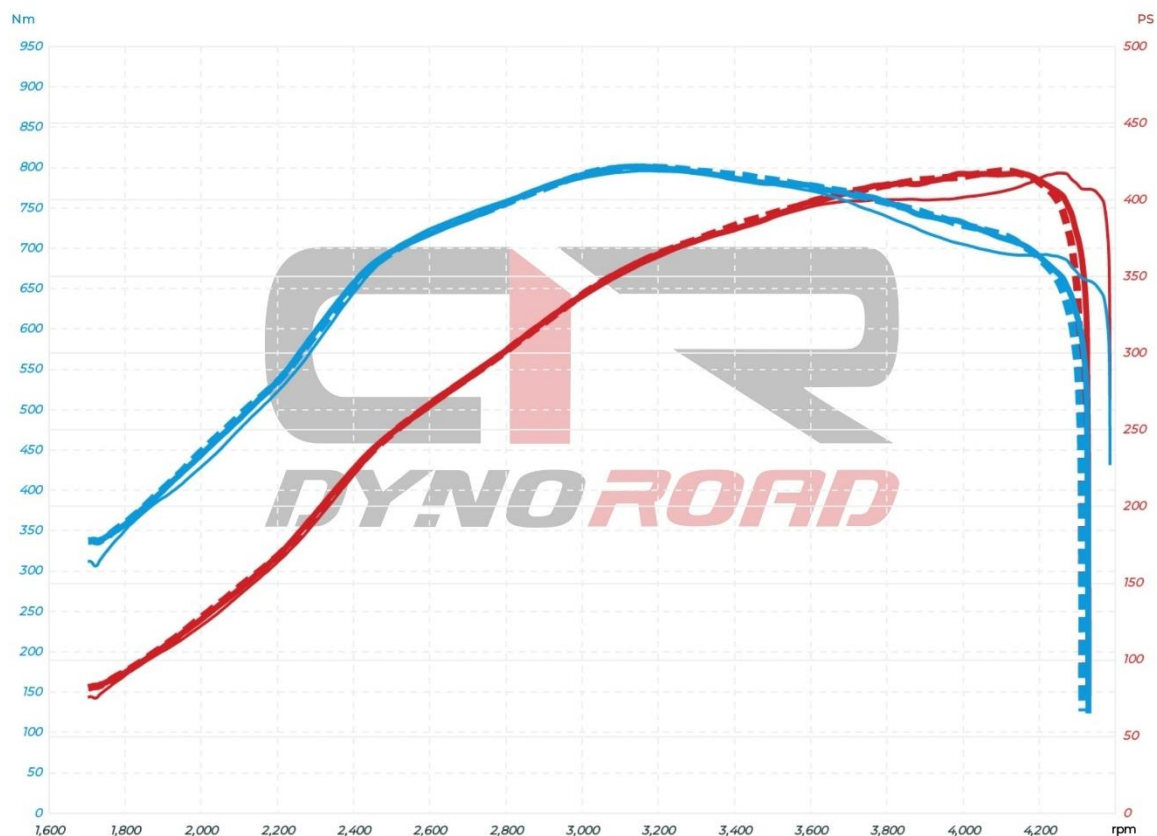
Slika 60. Vrijednosti temperature ispušnih plinova u simulaciji modificiranog motora

6.1 Usporedba simulirane i izmjerene efektivne snage i momenta modificiranog motora

Mjerenje efektivne snage i momenta stvarnog vozila provedeno je istom metodom kao i ranije u radu. Ponovno je napravljeno ukupno pet mjerenja od kojih su zanemarena ona s najvećom i najmanjom snagom. Svih pet mjerenja prikazana su u tablici 8. Ostala su tri mjerenja, prikazana na slici 61., čiji su iznosi maksimalne efektivna snage i efektivnog momenta 2 KS, odn. 5 Nm unutar jedni drugih.

Tablica 8. Rezultati mjerenja snage stvarnog vozila, modificirani motor

Broj mjerenja	Maksimalna efektivna snaga	Maksimalni efektivni okretni moment
#6	425 KS @ 4175 min-1	810 Nm @ 3184 min-1
#7	416 KS @ 4261 min-1	791 Nm @ 3145 min-1
#8	419 KS @ 4105 min-1	801 Nm @ 3175 min-1
#9	417 KS @ 4144 min-1	801 Nm @ 3140 min-1
#10	417 KS @ 4247 min-1	796 Nm @ 3168 min-1

**RUN #8 MOD**

418.9 PS @ 4105 rpm
800.6 Nm @ 3175 rpm

MAX 145 km/h 1012 hPa 20 °C
NORM DIN 70020 235/55/R17 2425 kg

RUN #9 MOD

417.4 PS @ 4144 rpm
801.4 Nm @ 3140 rpm

MAX 145 km/h 1012 hPa 20 °C
NORM DIN 70020 235/55/R17 2425 kg

-1.5 PS (-0.4%) +0.8 Nm (+0.1%)

RUN #10 MOD

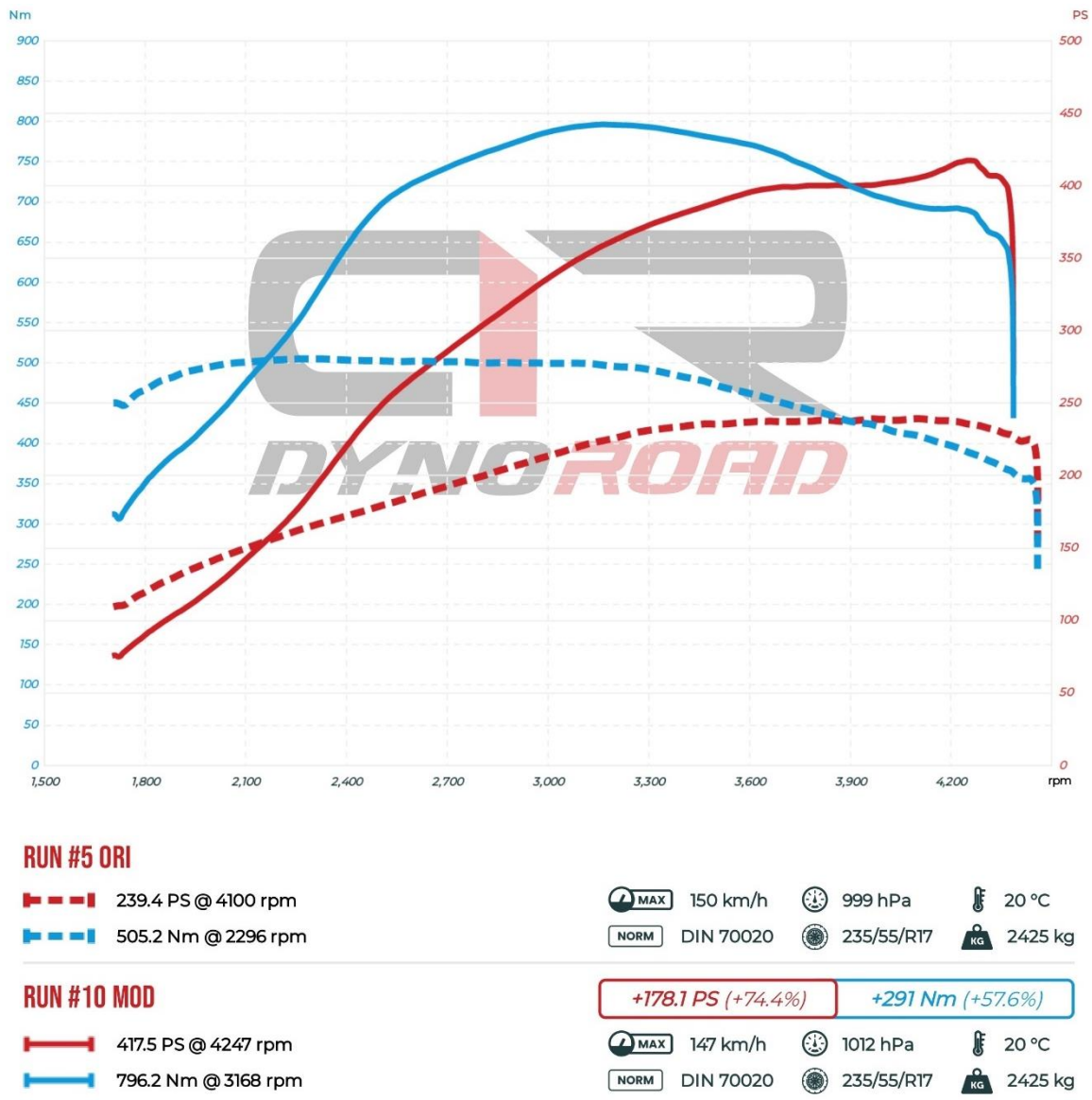
417.5 PS @ 4247 rpm
796.2 Nm @ 3168 rpm

MAX 147 km/h 1012 hPa 20 °C
NORM DIN 70020 235/55/R17 2425 kg

-1.4 PS (-0.3%) -4.4 Nm (-0.5%)

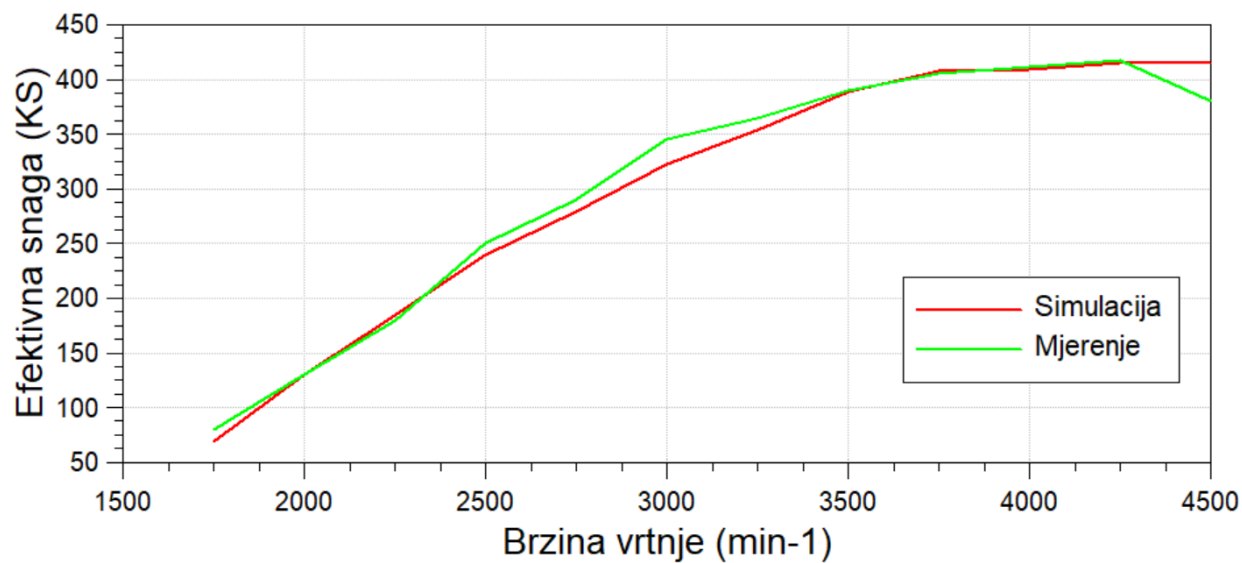
Slika 61. Konačni rezultati mjerenja snage stvarnog vozila. modificirani motor

Dodatno, na slici 62. prikazana je usporedba jednog od odabranih mjerenja originalnog i modificiranog motora.

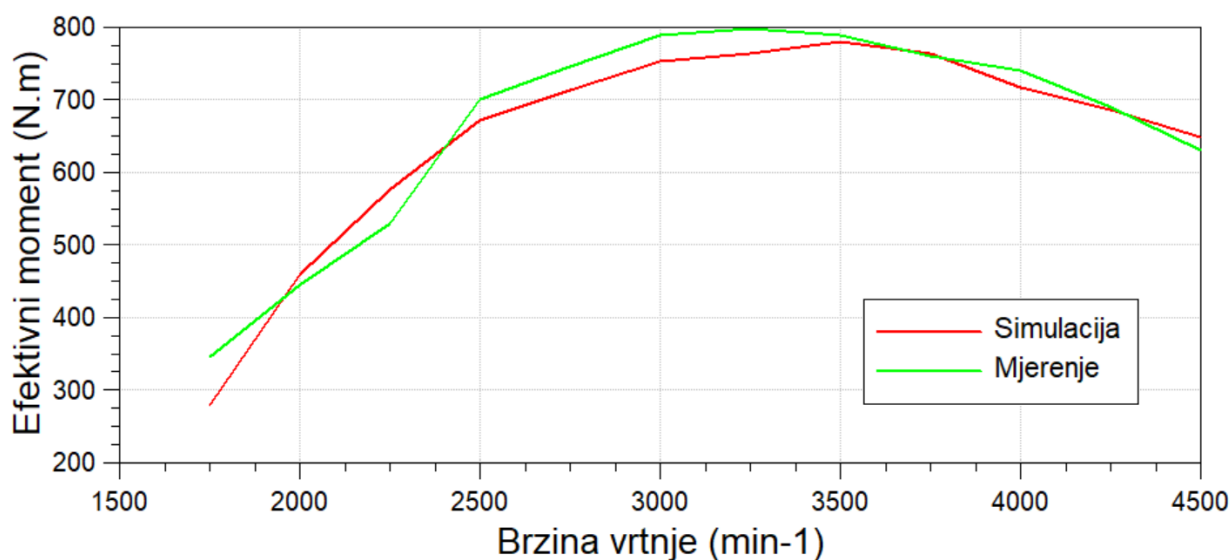


Slika 62. Usporedba vrijednosti efektivne snage i momenta za originalni i modificirani motor

Kao i za originalni motor, rezultati simulacije efektivne snage i momenta uspoređeni su sa izmjerima na stvarnom vozilu. Slika 63. prikazuje usporedbu efektivne snage dobivene simulacijom modificiranog motora i one izmjerene na stvarnom vozilu a slika 64. usporedbu efektivnog momenta dobivenog simulacijom modificiranog motora i onog izmjerenom na stvarnom vozilu. Simulacijom je dobivena maksimalna efektivna snaga od 415 KS pri 4260 min-1 i maksimalni efektivni moment od 780 Nm na 3500 min-1.



Slika 63. Efektivna snaga simulacije modificiranog motora



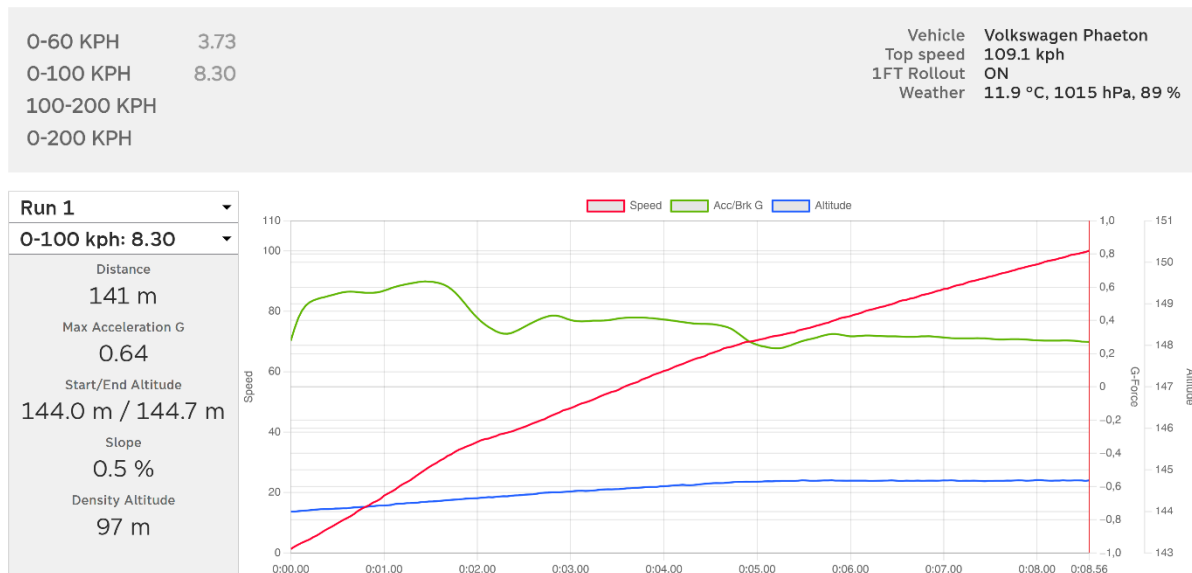
Slika 64. Efektivni moment simulacije modificiranog motora

Vidljivo je da se dobivene krivulje efektivnih snaga i momenata podudaraju slično kao i u slučaju originalnog motora.

7. Simulacija i mjerenje ubrzanja vozila

7.1 Mjerenja ubrzanja stvarnog vozila

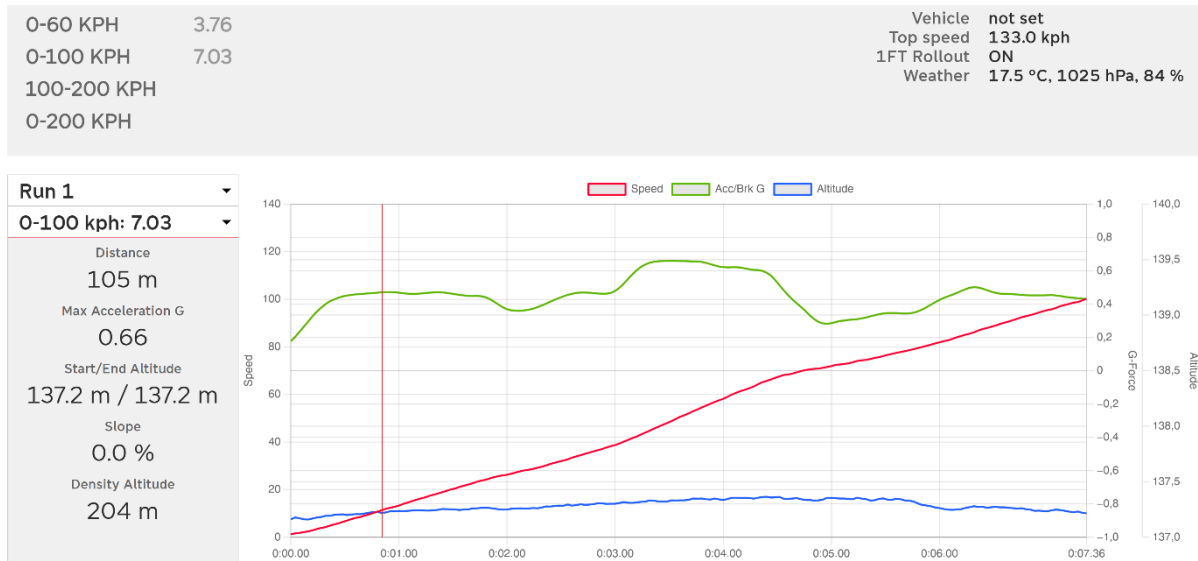
Za potrebe mjerenja ubrzanja vozila korišten je uređaj Racebox Mini [11]. Radi se o uređaju koji se povezuje na GPS, Glonass, Galileo, Beidou satelitske sustave, te promjenom položaja vozila računa točno ubrzanje vozila. Zbog frekvencije od 25 Hz kojom uređaj radi, moguće je ostvariti precizne rezultate mjerenja. Napravljena su mjerenja ubrzanja 0-100 km/h i 100-200 km/h. Ubrzanje 0-100 km/h relevantnije je za vozilo s originalnim motorom s obzirom da se ono može usporediti s deklariranim ubrzanjem, čime se dobije uvid u ispravnost vozila te potvrda da vozilo zaista ispunjava deklarirane tehničke karakteristike. Na slici 65. prikazani su rezultati mjerenja ubrzanja 0-100 km/h za vozilo s originalnim motorom.



Slika 65. Mjerenje ubrzanja originalnog vozila, 0-100km/h

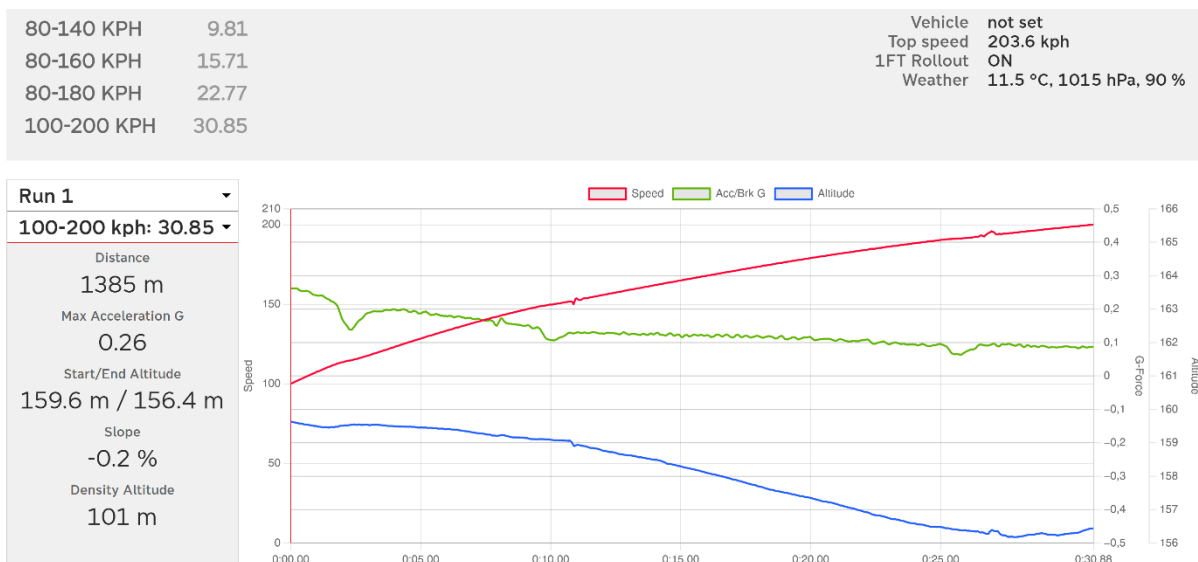
Postignuto je vrijeme ubrzanja 0-100 km/h od 8,30 s što odgovara tehničkim podacima vozila navedenima u tablica 2., čime se zaključuje da vozilo ispunjava deklarirane performanse. Slika 66, prikazuje rezultate mjerenja ubrzanja 0-100 km/h za vozilo s modificiranim motorom. Postignuto je vrijeme ubrzanja od 7,03s što je s obzirom na povećanje snage nešto više nego bi bilo očekivano. Međutim, kod mjerenja ubrzanja s modificiranim vozilom zbog smanjenja udarnog opterećenja na ulazno vratilo mjenjača nije korištena kontrola kretanja (*launch control*), dok god ubrzanja s originalnim motorom je. Dodatno, okretni moment u prvom i

drugom stupnju prijenosa je limitiran, također kako bi se zaštitilo ulazno vratilo mjenjača, koji je na ugrađenom 6HP19A automatskom mjenjaču najslabija točka.



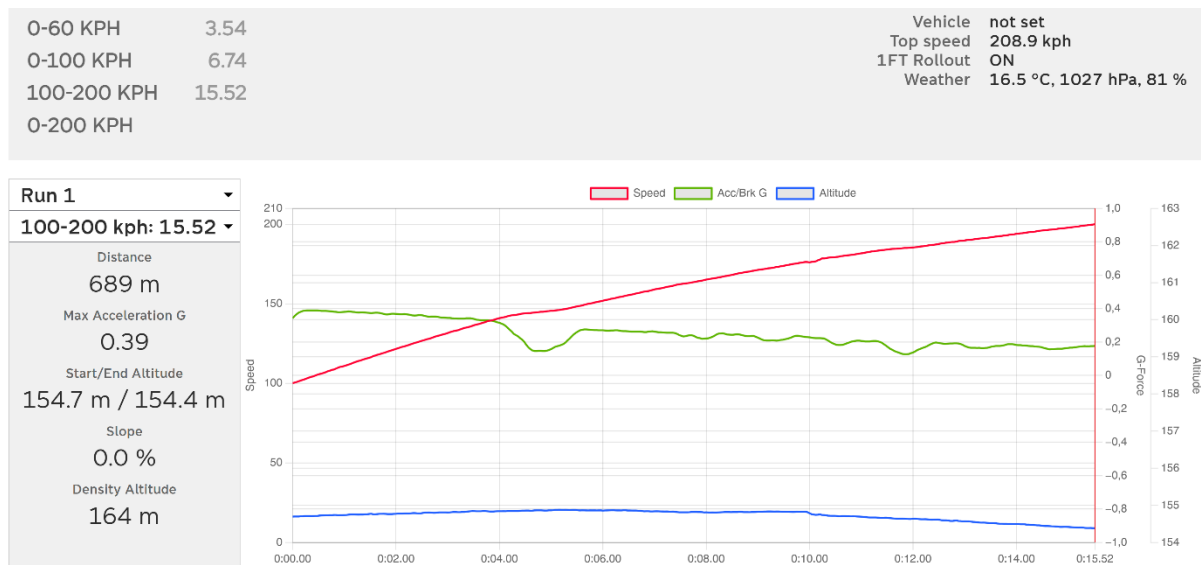
Slika 66. Mjerenje ubrzanja modificiranog vozila, 0-100 km/h

Relevantnija usporedba ubrzanja prije i poslije modifikacija dobiva se uspoređivanjem ubrzanja 100-200 km/h prije i poslije modifikacija. Naime, ovdje vozilo ne koristi prva dva stupnja prijenosa i može koristiti punu efektivnu snagu motora, te je eliminiran utjecaj zaštite automatskog mjenjača na ubrzanje vozila. Kod vozila s originalnim motorom u navedenom testu postignut je rezultat od 30.85s te je test ubrzanja prikazan na slici 67.



Slika 67. Mjerenje ubrzanja originalnog vozila, 100-200 km/h

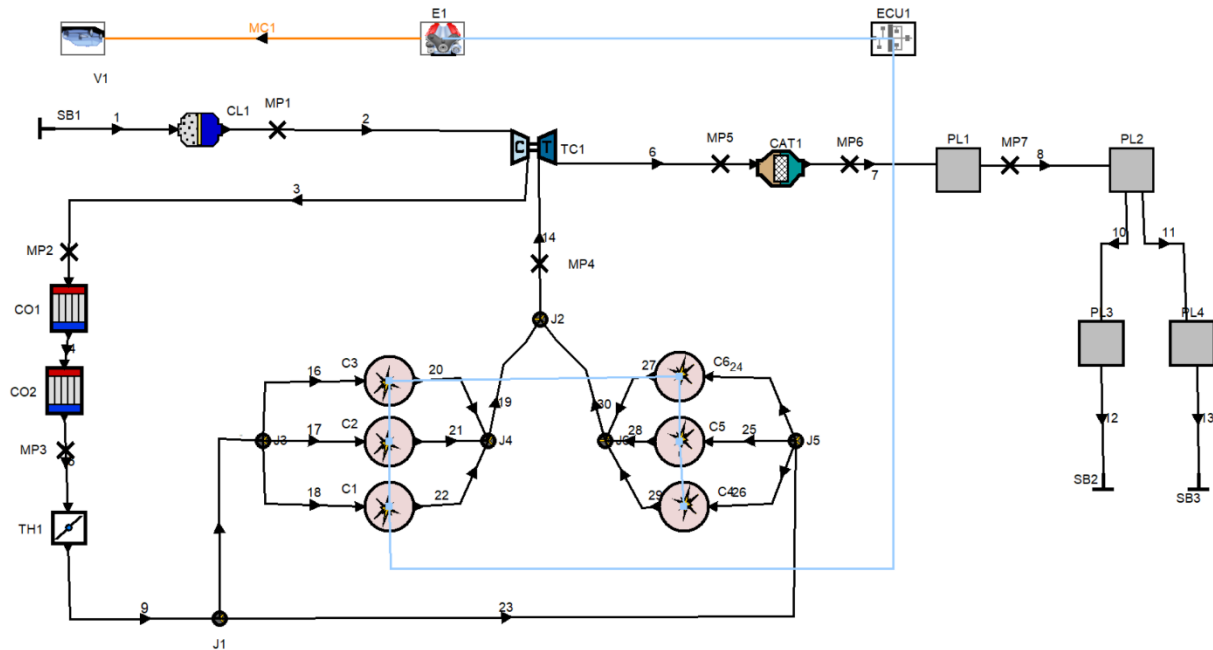
Vozilo s modificiranim motorom u testu ubrzanja 100-200 km/h ostvarilo je rezultat od 15,52s, što je gotovo upola brže nego kod slučaja s originalnim motorom. Rezultat testa ovog ubrzanja prikazan je na slici 68.



Slika 68. Mjerenje ubrzanja modificiranog vozila, 100-200 km/h

7.2 Simulacija ubrzanja vozila u simulacijskom paketu AVL Boost

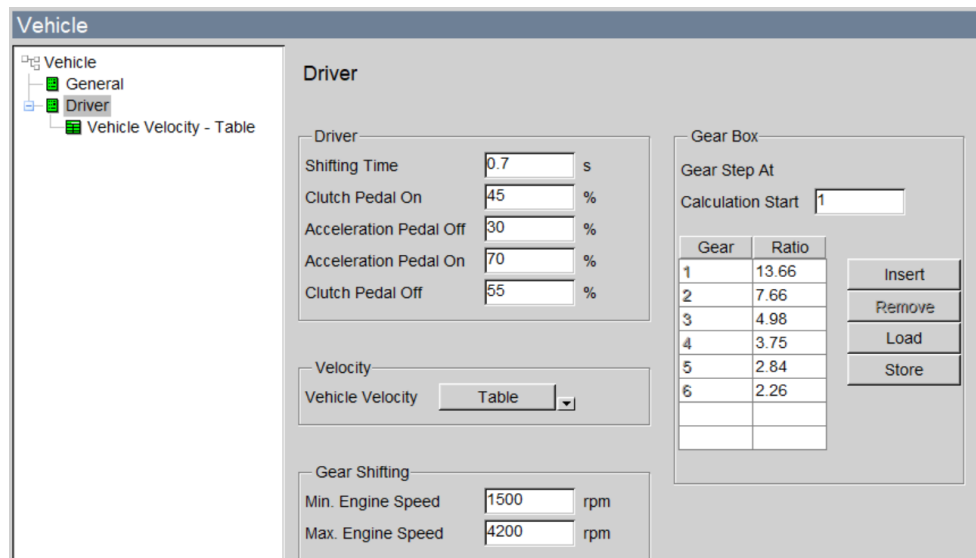
U programskom paketu AVL Boost provedena je simulacija ubrzanja vozila. Kako bi se simulacija ubrzanja mogla provesti, termodinamičkom modelu motora u Boost-u potrebno je dodati vozilo i ECU. Slika 69. prikazuje izgled modela motora s vozilom i ECU-om.



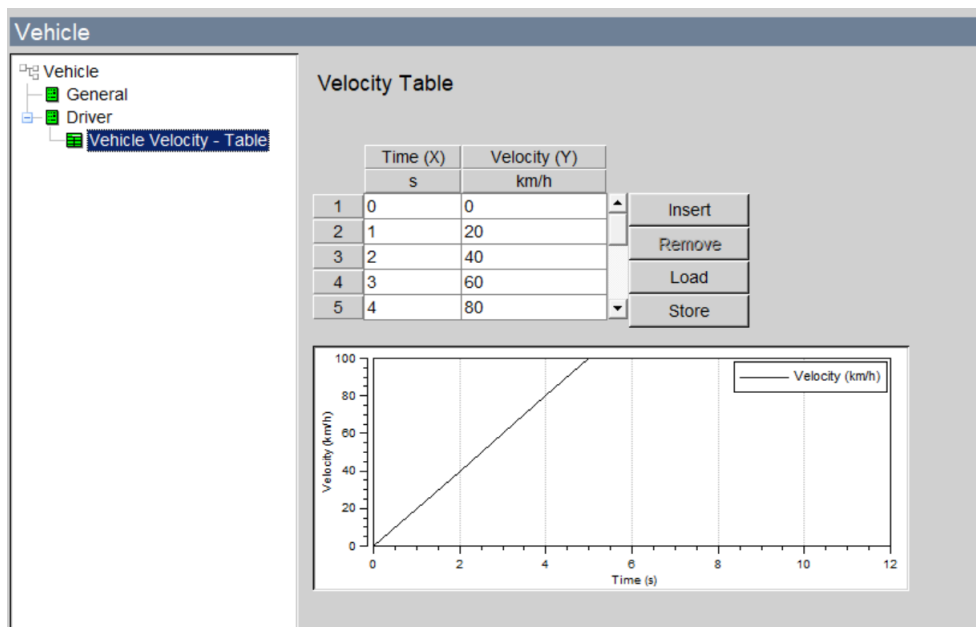
Slika 69. Prikaz termodinamičkog modela motora s vozilom i ECU-om u AVL Boost-u

U modulu *Vehicle* potrebno je zadati tehničke karakteristike vozila kao što su masa vozila, radijus kotrljanja kotača, sile otpora vožnje, prijenosni omjeri mjenjača, vrijeme promjene stupnjeva prijenose, te željeni raspon brzine vrtnje motora. Jedan od dijaloških okvira modula *Vehicle* prikazan je na slici 70.

Simulacije ubrzanja provedene su za slučaj vozila s originalnim i modificiranim motorom. Kao i u slučaju mjerenja stvarnog ubrzanja iz prošlog poglavlja, napravljene su simulacije za slučaj ubrzanja 0-100 km/h i 100-200 km/h.

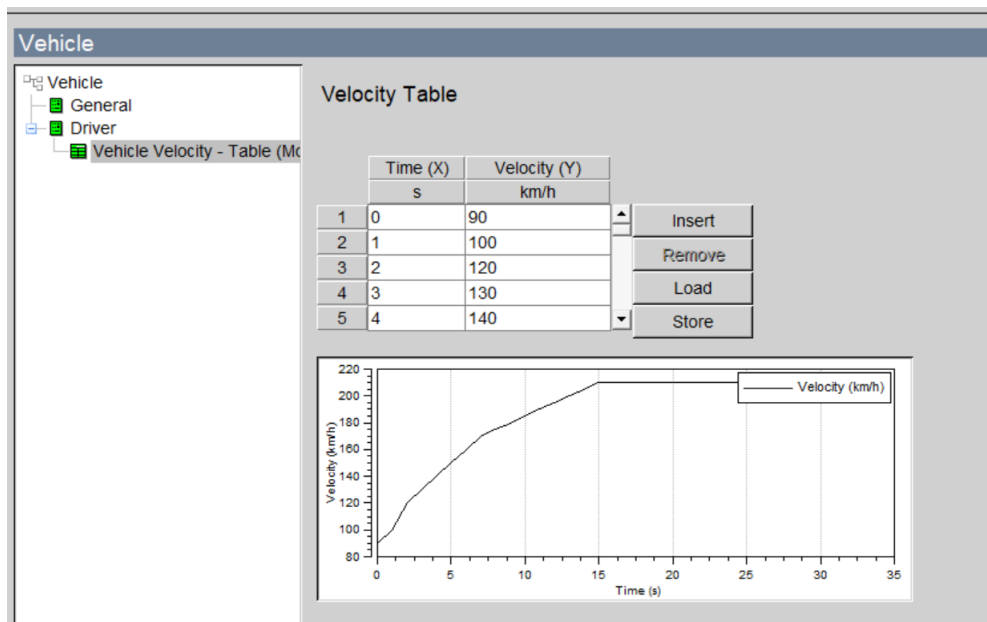
Slika 70. Dijaloški okvir modula *Vehicle*

Za simulaciju ubrzanja potrebno je još u modulu *Vehicle* dodati željenu brzinu koju vozilo mora ostvariti. Kako vozilo u simulaciji cijelo vrijeme mora težiti maksimalnom mogućem ubrzanju, željena brzina vozila u svakom trenutku ubrzanja zadana je kao veća od one koju vozilo temeljem stvarnih izmjera ubrzanja može ostvariti. Željena brzina vozila za simulacije ubrzanja 0-100 km/h prikazana je na slici 71.



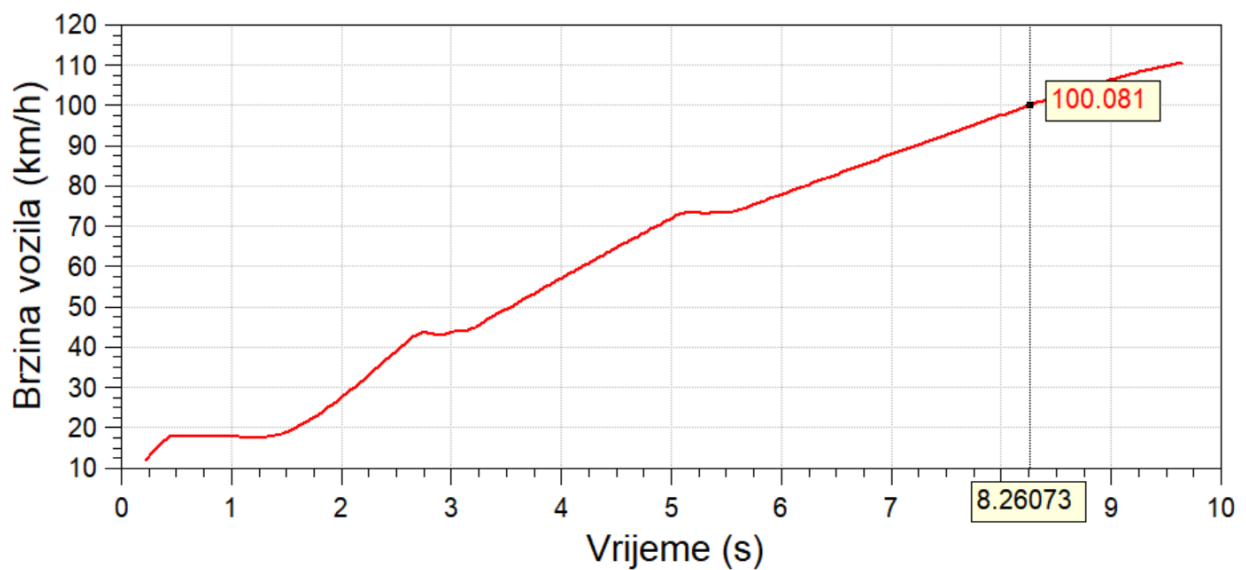
Slika 71. Željena brzina tijekom simulacije ubrzanja 0-100 km/h

Istim principom zadana je i željena brzina tijekom simulacije ubrzanja 100-200 km/h prikazana na slici 72.



Slika 72. Željena brzina tijekom simulacije ubrzanja 100-200 km/h

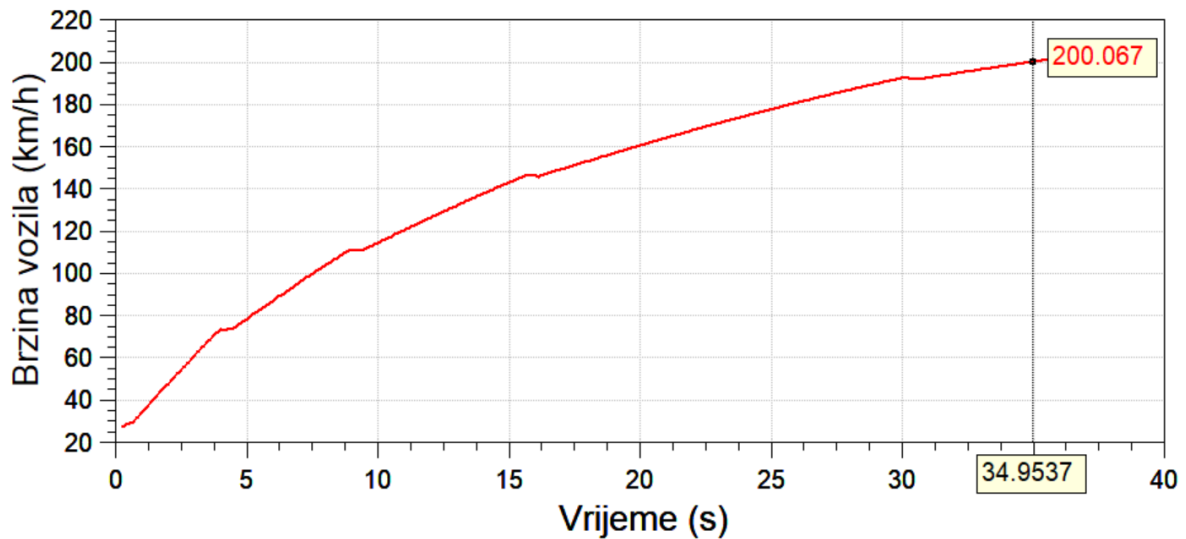
Za vozilo s originalnim motorom prvo je provedena simulacija ubrzanja 0-100 km/h čiji su rezultati prikazani na slici 73.



Slika 73. Rezultati simulacije ubrzanja 0-100 km/h, originalni motor

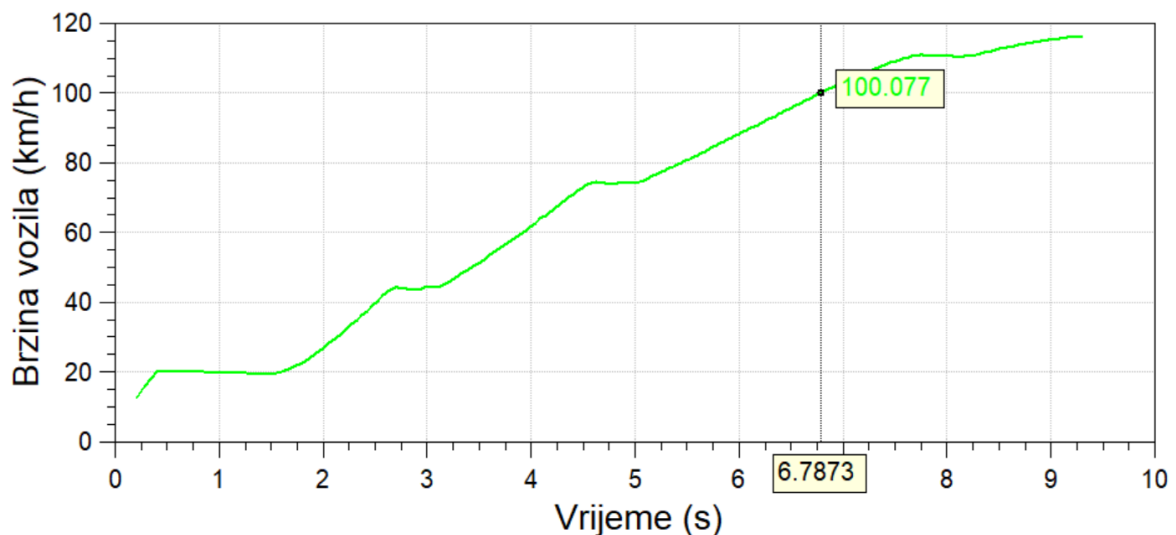
Gledajući raspored brzine vozila tijekom ubrzanja na slici 73. vidljivo je da je vozilu u simulaciji trebalo oko 8,2s kako bi postiglo brzinu od 100 km/h.

Rezultati simulacije ubrzanja 100-200 km/h vozila s originalnim motorom prikazani su na slici 74. Očitavanjem vremena s x-osi dijagrama prikazanog na slici 74. vidljivo je da je vozilu u simulaciji bilo potrebno oko 27,5s za ubrzanje 100-200 km/h.



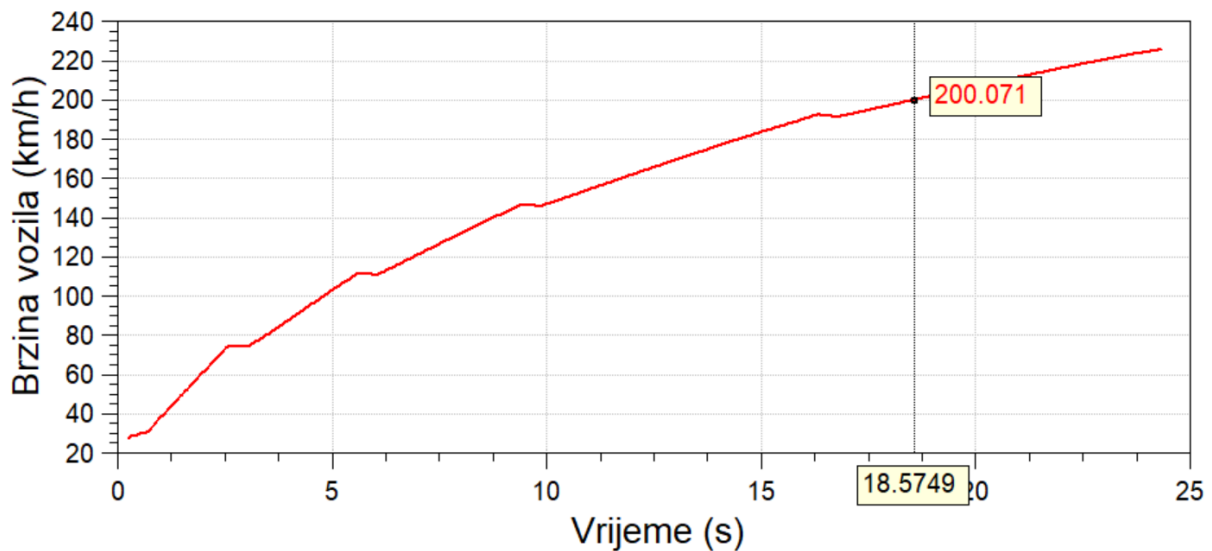
Slika 74. Rezultati simulacije ubrzanja 100-200 km/h, originalni motor

Jednako kao i za vozilo s originalnim motorom, provedene su simulacije ubrzanja i za vozilo s modificiranim motorom. Rezultati simulacije ubrzanja 0-100 km/h za vozilo s modificiranim motorom prikazani su na slici 75. Vrijeme ubrzanja ostvareno u simulaciji iznosilo je 6,8s.



Slika 75. Rezultati simulacije ubrzanja 0-100 km/h, modificirani motor

Slika 76. prikazuje rezultate simulacije ubrzanja 100-200 km/h za vozilo s modificiranim motorom. Vrijeme ubrzanja ostvareno u simulaciji iznosi oko 14s.



Slika 76. Rezultati simulacije ubrzanja 100-200 km/h, modificirani motor

7.3 Usporedba simulacije ubrzanja s izmjerima na stvarnom vozilu

Tablica 9. prikazuje usporedbu vrijednosti ubrzanja izmjerenim na stvarnom vozilu i onih simuliranih u programskom paketu AVL Boost.

Tablica 9. Usporedba izmjerenih i simuliranih vremena ubrzanja

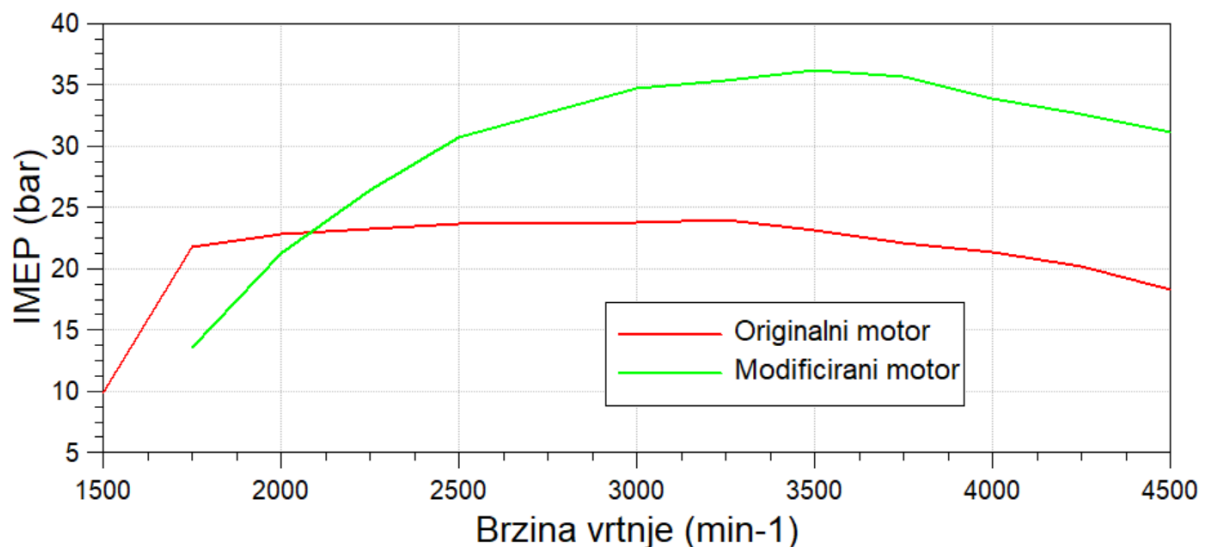
Ubrzanje	Ubrzanje stvarnog vozilu	Ubrzanje simulirano u AVL Boost-u	Razlika, apsolutna	Razlika, postotna
0-100 km/h, originalan motor	8,3 s	8,2 s	- 0,1 s	- 1,2 %
0-100 km/h, modificiran motor	7,0 s	6,8 s	- 0,1 s	- 1,4 %
100-200 km/h, originalan motor	30,9 s	27,5 s	- 3,4 s	- 11 %
100-200 km/h, modificiran motor	15,5 s	14 s	- 1,5 s	- 9,7 %

Uspoređujući vrijednosti iz tablice 9. vidljivo je da se vrijednosti ubrzanja 0-100 km/h približno podudaraju za stvarne izmjerene i simulirane vrijednosti, odn. da je razlika tek nešto veća od 1%. Nešto veće razlike uočljive su kod slučaja ubrzanja 100-200 km/h gdje se razlike kreću oko 10%.

8. Analiza ostvarenih rezultata

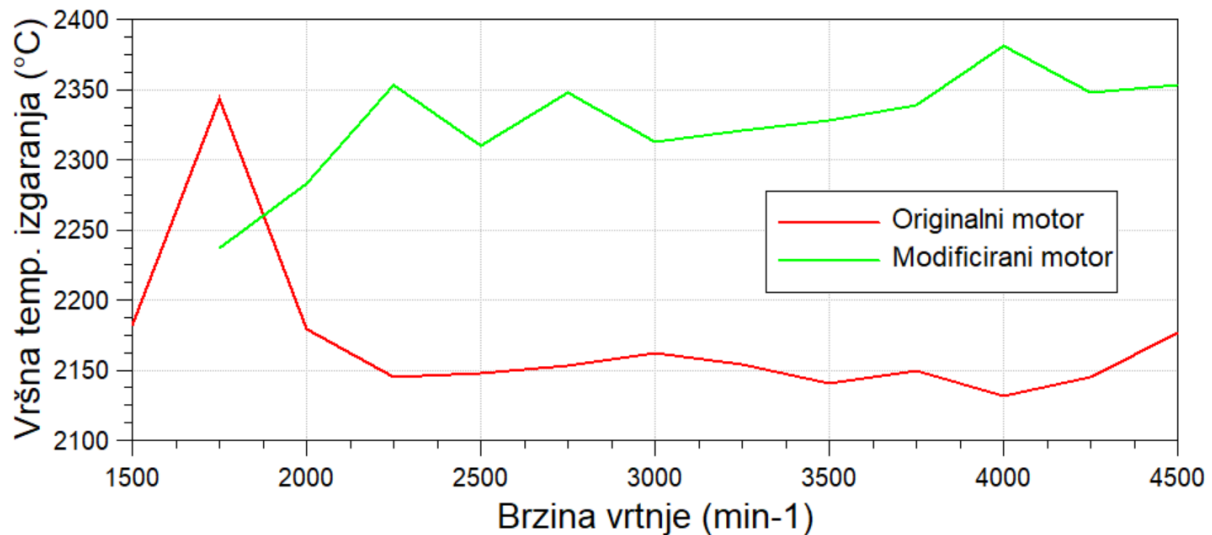
U ovom poglavlju napravljena je analiza utjecaja modifikacija napravljenih na motoru na srednji indicirani tlak, vršnu temperaturu i tlak izgaranja, duljinu izgaranja, emisiju čađe, dušikovih oksida, te ugljikovog monoksida, specifičnu potrošnju goriva i efektivni stupanj djelovanja. Na idućim dijagramima crvenim krivuljama prikazane su vrijednosti za originalni motor, a zelenim za modificirani.

Slika 77. prikazuje usporedbu srednjeg indiciranog tlaka originalnog i modificiranog motora. Kako krivulje srednjeg indiciranog tlaka približno prate krivulje srednjeg efektivnog momenta iz ranijih poglavlja, rezultati su očekivani, odn. koliko modificirani motor u pojedinom području ima veći efektivni moment, razmjerno tome mu je veći i srednji indicirani tlak.



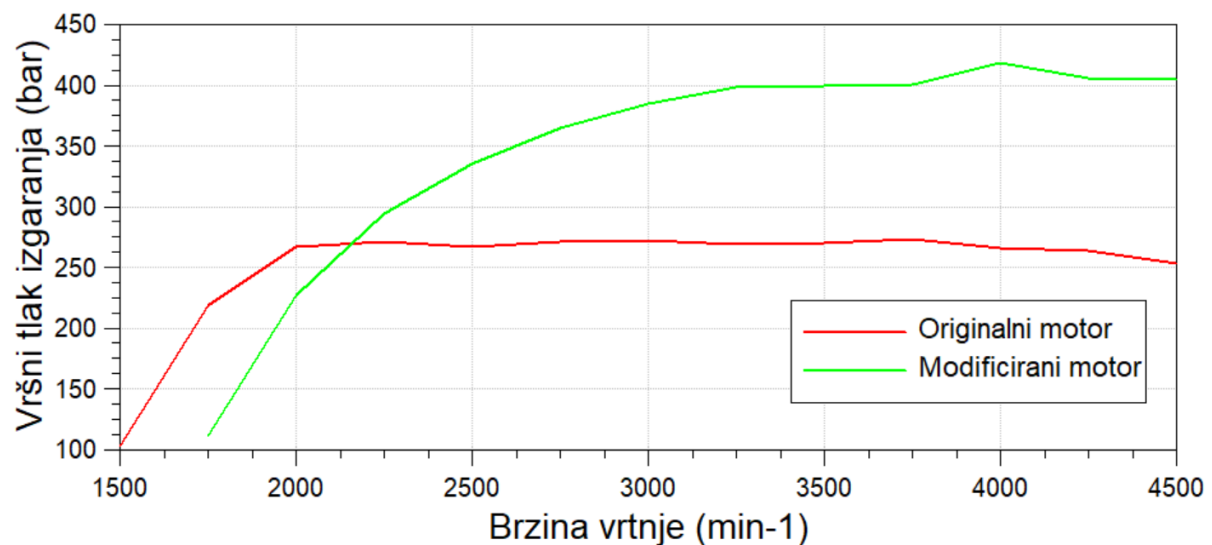
Slika 77. Usporedba srednjeg indiciranog tlaka originalnog i modificiranog motora

Slika 78. prikazuje dijagram usporedbe vršne temperature izgaranja originalnog i modificiranog motora. Obzirom na vršnu vrijednost u slučaju originalnog motora za radnu točku 1750 min⁻¹ uzrokovanu nešto bogatijom smjesom goriva i zraka u toj točki, zaključuje se kako bogatstvo smjese najviše utječe na navedeni parametar. Kako je kod slučaja modificiranog motora smjesa goriva i zraka nešto bogatija nego kod originalnoga, tako je i vršna temperatura izgaranja u većem dijelu raspona brzine vrtnje motora oko 300°C veća.



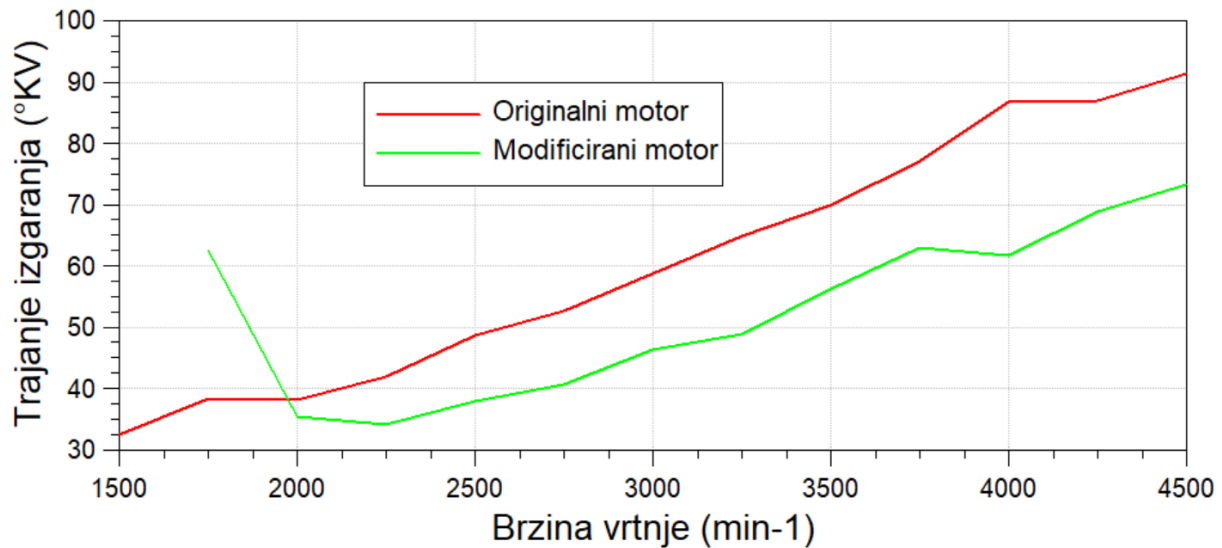
Slika 78. Usporedba vršne temperature izgaranja originalnog i modificiranog motora

Znatno veće razlike vidljive su u slučaju usporedbe vršnih vrijednosti tlaka izgaranja prikazane na slici 79. Vršna vrijednost tlaka izgaranja kod modificiranog motora, kao i u usporedbi vrijednosti srednjeg indiciranog tlaka, otprilike je razmjerno veća toliko koliko modificirani motor ima veću efektivnu snagu.



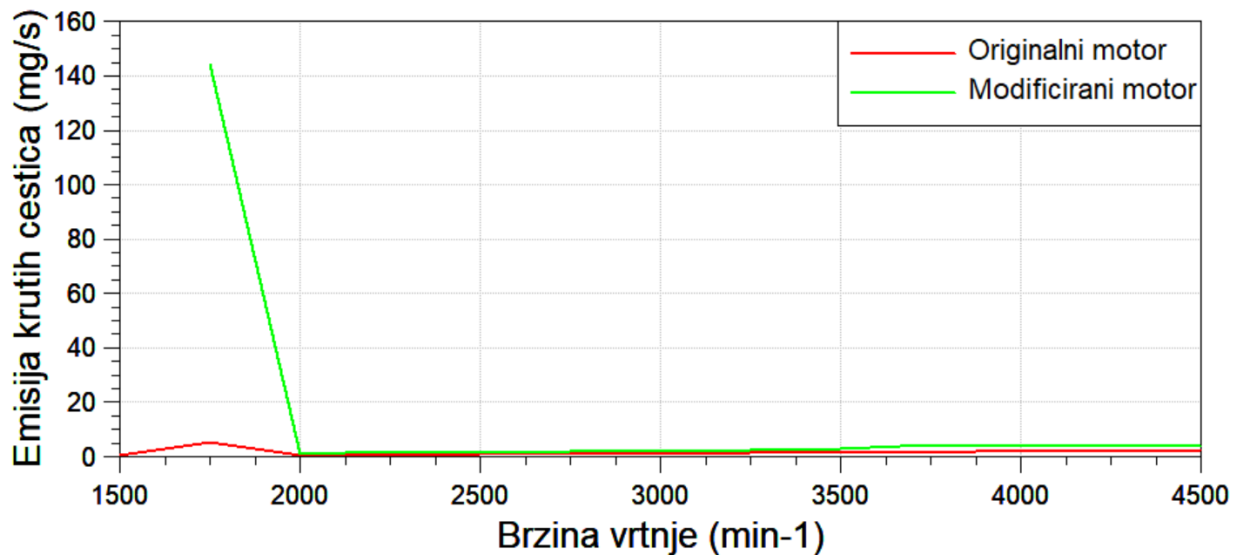
Slika 79. Usporedba vršnog tlaka izgaranja za originalni i modificirani motor

Slika 80. prikazuje usporedbe trajanja izgaranja za originalni i modificirani motor. Zanimljivo je da je kod modificiranog motora trajanje izgaranja unatoč osjetno većoj masi ubrizgavanja goriva po ciklusu zapravo kraće nego kod originalnog motora. Obzirom da je tendencija promjena vrijednosti krivulja slična onima kao kod usporedbe vršne temperature izgaranja, može se reći da bogatstvo smjese goriva i zraka i u ovom slučaju igra veliku ulogu.



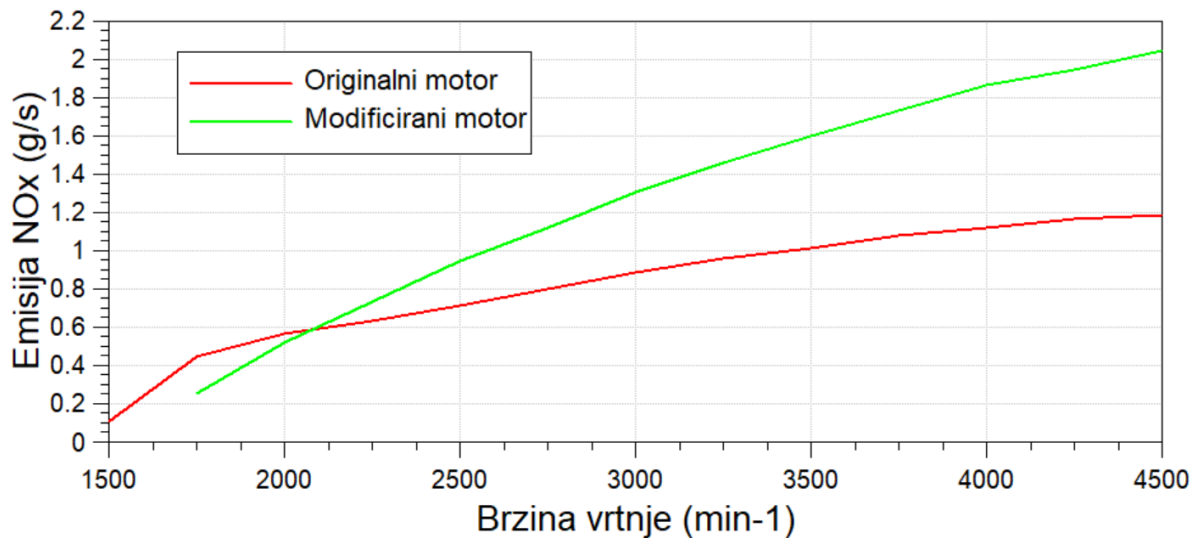
Slika 80. Usporedba trajanja izgaranja za originalni i modicirani motor

Slika 81. pokazuje usporedbu vrijednosti emisija čađe za originalni i modificirani motor. Izuzev radne točke 1750 min⁻¹ kod modificiranog motora, emisija čađe kroz raspon brzine vrtnje motora i kod modificiranog motora ne odskaje znatno od one kod originalnog, unatoč osjetno većem protoku zraku, većoj masi ubrizgavanja goriva, te nešto bogatijoj smjesi goriva i zraka.



Slika 81. Usporedba emisije čađe za originalni i modificirani motor

Nešto osjetnije razlike vidljive su kod usporedbe emisije dušikovih oksida originalnog i modificiranog motora prikazane na slici 82. Kod modificiranog motora vidljive su veće emisije dušikovih oksida, što je obzirom na otprilike 300°C veće vršne temperature izgaranja i očekivano.



Slika 82. Usporedba emisije dušikovih oksida originalnog i modificiranog motora

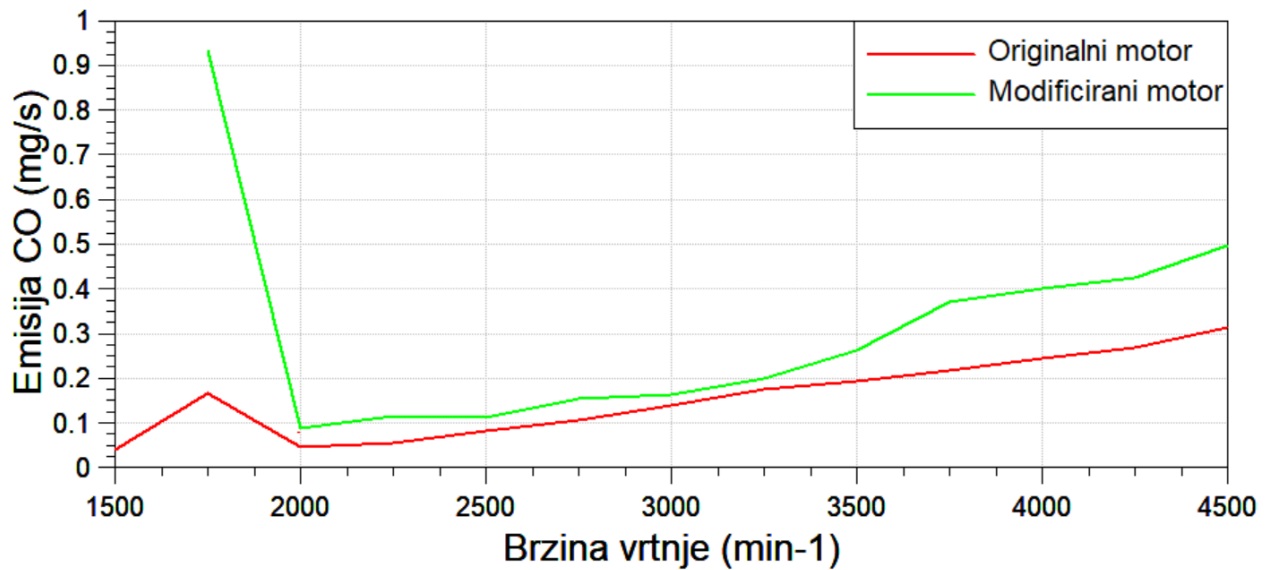
Zanimljivo je usporediti specifične vrijednosti emisije dušikovih oksida, odn. podijeliti vrijednosti iz slike 82. sa efektivnom snagom motora kako je prikazano u tablici 10.

Tablica 10. Izračun specifične emisije dušikovih oksida

	Originalni motor	Modificirani motor
NOx @ 4000 min ⁻¹	1,1 g/s = 3960 g/h	1,9 g/s = 6840 g/h
Efektivna snaga @ 4000min ⁻¹	176 kW	302 kW
Specifična emisija NOx	22,5 g/kWh	22,6 g/kWh

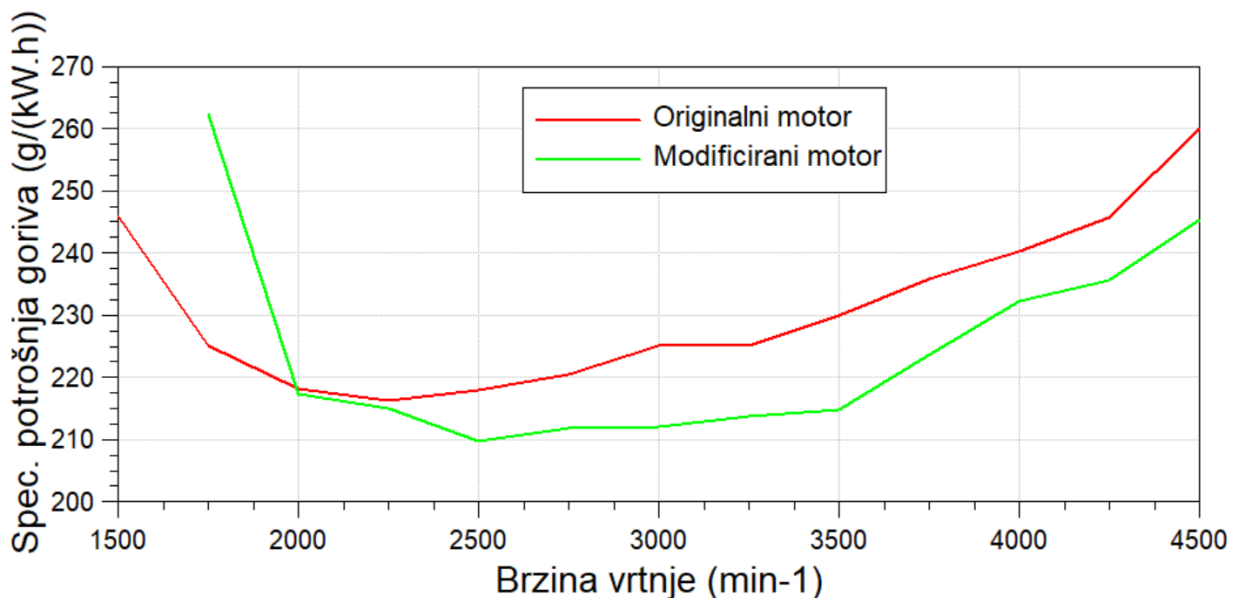
Vidljivo je da iako je emisija dušikovih oksida kod modificiranog motora po apsolutnoj vrijednosti znatno veća nego kod originalno, uzme li se u obzir razlika u efektivnoj snazi, specifična vrijednost emisije dušikovih oksida zapravo ostaje gotovo jednaka.

Slika 83. prikazuje usporedbu emisije ugljikovog monoksida originalnog i modificiranog motora. Vidljivo je da je kod modificiranog motora vrijednost emisije dušikovih oksida osjetno veća.



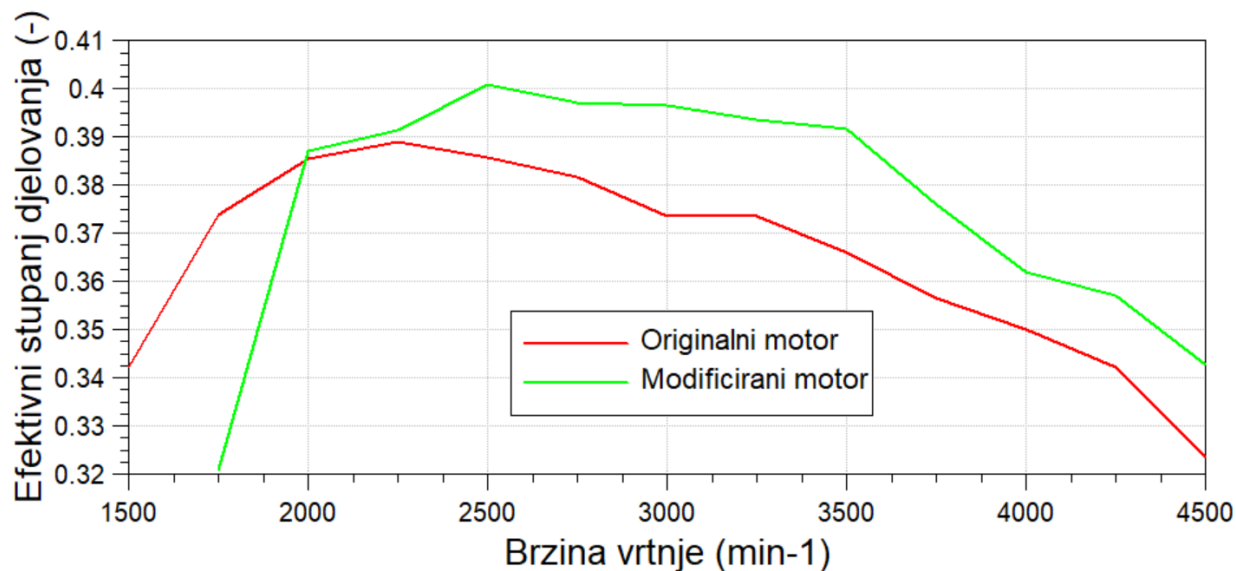
Slika 83. Usporedba emisije ugljikovog monoksida originalnog i modificiranog motora

Na kraju, ostaje još za promotriti usporedbu specifične potrošnje goriva za originalni i modificirani motor prikazanu na slici 84., te usporedbu efektivnog stupnja djelovanja prikazanu na slici 85. Kako su navedene dvije veličine direktno povezane jedna s drugom, odn. manja specifična potrošnja će značiti veći efektivni stupanj djelovanja, za oba dijagrama vrijediti će slična zapažanja.



Slika 84. Usporedba specifične potrošnje goriva originalnog i modificiranog motora

Vidljivo je da je promjenom radnih uređaja motora radno područje motora s najvećim efektivnim stupnjem djelovanja, odn. najmanjom specifičnom potrošnjom goriva pomaknuto u prostor većih brzina vrtnje motora. Zanimljivo je i da modificirani motor na punom opterećenju od 2250 min⁻¹ sve do 4500 min⁻¹ ima veći efektivni stupanj djelovanja od originalnoga.



Slika 85. Usporedba efektivnog stupnja djelovanja originalnog i modificiranog motora

9. Zaključak

U sklopu rada je unutar programskog paketa AVL Boost napravljen model stvarnog Dieselog motora. Model je uspoređen sa vrijednostima izmjerenim na stvarnom motoru kako bi se potvrdilo da model vjerno simulira stvarni motor. Uspoređivane vrijednosti uključivale su vrijednosti izmjerene pomoću dijagnostičkog priključka (OBD *log*) te efektivnu snagu i efektivni moment motora. U većini promatranih veličina, kao što su maseni protok zraka, tlak zraka, masa ubrizgavanja goriva, točka početka ubrizgavanja goriva i faktor pretička zraka, ostvareno je vrlo blisko podudaranje između simuliranih i izmjerenih vrijednosti, uz manja odstupanja koja su se obično javljala na rubnim (1500 i 4500 min^{-1}) brzinama vrtnje motora. Jedina veličina kod koje nije ostvareno podudaranje je temperatura ispušnih plinova, no uzrok tome su ograničenja termodinamičkog modela uzrokovana nedostupnosti svih tehničkih podataka o stvarnom motoru. Uspoređivanjem mjerenja i simulacije efektivne snage i momenta ostvareno je podudaranje u granicama 1-2%.

Nakon toga na stvarnom motoru su provedene izmjene radnih uređaja i radnih mapa računala motora s ciljem povećanja efektivne snage i momenta motora. U radu je detaljno objašnjen način odabira izmjenjenih radnih uređaja i njihov utjecaj na rad motora. Izmjenom radnih uređaja motora ostvareno je povećanje efektivne snage motora od 75% i povećanje efektivnog momenta motora od 57%. Izmjene radnih uređaja na stvarnom motoru popraćene su izmjenom modela u programskom paketu AVL Boost. Vrijednosti dobivene simulacijom ponovno su uspoređene s vrijednostima izmjerenima na stvarnom vozilu. Simulacijski model motora omogućio je uspoređivanje vrijednosti koje se nisu mogle izmjeriti na stvarnom motoru, kao što su je npr. vršni tlak izgaranja ili emisija štetnih plinova, čime je dobiven dublji uvid na utjecaj koji je izmjena radnih uređaja imala na motor. Razlika srednjeg indiciranog tlaka i vršnog tlaka izgaranja otprilike je bila razmjerna razlici efektivnog momenta. Vršne temperature izgaranja kod modificiranog motora bile su otprilike 200°C veće, što je utjecalo i na otprilike 70% veće emisije dušikovih oksida na punom opterećenju. Najniže vrijednosti specifične potrošnje goriva pri punom opterećenju bile su oko 5% niže kod modificiranog motora, što je rezultiralo i nešto većim efektivnim stupnjem djelovanja, iako, treba napomenuti da su ove vrijednosti zbog znatno drugačijih karakteristika modificiranih radnih uređaja motora ostvarene u rasponu većih brzina vrtnje nego kod originalnog motora.

Dodatno, izmjereno je i ubrzanje vozila prije i nakon modifikacija motora, te su dobivene vrijednosti uspoređene sa simulacijom ubrzanja vozila provedenoj u programskom paketu AVL Boost. Pri ubrzanju 0-100 km/h nakon modifikacija ostvareno je oko 20% kraće vrijeme ubrzanja, a pri ubrzanju 100-200 km/h oko 50% kraće vrijeme ubrzanja. Simulacija ubrzanja 0-100 km/h podudarala se onim izmjerenim u rasponu oko 1%, dok su kod simulacije ubrzanja 100-200 km/h dobivene vrijednosti ubrzanja oko 10% manje nego u stvarnosti.

Zaključeno je da je prikladno odabranom izmjenom radnih uređaja motora moguće postići veću efektivnu snagu motora pa čak i veći efektivni stupanj djelovanja, no to povećanje dolazi s znatno drugačijom krivuljom snage u odnosu na raspon brzine vrtnje motora. Također, unatoč većoj efektivnoj snazi, emisije štetnih plinova ili čestica nisu porasle više nego bi to bilo očekivano, odn. njihove specifične vrijednosti ostale su približno jednake onima originalnoga motora. Može se reći da se fizičkim izmjerima, dostupnim tehničkim informacijama i korištenjem stvarnih upravljačkih mapa računala motora može izraditi termodinamički model koji vjerno simulira stvarni motor. Precizniji model koji bi davao još točnije rezultate mogao bi se izraditi poznavanjem mape kompresora i turbine turbopunjača te točnom krivuljom podizanja ventila.

10.LITERATURA

- [1] – Self-study Programme 350, The 3.0l V6 TDI engine, Design and function, Volkswagen AG, Wolfsburg, 03.2005.
- [2] – Self-study Programme 351, The common rail fuel injection system fitted in the 3.0l V6 TDI engine, Design and function, Volkswagen AG, Wolfsburg, 07.2005.
- [3] – Self-study Program 941803, Audi 3.0-liter V6 TDI, Audi of America, 03.2009.
- [4] - [Phaeton 2nd Generation | Volkswagen Newsroom \(volkswagen-newsroom.com\)](https://www.volkswagen-newsroom.com) (23.10.2024.)
- [5] - [Software WinOLS \(evc.de\)](https://www.evc.de) (23.10.2024.)
- [6] - [logger \[VehiCAL Documentation\]](#) (23.10.2024.)
- [7] - [Tactrix](#) (23.10.2024.)
- [8] - [DynoRoad: Car power test available via App - MAGICMOTORSPORT Official Website](#) (25.10.2024.)
- [9] - [Road Dynamometer for Professionals - DynoPRO](#) (25.10.2024.)
- [10] – Garrett Performance Catalog Vol 8, 2021. Garrett Motion Inc.
- [11] - [Mini | RaceBox](#) (08.11.2024.)
- [12] – Konstrukcije motora, Priprema smjese kod Diesellovih motora, FSB