

Utjecaj nasumičnog isključivanja cilindara na potrošnju goriva pri vožnji standardiziranim voznim ciklusom

Jakoplić, Marijo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:439934>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marijo Jakoplić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Marijo Jakoplić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Momiru Sjeriću na svim korisnim savjetima, materijalima i pomoći prilikom pisanja ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem majci Nevenki i ocu Željku na pruženoj financijskoj i moralnoj podršci tijekom studiranja.

Također, zahvaljujem se mojoj djevojci Josipi, sestri Željki i svim prijateljima koji su bili uz mene tokom cijelog studija.

Marijo Jakoplić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Marijo Jakoplić

Mat. br.: 0035204574

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj nasumičnog isključivanja cilindara na potrošnju goriva pri
vožnji standardiziranim voznim ciklusom**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Influence of Random Cylinder Deactivation on the Fuel Consumption
over the Standardized Vehicle Drive Cycle**

Opis zadatka:

Sustav nasumičnog isključivanja cilindara predstavlja naprednu tehnologiju kojom se deaktivacija pojedinih cilindara provodi na razini pojedinih ciklusa kod višecilindarskih motora. Pri tome se ostvaruje željeni efektivni moment motora uz povoljniju potrošnju goriva te uz zadovoljavanje zahtjeva u pogledu buke, vibracija i odziva u radu motora. Razvijeni sustav je pokazao značajno poboljšanje u potrošnji goriva, a moguće ga je primijeniti na Ottove i dizelske motore.

U sklopu završnog rada potrebno je:

- Proučiti i opisati postojeći sustav za nasumično isključivanje cilindara.
- Odabrati višecilindarski Ottov motor i vozilo koje se pokreće tim motorom te prikupiti podatke koji su potrebni za izradu simulacijskog modela.
- Provesti simulaciju rada motora za puno i djelomična opterećenja uz različiti broj isključenih cilindara u programskom paketu AVL Boost™, uz kontroliranje pojave detonantnog izgaranja.
- Izraditi i usporediti topografske dijagrame specifične efektivne potrošnje goriva za različite razine isključenosti cilindara.
- Uz definiranu strategiju isključivanja cilindara provesti analizu vožnje po standardiziranom voznom ciklusu i izračunati potrošnju goriva.
- Usporediti rezultate s rezultatima ostvarenim bez isključivanja cilindara.
- Iznijeti zaključke o ostvarenim simulacijskim rezultatima i njihovoj usporedbi.

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

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

M. Sjerić

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

Igor Balen

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
KRATICE	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. SVRHA ISKLJUČIVANJA CILINDARA	2
2.1. Razdioba energije u motoru	2
2.2. Primjeri konstrukcijskih rješenja isključivanja cilindra	4
2.2.1. Isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom	5
2.2.2. Isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila	5
2.2.3. Isključivanje ventila pomičnim brijegom bregastog vratila	7
2.2.4. Isključivanje ventila pomoću UniAir sustava	7
3. SUSTAV NASUMIČNOG ISKLJUČIVANJA CILINDARA (DSF TEHNOLOGIJA) ..	8
3.1. Princip rada	8
3.2. Smanjenje potrošnje goriva	9
3.3. Implementacija DSF tehnologije na motor	9
4. STANDARDIZIRANI VOZNI CIKLUS	11
4.1. NEDC (eng. New European Driving Cycle)	11
5. SIMULACIJSKI MODEL	13
5.1. Odabir vozila za proračun	13
5.1.1. Otpor kotrljanja	13
5.1.2. Otpor zraka	14

5.1.3. Otpor ubrzanja	14
5.1.4. Podaci vozila potrebni za proračun NEDC standardiziranog voznog ciklusa	15
5.2. Značajke motora korištenog u simulaciji	17
5.3. Opis simulacijskog modela u programskom paketu AVL BOOST™	18
5.3.1. Dvozonski Vibeov model izgaranja	19
5.3.2. Model detonatnog izgaranja	19
5.3.3. Kalibracija simulacijskog modela	19
5.3.4. Način provedbe djelomičnih opterećenja unutar simulacije	21
5.3.5. Način gašenja pojedinih cilindara tijekom rada simulacije	22
6. REZULTATI	23
6.1. Prikaz topografskih dijagrama specifične efektivne potrošnje goriva za različite razine isključenosti cilindara	24
6.2. Odabir radne mape motora s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva	26
6.3. Analiza vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC	27
6.3.1. Prikaz dobivenih rezultata potrošnje goriva	31
7. ZAKLJUČAK	34
LITERATURA	35
PRILOZI	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Indikatorski dijagram Ottovog i Diesellovog motora kod punog opterećenja (100%) i u praznom hodu (0%) [1]	4
Slika 2. Sustav pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom za slučaj uključenih cilindara [2]	5
Slika 3. Sustav pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom za slučaj isključenih cilindara [2]	5
Slika 4. Sustav pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila za slučaj uključenih cilindara [3]	6
Slika 5. Sustav pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila za slučaj isključenih cilindara [3]	6
Slika 6. Sustav s pomičnim brijegom bregastog vratila [4]	7
Slika 7. Sustav isključivanja ventila pomoću UniAir [5]	7
Slika 8. Primjer paljenja cilindara s DSF tehnologijom za 4-cilindrični motor [7]	8
Slika 9. Elementarni ECE 15 ciklus [10]	11
Slika 10. EUDC ciklus [10]	12
Slika 11. NEDC vozni ciklus [10]	12
Slika 12. Audi A3 2004 [12]	13
Slika 13. Dijagram faktora rotirajućih masa	16
Slika 14. Motor 2.0 FSI [13]	17
Slika 15. Simulacijski model u programskom paketu AVL BOOST TM	18
Slika 16. Prikaz oktanskog broja kod punog opterećenja	19
Slika 17. Usporedba deklarirane i simulacijske vrijednosti efektivnog momenta motora	20
Slika 18. Usporedba deklarirane i simulacijske vrijednosti efektivne snage motora	20
Slika 19. Prikaz konvergencije srednjeg efektivnog tlaka	21
Slika 20. Prikaz konvergencije kuta zaklopke	21
Slika 21. Modificirani simulacijski model s mogućnošću gašenja pojedinog cilindra u programskom paketu AVL BOOST TM	22
Slika 22. Krivulje efektivnog momenta za različite kontinuirane razine isključenosti cilindara	23
Slika 23. Krivulje efektivne snage za različite kontinuirane razine isključenosti cilindara	23
Slika 24. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 4 aktivna cilindra	24
Slika 25. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 3 aktivna cilindra	24

Slika 26. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 2 aktivna cilindra	25
Slika 27. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 1 aktivan cilindar	25
Slika 28. Mapa motora s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva u ovisnosti o razini isključenosti cilindara.....	26
Slika 29. Relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva	27
Slika 30. Prikaz radnih točaka NEDC ciklusa	28
Slika 31. Prikaz otpora ubrzanja	28
Slika 32. Prikaz otpora kotrljanja i otpora zraka.....	29
Slika 33. Prikaz ovisnosti brzine vrtnje motora o vremenu	29
Slika 34. Prikaz ovisnosti efektivnog momenta o vremenu.....	30
Slika 35. Prikaz ovisnosti ubrzanja o vremenu	30
Slika 36. Prikaz potrošnje goriva prilikom gradske vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC.....	31
Slika 37. Prikaz potrošnje goriva prilikom vožnje otvorenom cestom po standardiziranom voznom ciklusu NEDC	32
Slika 38. Prikaz potrošnje goriva prilikom kombinirane vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC	32
Slika 39. Prikaz uštede potrošnje goriva.....	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavni podaci o vozilu [14]	15
Tablica 2. Očitani faktori rotirajućih masa za pojedini stupanj prijenosa	16
Tablica 3. Glavni podaci motora 2.0 FSI [14]	17

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Čeona površina vozila
a	m/s^2	Ubrzanje vozila
c_w	-	Faktor otpora zraka
D	mm	Promjer klipa
$d_{v,i}$	mm	Promjer ispušnog ventila
$d_{v,u}$	mm	Promjer usisnog ventila
F_a	N	Sila otpora ubrzanja
F_k	N	Sila otpora kotrljanja
F_z	N	Sila otpora zraka
$f_{k,1}$	-	Faktor otpora kotrljanja
$f_{k,2}$	-	Faktor otpora kotrljanja
$f_{k,3}$	-	Faktor otpora kotrljanja
g	m/s^2	Ubrzanje gravitacije
g_e	g/kWh	Specifična efektivna potrošnja goriva
H	mm	Hod klipa
H_d	MJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost goriva
$i_{m,1}$	-	Prijenosni omjer 1. brzine
$i_{m,2}$	-	Prijenosni omjer 2. brzine
$i_{m,3}$	-	Prijenosni omjer 3. brzine
$i_{m,4}$	-	Prijenosni omjer 4. brzine
$i_{m,5}$	-	Prijenosni omjer 5. brzine
$i_{m,6}$	-	Prijenosni omjer 6. brzine
i_{or}	-	Prijenosni omjer diferencijala
$k_{m,i}$	-	Faktor rotirajućih masa
l	mm	Duljina klipnjače
M_e	Nm	Efektivni moment
$m_{G,h}$	l/h	Satna potrošnja goriva u praznom hodu
m_v	kg	Masa praznog vozila
$n_{v,i}$	-	Broj ispušnih ventila po cilindru

$n_{v,u}$	-	Broj usisnih ventila po cilindru
n_{min}	1/min	Brzina vrtnje praznog hoda
P_e	kW	Efektivna snaga
P_i	kW	Inducirana snaga
P_m	kW	Snaga mehaničkih gubitaka
p_e	bar	Srednji efektivni tlak
p_i	bar	Srednji indicirani tlak
p_m	bar	Srednji tlak mehaničkih gubitaka
r_d	m	Dinamički radijus kotača
Q_1	J	Dovedena toplina
Q_2	J	Odvedena toplina
T	-	Broj taktova
v	m/s	Brzina vožnje
V_H	cm ³	Radni volumen
W_e	J	Efektivni rad
W_i	J	Indicirani rad

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
α	°	Kut uspona podloge
ε	-	Kompresijski omjer
η_e	-	Efektivni stupanj djelovanja
η_i	-	Indicirani stupanj djelovanja
η_m	-	Mehanički stupanj djelovanja
η_t	-	Termički stupanj djelovanja
ρ_g	kg/m ³	Gustoća goriva
ρ_z	kg/m ³	Gustoća zraka

KRATICE

BMEP	Srednji efektivni tlak (<i>eng. Brake Mean Effective Pressure</i>)
OB	Oktanski broj (<i>eng. Octane Number</i>)
DSF	Sustav nasumičnog isključivanja cilindara (<i>eng. Dynamic Skip Fire</i>)
CL1	Filter zraka (<i>eng. Air Cleaner</i>)
TH1	Zaklopka (<i>eng. Throttle</i>)
PL1 - PL2	Volumenski prostor (<i>eng. Plenum</i>)
C1 - C4	Cilindar (<i>eng. Cylinder</i>)
R	Restriktor (<i>eng. Restriction</i>)
CAT1 - CAT3	Katalizator (<i>eng. Catalyst</i>)
FD	Gustoća paljenja (<i>eng. Firing Density</i>)

SAŽETAK

U pogledu smanjivanja potrošnje goriva, svi proizvođači motora s unutarnjim izgaranjem nastoje povećati stupanj djelovanja samog motora. Jedno od rješenja je sustav isključivanja cilindara. Isključivanjem rada jednog ili više cilindara, motor radi u povoljnijem režimu rada kako bi se postigla što manja potrošnja goriva, posebno pri niskom opterećenju i manjim brzinama vrtnje. Istodobno, pri većim opterećenjima i većim brzinama vrtnje, svi cilindri su uključeni, što znači da korisnik i dalje raspolaže dovoljno snažnim motorom u pogledu performansi vozila.

U ovom radu opisan je sustav nasumičnog isključivanja cilindara, DSF, gdje se deaktivacija pojedinih cilindara provodi na razini pojedinih ciklusa. Pri tome se ostvaruje željeni efektivni moment motora uz povoljniju potrošnju goriva. U programskom paketu AVL BOOST™ izrađen je simulacijski modeli u kojem su analizirane 4 razine isključenosti cilindara koje predstavljaju ekvivalent gustoće paljenja od 25, 50, 75 i 100%. Model motora podešen je tako da daje približne rezultate objavljene od strane proizvođača. Izrađeni su topografski dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva za različite razine isključenosti cilindara. Na temelju rezultata iz dijagrama specifične efektivne potrošnje goriva izrađena je optimalna radna mapa motora. S tom optimalnom radnom mapom motora provedena je analiza vožnje po standardiziranom voznom ciklusu te izračunata potrošnja goriva. Na temelju dobivenih rezultata prikazana je ušteda potrošnje goriva.

Ključne riječi: isključivanje cilindara, DSF, AVL BOOST™, potrošnja goriva, NEDC

SUMMARY

In terms of reducing fuel consumption, all manufacturers of internal combustion engines strive to increase the efficiency of the engine itself. One solution is a cylinder deactivation system. By deactivating one or more cylinders, the engine operates in a more favorable mode to achieve the lowest possible fuel consumption, especially at low loads and lower speeds. At the same time, at higher loads and higher speeds, all cylinders are engaged, which means that the user still has a sufficiently powerful engine in terms of vehicle performance.

This paper describes a system named random cylinder deactivation, DSF, where the deactivation of individual cylinders is carried out at the level of individual cycles. This achieves the desired effective torque of the engine with more favorable fuel consumption. In the AVL BOOSTTM software package, a simulation model was made in which 4 levels of cylinder deactivation were analyzed, which represent the equivalent fire density of 25, 50, 75 and 100%. The engine model is set to give approximate results published by the manufacturer. Topographic diagrams of specific effective fuel consumption for different levels of cylinder deactivation have been made. Based on the results from the specific effective fuel consumption diagram, an optimal working map of the engine was made. With this optimal working map of the engine, the analysis of driving according to the standardized driving cycle was performed and the fuel consumption was calculated. Based on the obtained results, fuel consumption savings are shown.

Key words: cylinder deactivation, DSF, AVL BOOSTTM, fuel consumption, NEDC

1. UVOD

U posljednje vrijeme električni automobili postali su veliki trend među korisnicima, ali isto tako je i neupitno da će motori s unutarnjim izgaranjem još dugo biti glavni pogon u automobilima. Uz performanse vozila i njegovu cijenu, korisnike uglavnom zanima i njegova potrošnja goriva na 100 km. Na proizvođače automobila se tako nameće zahtjev smanjivanja potrošnje goriva uz zadržavanje ili poboljšanje performansi. Popularan način ostvarivanja tih zahtjeva je smanjivanje radnog volumena motora, ali radni volumen može se smanjiti samo do neke prihvatljive vrijednosti. U praksi se tako sve više primjenjuje opcija smanjenja broja aktivnih cilindara prilikom rada samog motora. Isključivanjem rada jednog ili više cilindara, motor radi u povoljnijem režimu rada kako bi se postigla što manja potrošnja goriva, posebno pri niskom opterećenju i manjim brzinama vrtnje. Ostvaruju se manji gubici uslijed trenja u motoru i izmjene radnog medija. Pri tome se zadovoljavaju zahtjevi u pogledu buke, vibracije i odziva u radu motora. Istodobno, pri većim opterećenjima i većim brzinama vrtnje, svi cilindri su uključeni, što znači da korisnik i dalje raspolaže dovoljno snažnim motorom u pogledu performansi vozila. Važan kriterij za uspjeh tehnologije isključivanja cilindara, odnosno za njezinu primjenu u različitim Ottovim i dizelskim motorima, je njezina jednostavna integracija u postojeće konstrukcijske izvedbe motora uz minimalne modifikacije i troškove.

U ovom završnom radu promatrat će se sustav nasumičnog isključivanja cilindara DSF te njegova primjena na neko odabrano vozilo u pogledu uštede potrošnje goriva. Za korišteni motor u tom vozilu, kroz simulacijski proračun proveden u programskom paketu AVL BOOST™, bit će dobiveni podaci o specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva u cijeloj radnoj mapi motora za različite kontinuirane razine isključenosti cilindara. Simulacijski proračun bit će proveden kao slučajevi sa kontinuiranim isključivanjem cilindara, s ciljem pokazivanja radnih zona pojedinih cilindara u cjelokupnoj mapi motora. Ti podaci, zajedno sa podacima o odabranom vozilu, će tada služiti za izračunavanje potrošnje goriva prilikom vožnje standardiziranim voznim ciklusom u programskom paketu Microsoft Excel. U radu će također biti prikazana kalibracija motora u odnosu na deklarirane vrijednosti da bi dobiveni rezultati bili relevantni.

2. SVRHA ISKLJUČIVANJA CILINDARA

U ovom dijelu rada bit će objašnjena razdioba energije u motoru te svrha gašenja cilindra tijekom rada samog motora. Također, bit će prikazana neka konstrukcijska rješenja isključivanja cilindra.

2.1. Razdioba energije u motoru

Termodinamički kružni procesi (idealni procesi) odvijaju se između ogrjevnog i rashladnog spremnika. Pritom se iz ogrjevnog spremnika u proces dovodi toplina Q_1 , a odvede se toplina Q_2 i mehanički rad W_t koji je jednak razlici ovih dviju toplina. Stupanj djelovanja idealnog procesa naziva se termičkim stupnjem djelovanja η_t i jednak je omjeru odvedenog rada i dovedene topline [1]:

$$\eta_t = \frac{W_t}{Q_1}. \quad (1)$$

U termodinamici motora ovakav se prikaz primjenjuje samo kod idealnih procesa koji su zatvoreni. Kod stvarnih, otvorenih procesa postupa se drugačije. Kao polazište se uzima zatvoreni kružni proces, a kao krajnji cilj stvaran proces u cilindru motora predstavljen indikatorskim dijagramom. Rad stvarnog procesa jednak je rezultirajućoj površini indikatorskog dijagrama i naziva se indiciranim radom W_i . Stupanj korisnog djelovanja stvarnog procesa u cilindru je indicirani stupanj djelovanja η_i koji je jednak omjeru indiciranog rada i dovedene topline [1]:

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_1}. \quad (2)$$

Ukupna korisnost motora se izražava na sukladan način efektivnim stupnjem djelovanja η_e koji se dobiva kao omjer odvedenog efektivnog rada W_e i gorivom dovedene topline Q_1 . [1]

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_1}. \quad (3)$$

Veličina mehaničkih gubitaka u motoru iskazuje se mehaničkim stupnjem djelovanja η_m , kao omjer efektivnog rada na spojci i indiciranog rada u cilindru, odnosno omjer odgovarajućih srednjih tlakova ili snaga [1]:

$$\eta_m = \frac{W_e}{W_i} = \frac{p_e}{p_i} = \frac{P_e}{P_i}. \quad (4)$$

Dakle, pojam indicirani se odnosi na veličine vezane uz proces u cilindru motora. Pojam

mehanički se odnosi na mehaničke gubitke u motoru a pojam efektivni na veličine vezane uz izlaz snage na spojci motora.

Ukupan efektivni stupanj djelovanja se može prikazati kao umnožak parcijalnih stupnjeva djelovanja [1]:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m. \quad (5)$$

U ovom radu bit će dosta spomenuta i specifična efektivna potrošnja goriva, ona je također dobar pokazatelj korisnosti motora, a dobiva se iz izraza [1]:

$$g_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot H_d}, \quad (6)$$

gdje je: g_e [g/kWh] – specifična efektivna potrošnja goriva, a H_d [MJ/kg] - donja ogrjevnost goriva.

Od indicirane snage P_i najprije se namiruje snaga za pokrivanje mehaničkih gubitaka P_m koja uključuje trenje u motoru i rad za pogon pomoćnih uređaja neophodnih za rad motora. Preostala snaga odvodi se na koljenastom vratilu motora, preciznije na spojci, a naziva se efektivnom snagom P_e . Prema tome, njihova međusobna veza glasi [1]:

$$P_i = P_e + P_m. \quad (7)$$

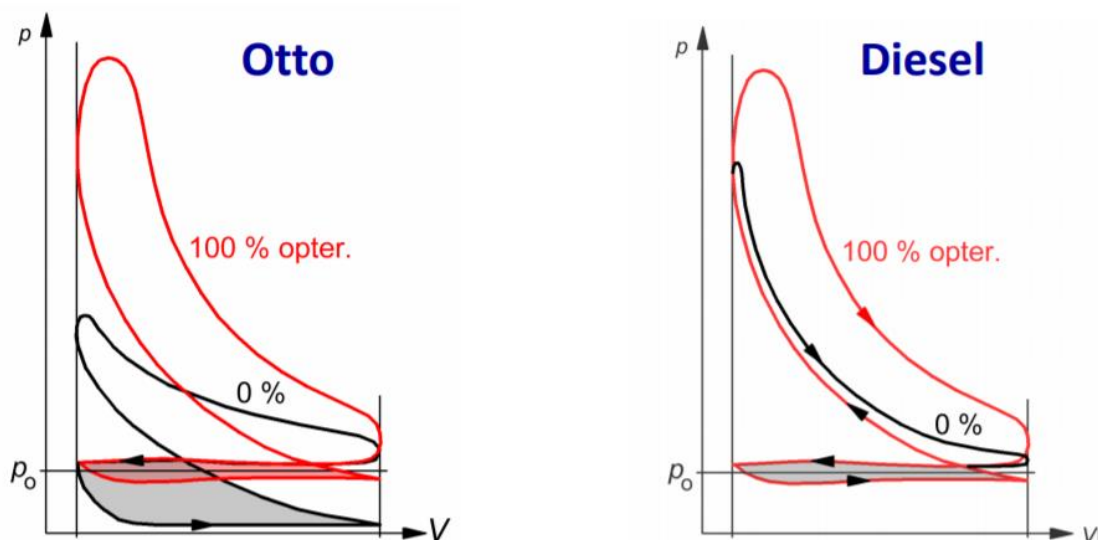
Ista veza vrijedi i za srednje tlakove procesa:

$$p_i = p_e + p_m. \quad (8)$$

Smanjenjem mehaničkih gubitaka pomoću isključivanja cilindra donosi povećanju efektivnog tlaka, a time i povećanje efektivnog stupnja djelovanja.

Promjena snage kod Otto motora vrši se prigušivanjem usisa pomoću zaklopke u usisnoj cijevi. Kod Diesel motora promjena snage vrši se promjenom količine ubrizganog goriva. Drugim riječima, Dieslov motor usisava uvijek istu količinu zraka bez obzira na opterećenje, a zbog promjene količine ubrizgavanog goriva mijenja se samo omjer goriva i zraka. Kod Ottovog motora s povećanjem prigušivanja usisa smanjuje se količina svježeg punjenja koje ulazi u cilindar. Zbog toga pada tlak u usisnoj cijevi iza zaklopke i u cilindru. Posljedice ovih različitih promjena snage Ottovog i Dieslovog motora vidljive su i na indikatorskim dijagramima na Slici 1. Kod Ottovog motora zbog prigušivanja usisa raste negativni rad izmjene radne tvari, prikazan osjenčanom površinom u indikatorskom dijagramu prikazanom na Slici 1. To znači da će kod rada bez opterećenja Ottovom motoru trebati više

goriva nego Dieselovom, odnosno trebat će veći pozitivni rad visokotlačnog dijela procesa da bi se njime nadoknadio veći negativni rad izmjene radne tvari. Ove razlike naročito dolaze do izražaja kod rada motora pri smanjenom opterećenju, npr. kod vožnje automobilom u uvjetima gradskog prometa.



Slika 1. Indikatorski dijagram Ottovog i Dieselovog motora kod punog opterećenja (100%) i u praznom hodu (0%) [1]

Kako se isključivanjem cilindara, radni cilindri dovode u područje većeg opterećenja, negativni rad izmjene radnog medija se smanjuje (osjenčana površina u indikatorskom dijagramu se smanjuje) te nam indicirani rad raste, a time i stupanj djelovanja motora.

Za potrebe ovog rada bit će promatran Otto motor zbog većeg utjecaja isključivanja cilindara na potrošnju goriva nego kod Dieselovog motora, iako su se tehnologije isključivanja cilindara počele primjenjivati i na Diesel motore.

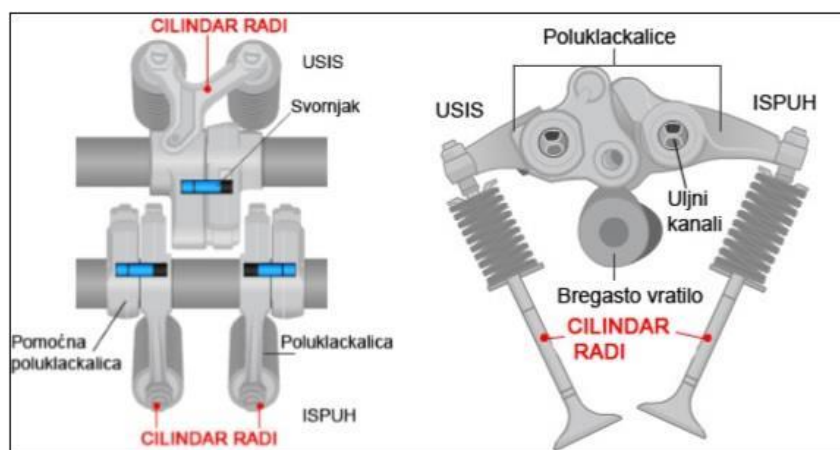
2.2. Primjeri konstrukcijskih rješenja isključivanja cilindara

Cilindri se isključuju na način da se isključuju ventili pojedinih cilindara. Postoje razna konstrukcijska rješenja za isključivanje ventila prilikom rada. Većina elemenata se aktivira ili isključuje tlakom ulja, koji se regulira pomoću preklopnog ventila. Takve konstrukcijske izvedbe zahtijevaju ugradnju dodatnog cirkulacijskog kruga ulja da bi se upravljalo tim elementima, a naposljetku i ventilima. Neki od primjera koji će biti opisani su:

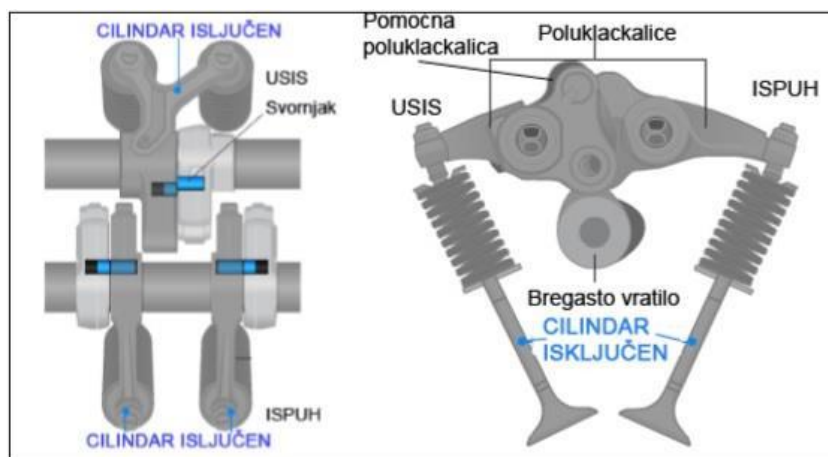
1. isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom
2. isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila
3. isključivanje ventila pomičnim brijegom bregastog vratila
4. isključivanje ventila pomoću UniAir sustava

2.2.1. Isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom

Razvodni mehanizam se sastoji od jednog bregastog vratila koje djeluje preko pomičnih poluklackalica na usisne i ispušne ventile. Dotok ulja osiguran je kroz šuplju poluklackalicu kroz koju prolaze uljni kanali. Kad cilindri rade, pritisak ulja u uljnim kanalima drži svornjak u položaju u kojem se zajedno podižu pomoćna i glavna poluklacklica, a time i ventili. Na Slici 2. vidi se sustav pomičnih poluklackalica za slučaj uključenih cilindara.



Slika 2. Sustav pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom za slučaj uključenih cilindara [2]
Isključivanje cilindara vrši se tako da se smanji tlak te da se tako osigura položaj svornjaka u položaju dva prikazanog na Slici 3. te tako osigurava slobodno gibanje pomoćne poluklackalice, dok glavne poluklackalice miruju, te ventili ostaju zatvoreni.



Slika 3. Sustav pomičnih poluklackalica s jednim bregastim vratilom za slučaj isključenih cilindara [2]

2.2.2. Isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila

Ovakav razvodni mehanizam proizvodi tvrtka Tula Technology iz SAD-a. Razvodni mehanizam se sastoji od dva bregastog vratila koji djeluju preko pomičnih poluklackalica. Dotok ulja osiguran je kroz šuplju poluklackalicu te kroz specijalni kanal na svornjak. Kada

cilindri rade, dotok ulja kroz kanal je prekinut i opruga drži svornjak u položaju u kojem se zajedno podižu pomoćna i glavna poluklackalica, a time i ventili. Na Slici 4. vidi se sustav pomičnih poluklackalica za slučaj uključenih cilindara.



Slika 4. Sustav pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila za slučaj uključenih cilindara [3]

Isključivanje cilindara se vrši tako da se narine tlak ulja na svornjak preko deaktivacijskog kontrolnog ventila. Sila tlaka ulja tada postaje veća od sile u opruzi i svornjak se podiže. Zauzima položaj 2 prikazan na Slici 5. te tako osigurava slobodno gibanje pomoćne poluklackalice, dok glavne poluklackalice miruju, te ventili ostaju zatvoreni.



Slika 5. Sustav pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila za slučaj isključenih cilindara [3]

Uz pomoć ovakvog sustava moguće je kontrolirati svaki cilindar zasebno pa je ovakav mehanizam implementiran u sustav nasumičnog isključivanja cilindara DSF tvrtke Tula Technology iz SAD-a.

2.2.3. Isključivanje ventila pomičnim brijegom bregastog vratila

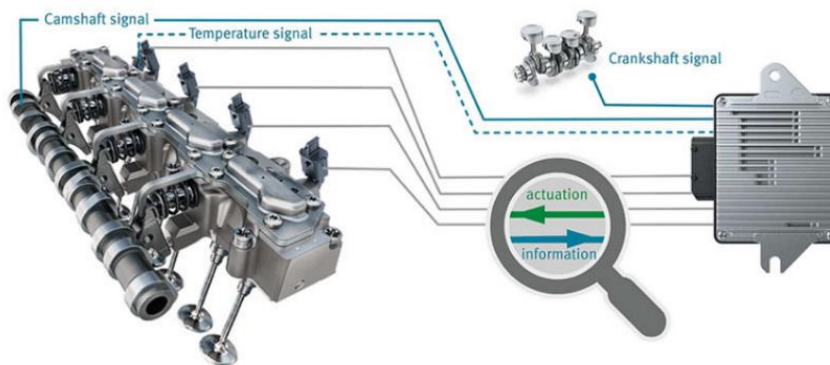
Ovakav razvodni mehanizam proizvodi tvrtka Schaeffler iz Njemačke. Isključivanje ventila vrši se pomoću električnih aktuatora koji uz pomoć kliznih utora koji su posebno konstruirani pomaknu profil brijega bregastog vratila, te on više ne djeluje na poluklackalicu, i ventili ostaju zatvoreni. Razvodni sustav sastoji se od dva bregasta vratila, jedno za upravljanje usisnim ventilima, a drugo ispušnim ventilima. Ovakvim sustavom moguće je isključiti bilo koji željeni broj cilindara. Uspješno se primjenjuje u Volkswagen grupaciji unatrag par godina. Sustav isključenja pomičnim brijegom bregastog vratila prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Sustav s pomičnim brijegom bregastog vratila [4]

2.2.4. Isključivanje ventila pomoću UniAir sustava

UniAir sustav je također sustav kojeg proizvodi tvrtka Schaeffler iz Njemačke. Ovakav sustav omogućuje potpuno varijabilno upravljanje ventilima, njihovo vrijeme zatvaranja i otvaranja, mogućnost kontrole koliko dugo su otvoreni odnosno zatvoreni te broj otvaranja odnosno zatvaranja. Ovakav sustav također omogućuje više zatvaranja i otvaranja usisnih ventila tijekom faze usisa, ovisno o opterećenju vozila i zahtjevu samog korisnika. To ga čini prvim sustavom u svijetu za potpuno kontinuirano upravljanje ventilima. Na strani usisa nema više bregastog vratila, nego je postavljen UniAir ventil sustav sa aktuatorom kojim upravlja centralno računalo u vozilu na temelju podataka od bregastog vratila na ispuhu i brzine vrtnje koljenastog vratila.

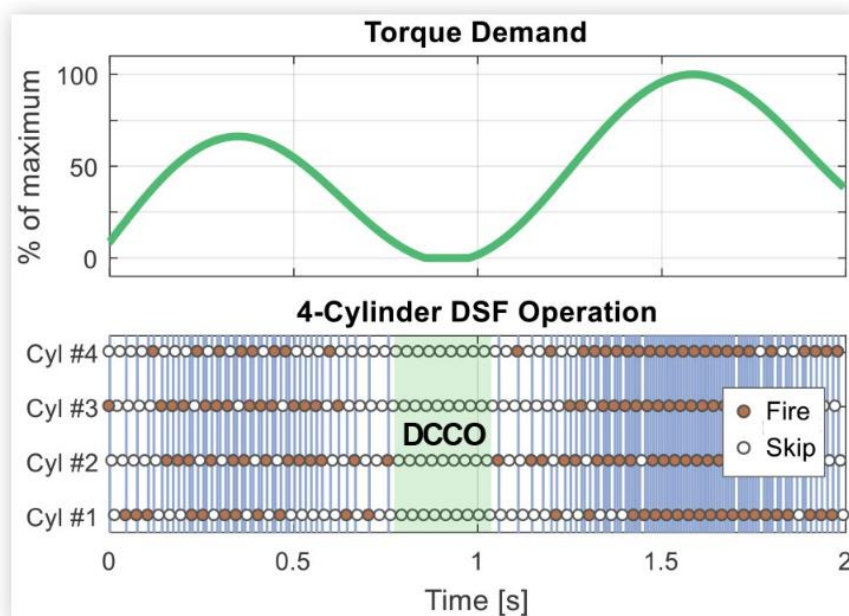


Slika 7. Sustav isključivanja ventila pomoću UniAir [5]

3. SUSTAV NASUMIČNOG ISKLJUČIVANJA CILINDARA (DSF TEHNOLOGIJA)

3.1. Princip rada

DSF (eng. Dynamic Skip Fire) je tehnologija nasumičnog isključivanja cilindara s ciljem da se smanje toplinski gubitci te gubitci prilikom izmjene radne tvari pri radu motora s djelomičnim opterećenjem. Ta tehnologija omogućava deaktiviranje bilo kojeg cilindra u bilo kojem trenutku rada motora, kontinuirano mijenjajući broj cilindara u kojem ima izgaranja te broj cilindara koji su deaktivirani odnosno gdje nema izgaranja. Tehnologija se bazira na paljenju odnosno preskakanju paljenja pojedinog cilindra u svrhu postizanja traženog izlaznog momenta.



Slika 8. Primjer paljenja cilindara s DSF tehnologijom za 4-cilindrični motor [7]

Iz Slike 8. vidljiva su područja paljenja cilindara odnosno preskakanja paljenja u ovisnosti o potrebnom izlaznom momentu, uvodi se pojam gustoće paljenja. Vidljivo je da u području gdje se zahtjeva maksimalni izlazni efektivni moment, u sva 4 cilindra postoji izgaranje, odnosno imamo normalan rad motora s 4 aktivna cilindra što odgovara gustoći paljenja od 100%. U područjima gdje je potreba za izlaznim efektivnom momentom manja, vidljivo je da neki cilindri preskaču paljenje, odnosno imamo rad motora s manje aktivnih cilindara, tj. manju gustoću paljenja. Kada je potražnja za izlaznim efektivnom momentom nula ili negativna, niti jedan cilindar ne pali. Kontrola izlaznog momenta proizlazi iz gustoće paljenja, a ne preko kuta otvorenosti zaklopke ili nekog drugog mehanizma. Može se zaključiti da samo odabrani cilindri pale kako bi udovoljili zahtjevu vozača u pogledu performansi vozila, zadovoljavajući time

najmanju potrošnju goriva, tj. najbolju učinkovitost. Suprotno konvencionalnim pristupima deaktiviranja cilindara, DSF izbjegava uključivanje i isključivanje setova cilindara, budući da je deaktiviranje kontinuirano varijabilno, eliminirajući tako velike skokove tlaka u razvodnom mehanizmu. Također se izbjegava deaktiviranje pojedinih cilindara na dulje vremensko razdoblje. Iz Slike 8. vidljivo je da najduže razdoblje deaktiviranog cilindra iznosi oko 0,6 s odnosno 20 ciklusa.

3.2. Smanjenje potrošnje goriva

Smanjenje potrošnje goriva očituje se u smanjenju toplinskih gubitaka, smanjenju negativnog rada prilikom izmjene radnog medija, smanjenju trenja u razvodnom mehanizmu te povećanju termalne učinkovitosti izgaranja. Toplinski gubici kod izgaranja u cilindrima kod smanjenih opterećenja mogu postizati veće udjele u razdiobi ukupne energije, no kod DSF tehnologije, izgaranje se odvija pod većim opterećenjem pojedinih cilindara što za posljedicu ima manji udio gubitka izgubljene topline. Manipuliranjem izgaranja na ovaj način moguće je postizanje potpunijeg izgaranja u većem rasponu opterećenja. Potpunijim izgaranjem se postižu se nešto više temperature u ispušnoj grani, ali se samim time poboljšava efikasnost trokomponentnog katalizatora što naposljetku smanjuje količinu NOx/HC plinova. Deaktiviranjem ventila u razvodnom sustavu pojedinih cilindara postoji znatna ušteda na izostanku trenja na kontaktnim površinama brjegov a i pripadajućih kontaktnih elemenata, povećavajući tako učinkovitost cijelog sustava.

3.3. Implementacija DSF tehnologije na motor

DSF tehnologija je prvenstveno usmjerena na softver, odnosno na programirane algoritme ugrađene u centralnu upravljačku jedinicu vozila. Ne koriste se unaprijed isprogramirani uzorci paljenja, već se odluke za paljenje, odnosno preskakanje paljenja, donose kod svakog mogućeg ciklusa gdje je moguće ostvariti paljenje. Ovdje postoji veliki prostor za buduća istraživanja u pogledu primjene umjetne inteligencije i strojnog učenja jer upravo ti algoritmi upravljaju gustoćom paljenja cilindara s ciljem ostvarivanja minimalne specifične efektivne potrošnje goriva uz postizanje traženog momenta. Istovremeno zadovoljavajući potrebne parametre u pogledu buke i nastalih vibracija. Odluke o paljenju donose se za svaki radni ciklus, uz kontroliranje zaklopke na usisu i vremena preskakanje iskre, da bi se traženi moment motora glatko isporučio. Uz softversku nadogradnju potrebno je napraviti i konstrukcijske preinake. Uz izostanak paljenja cilindara, zatvaraju se i pripadajući ventili. DSF tehnologija zahtjeva takav sustav koji je u mogućnosti aktivirati i deaktivirati usisne i ispušne ventile kada je to

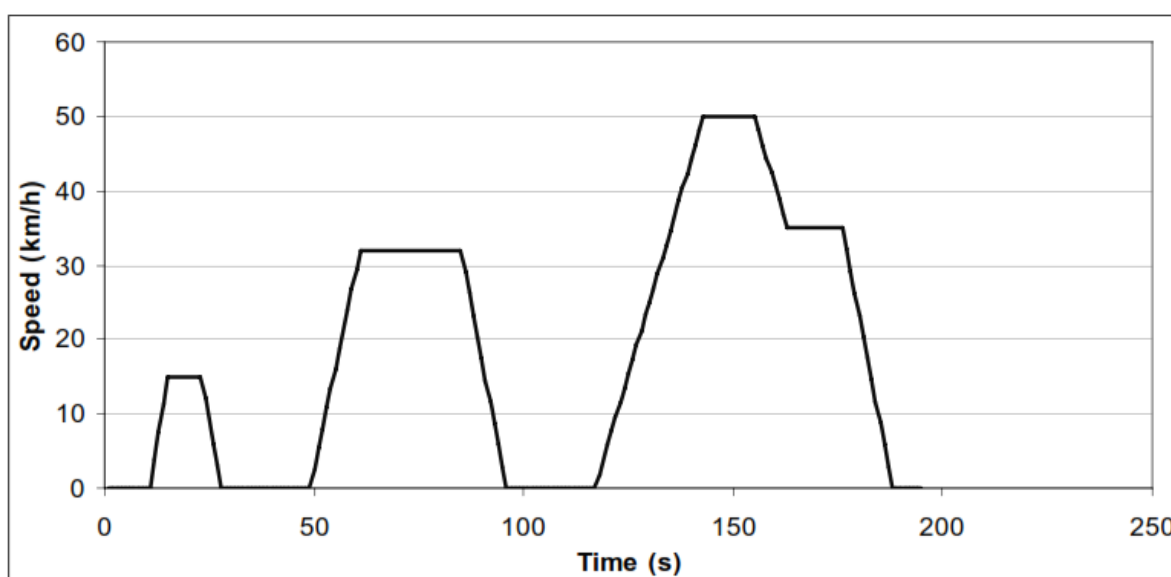
potrebno. Sustav mora omogućiti deaktivaciju cilindara u vremenu između svakog mogućeg izgaranja, što znači da sustav mora biti izuzetno pouzdan. Ovakav razvodni mehanizam proizvodi tvrtka Tula Technology iz SAD-a, a sam razvodni mehanizam opisan je u prethodnom poglavlju 2.2.2. „Isključivanje ventila pomoću pomičnih poluklackalica s dva bregasta vratila“ u ovom radu. Direktno ubrizgavanje predstavlja još jedan od mogućih oblika implementacije DSF tehnologije na postojeće motore. Kako je cijeli DSF sustav računalno upravljan potrebno je samo implementirati algoritme za provođenje nasumične deaktivacije cilindara kod smanjenih zahtjeva za izlazim momentom te koristiti isključivanje pojedinih brizgaljki za deaktivaciju cilindara. Direktnim ubrizgavanjem kod Otto motora moguće je ostvariti veće kompresijske omjere, omogućiti rad motora sa siromašnom smjesom te kompenzirati bilo kakve varijacije u trajanju deaktivacije cilindara. Kako DSF sustav zahtjeva minimalne konstrukcijske izmjene u razvodnom mehanizmu, vrlo male izmjene u samom bloku motora te primjenu specijaliziranog algoritma, implementacija ovakvog sustava je isplativija od razvijanja potpuno nove generacije motora. DSF tehnologiju moguće je primijeniti na Otto i Diesel motore, a postoje već i primjene na hibridna vozila. Kod Ottovog motora DSF tehnologija primjenjuje se i na motore koji rade sa siromašnom smjesom (tzv. λ DSF – lean DSF). Rad λ DSF-a omogućava pokrivanje većeg dijela radne mape motora, pogotovo na niskim vrijednostima momenata i niskih brzina vrtnje. Referenca [6] pokazuje istraživanje gdje se primjenom DSF tehnologije u NEDC ciklusu potrošnja goriva smanjuje za 6,7%, dok pri radu sa λ DSF potrošnja goriva se smanjuje za 9.7%. Referenca [7] pak pokazuje da su moguće uštede od 8,3% - 18,5% u NEDC ciklusu ovisno o vrsti vožnje. Ove vrijednosti uštede će nam dati okvirne vrijednosti koje trebamo očekivati u proračunu potrošnje goriva u NEDC ciklusu na kraju ovog završnog rada. Diesel motori do sada nisu biti uzeti u obzir kada je u pitanju tehnologija nasumičnog isključivanja cilindara, no referenca [6] istražuje potencijalne pozitivne utjecaje koje bi primjena DSF tehnologije imala na diesel motore kod osobnih automobila te manjih industrijskih vozila. Glavna prednost DSF tehnologije se nalazi u području smanjenog opterećenja. Nametanjem efikasnije izgaranja u diesel motorima povećava se i temperatura ispušnih plinova što za posljedicu ima smanjenje NOx emisija. Definiranje gustoće paljenja kod diesel motora moguće je ostvariti prekidom dotoka goriva u cilindar kojeg želimo deaktivirati što je moguće ostvariti ugradnjom elektronički upravljanih brizgaljki te ugradnjom dodatne kontrolne jedinice sa potrebnim algoritmima. Ako se uzme u obzir navedeno, implementacija ovakvog sustava u Diesel motore bila bi relativno ekonomična.

4. STANDARDIZIRANI VOZNI CIKLUS

Postoji stotine različitih ispitnih ciklusa koji se koriste za mjerenje emisija ispušnih plinova, a time i potrošnja goriva. Većina njih je standardizirana, što znači da se testiranja vrše u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Vozila se nalaze u laboratoriju, na valjcima, da bi se mogli simulirati otpori vožnje. Svaki ispitni ciklus sastoji se od unaprijed određenih operacija vozila da bi se testovi mogli provoditi u ponovljivim uvjetima. Ispitni ciklusi definirani su kao funkcije brzine vozila i odabira stupnja prijenosa u ovisnosti o vremenu. Za potrebe ovog rada odabran je NEDC standardizirani vozni ciklus.

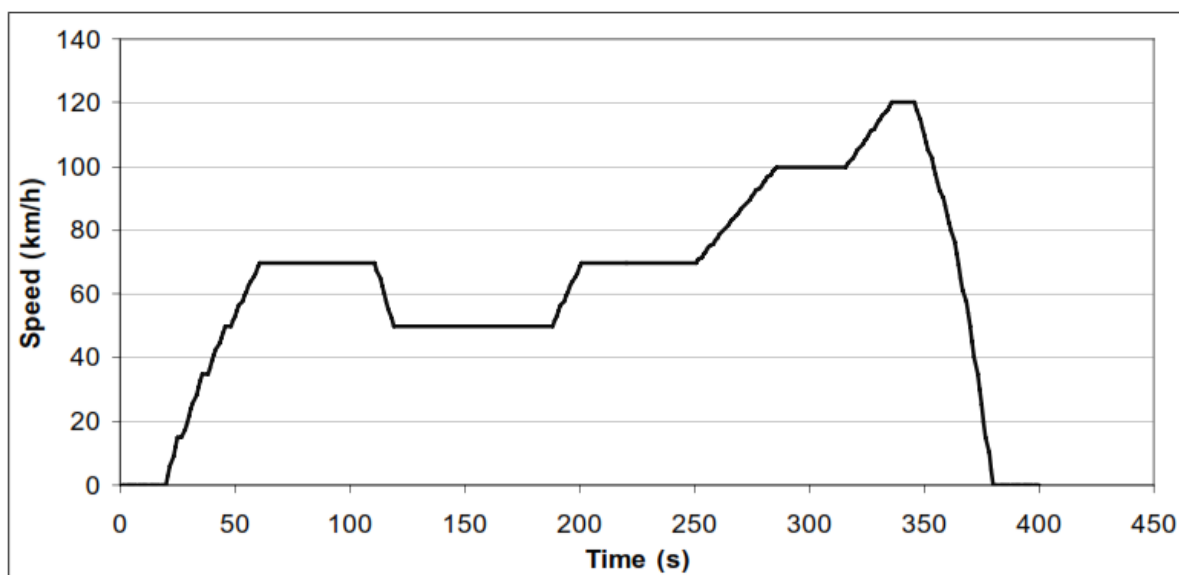
4.1. NEDC (eng. New European Driving Cycle)

NEDC ispitni ciklus sastoji se od dva dijela. Prvi dio je UDC (eng. Urban Driving Cycle), a drugi dio je EUDC (eng. Extra-Urban Driving Cycle). UDC ciklus, predstavlja gradsku vožnju, sastoji od četiri elementarna ECE 15 ciklusa. Svaki elementarni ECE 15 ciklus traje 195 s, ukupna prijeđena udaljenost je 0,9946 km, maksimalna brzina 50,07 km/h s prosječnom brzinom 18,4 km/h. Sljedeća slika prikazuje elementarni ECE 15 ciklus kao funkciju brzine o vremenu.



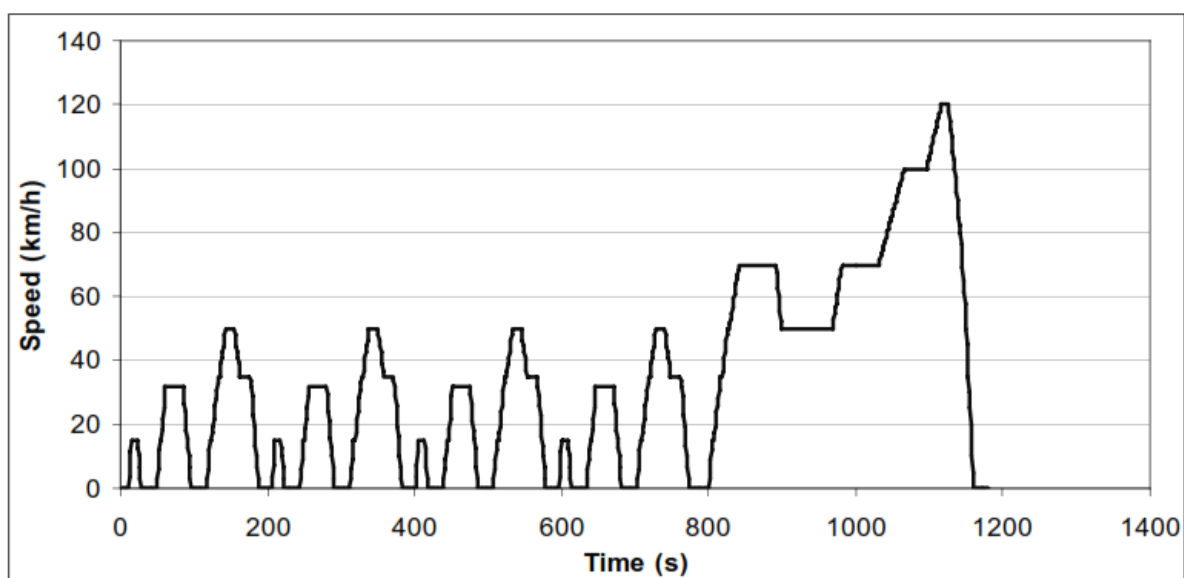
Slika 9. Elementarni ECE 15 ciklus [10]

EUDC ciklus, predstavlja vožnju otvorenom cestom, traje 400 s, ukupna prijeđena udaljenost je 6,955 km, maksimalna brzina je 120,09 km/h s prosječnom brzinom od 62,6 km/h. Sljedeća slika prikazuje EUDC ciklus kao funkciju brzine o vremenu.



Slika 10. EUDC ciklus [10]

Kombinirajući 4 elementarna ECE 15 ciklusa i 1 EUDC nastaje ukupni NEDC vozni ciklus kombinirane vožnje. Ukupno trajanje NEDC ispitnog ciklusa je 1180 s, ukupna prijeđena udaljenost 11,017 km, maksimalna brzina 120,09 km/h s prosječnom brzinom od 33,6 km/h.



Slika 11. NEDC vozni ciklus [10]

5. SIMULACIJSKI MODEL

5.1. Odabir vozila za proračun

Za potrebe završnog rada odabrano je vozilo Audi A3, druge generacije, sa 2.0 FSI motorom. Taj motor ugrađivan je u model A3 od 2003. do 2006. godine. Za proračun potrošnje goriva po NEDC standardiziranom voznom ciklusu bit će potrebni podaci o vozilu te podaci za izračunavanje otpora vožnje.



Slika 12. Audi A3 2004 [12]

Kretanju vozila odupiru se određeni otpori, koje pogon vozila mora savladati. Istovremeno, performanse vozila ograničene su karakteristikama prijanjanja kotača i podloge.

Otpori vožnje uključuju:

- otpor kotrljanja,
- otpor zraka,
- otpor uspona,
- otpor ubrzanja,
- ostali otpori (u zavoju, po mokroj podlozi...).

Za proračun potrošnje bit će nam potreban otpor kotrljanja, otpor zraka te otpor prilikom ubrzanja. U NEDC standardiziranom voznom ciklusu nema uspona, a ostali otpori se zanemaruju.

5.1.1. Otpor kotrljanja

Otpor kotrljanja je posljedica gubitaka energije koji nastaje uslijed stalnog deformiranja gume kotača prilikom kotrljanja po podlozi. Na iznos otpora kotrljanja utječu: karakteristike gume,

masa vozila, stanje površine kolnika, brzina vožnje, geometrija ovjesa, stanje kočnica, trenje u ležajevima. Otpor kotrljanja izračunava se prema izrazu:

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (9)$$

gdje je: f_k [-] – faktor otpora kotrljanja, m_v [kg] – ukupna masa vozila, $g = 9,81$ [m/s²] – ubrzanje gravitacije, $\alpha = 0$ [°] – kut uspona.

5.1.2. Otpor zraka

Otpor zraka je posljedica gubitaka energije koje nastaju uslijed gibanja vozila kroz zrak, a na njega utječu oblik vozila, brzina vožnje i gustoća zraka.

Ukupan otpor zraka nastaje zbog sljedećih efekata:

- vozilo prilikom vožnje „odguruje“ zrak oko sebe (dinamički tlak zraka) i stvara vrtloge,
- između prednje čelone površine i stražnjeg dijela vozila postoji razlika tlakova,
- zrak djelomično i klizi po površini vozila (stvara trenje),
- jedan dio zraka mora proći kroz automobil (hladnjak motora, kočnice, sustav ventilacije, itd.).

Sila potrebna za svladavanje otpora zraka izračunava se prema izrazu:

$$F_z = 0,5 \cdot \rho_z \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A, \quad (10)$$

gdje je: ρ_z [kg/m³] – gustoća zraka, v [m/s] – brzina vožnje, c_w [-] – faktor otpora zraka, A [m²] – čelona površina vozila. Brzina protuvjetra u NEDC ciklusu se zanemaruje pa je tako i član brzine protuvjetra izostavljen iz izraza.

5.1.3. Otpor ubrzanja

Ovaj otpor se javlja u nestacionarnim uvjetima vožnje, tj. posljedica je inercijskih sila kod ubrzavanja. Prilikom ubrzanja pogon vozila mora translatorno ubrzati masu vozila i rotaciono ubrzati sve rotirajuće dijelove.

Pojednostavljeni izraz za savladavanje otpora ubrzanja:

$$F_a = m_v \cdot k_m \cdot a, \quad (11)$$

gdje je: m_v [kg] – masa vozila, k_m [-] – faktor rotirajućih masa, a [m/s²] – ubrzanje vozila.

5.1.4. Podaci vozila potrebni za proračun NEDC standardiziranog voznog ciklusa

Tablica 1. Glavni podaci o vozilu [14]

VELIČINA	OZNAKA	IZNOS	MJERNA JEDINICA
Masa praznog vozila	m_v	1315	kg
Čeona površina vozila	A	2,13	m ²
Koef. otpora zraka	c_w	0,32	-
Faktor otpora kotrljanja	$f_{k,1}$	0,009	-
Faktor otpora kotrljanja	$f_{k,2}$	0,002	-
Faktor otpora kotrljanja	$f_{k,3}$	0,0003	-
Gravitacija	g	9,81	m/s ²
Mehanički stupanj korisnosti prijenosnika	η_m	0,93	-
Prijenosni omjer 1. brzine	$i_{m,1}$	3,78	-
Prijenosni omjer 2. brzine	$i_{m,2}$	2,27	-
Prijenosni omjer 3. brzine	$i_{m,3}$	1,52	-
Prijenosni omjer 4. brzine	$i_{m,4}$	1,19	-
Prijenosni omjer 5. brzine	$i_{m,5}$	0,97	-
Prijenosni omjer 6. brzine	$i_{m,6}$	0,82	-
Prijenosni omjer diferencijala	i_{or}	3,65	-
Gustoća zraka	ρ_z	1.20	kg/m ³
Gustoća goriva	ρ_g	760	kg/m ³
Brzina vrtnje praznog hoda	n_{min}	1000	1/min
Satna potrošnja goriva u praznom hodu	$m_{G,h}$	0,78	l/h
Oznaka guma	205/55/R16	-	-
Dinamički radijus kotača	r_d	0,306	m

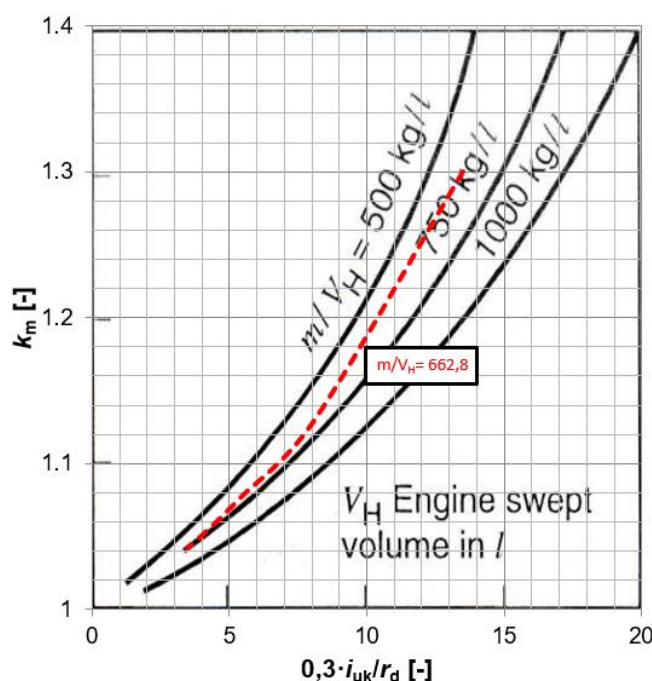
Dinamički radijus kotača izračunat je prema sljedećem izrazu:

$$r_d = 0,97 \cdot r = 0,97 \cdot (R + H_R) = 0,97 \cdot \left[\left(\frac{16}{2} \cdot 0,0254 \right) + (0,55 \cdot 0,205) \right] = 0,306 \text{ m}, \quad (12)$$

gdje je: r [m] – radijus neopterećene gume, R [m] – radijus naplatka, a H_R [km] - visina neopterećene gume.

Uz podatke iz Tablice 1. potrebno je očitati i faktore rotirajućih masa $k_{m,i}$. Faktori rotirajućih masa očitavaju se iz dijagrama prema Slici 13. za pojedini stupanj prijenosa. Potrebna nam je i vrijednost omjera mase vozila i radnog volumena koja se računa prema sljedećem izrazu:

$$\frac{m_v}{V_H} = \frac{1315}{1,984} = 662,8 \text{ kg/l.} \quad (13)$$



Slika 13. Dijagram faktora rotirajućih masa

Omjer prijenosnog omjera diferencijala i dinamičkog radijusa za pojedini stupanj prijenosa te očitana vrijednost faktora rotirajućih masa za pojedini stupanj prijenosa prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 2. Očitani faktori rotirajućih masa za pojedini stupanj prijenosa

	1	2	3	4	5	6
$0,3 \cdot i_{uk}/r_d$	13,495	8,104	5,426	4,248	3,463	2,927
$k_{m,i}$	1,3	1,13	1,077	1,055	1,042	1,035

Svi prethodno navedeni i izračunati podaci bit će korišteni kasnije u NEDC voznom ciklusu u programskom paketu Microsoft Excel.

5.2. Značajke motora korištenog u simulaciji

U odabrano vozilo ugrađivan je redni 4-cilindrični 2.0 FSI motor bez prednabijanja s direktnim ubrizgavanjem. Motor je prikazan na Slici 14. a glavni podaci motora prikazani su u Tablici 3.



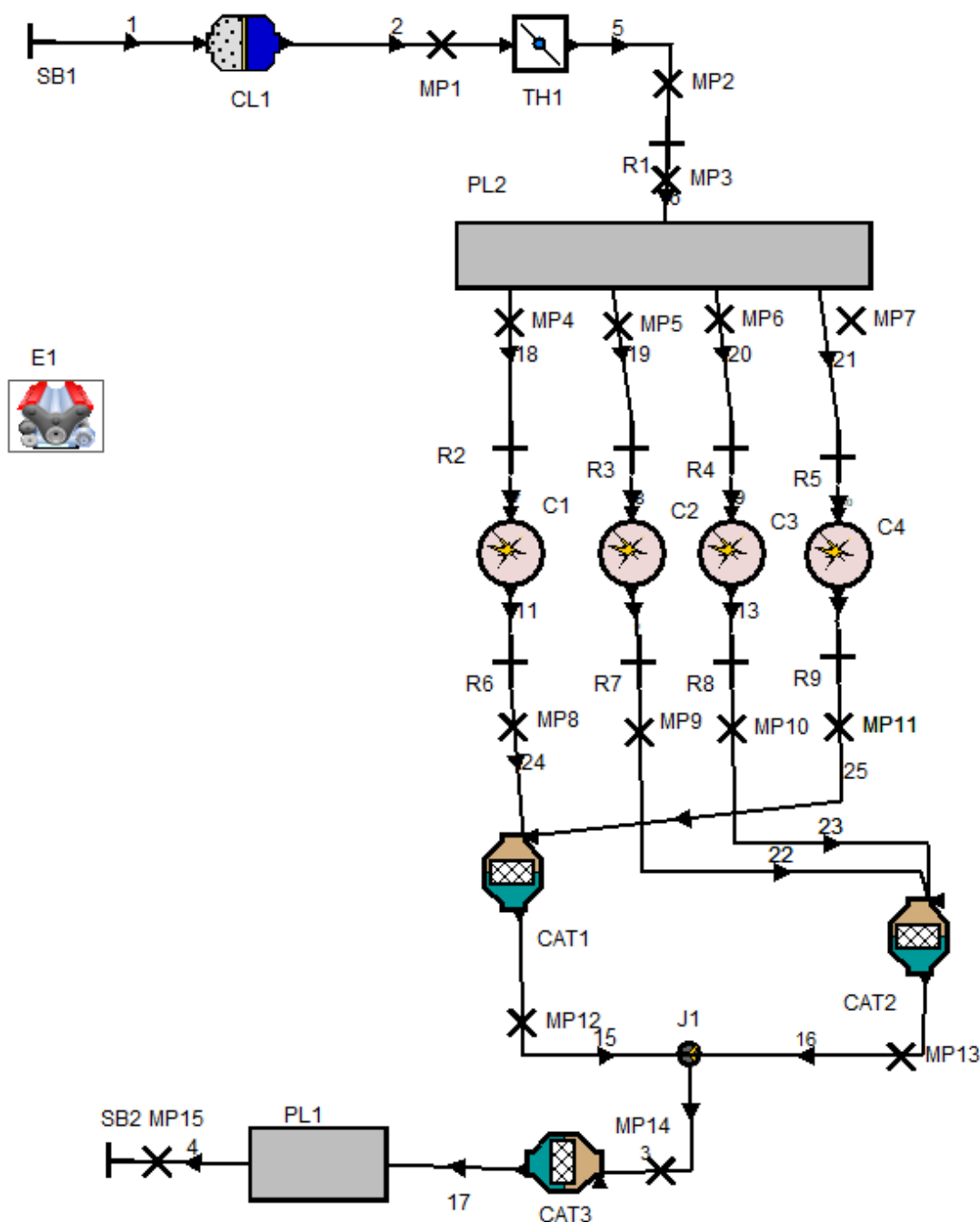
Slika 14. Motor 2.0 FSI [13]

Tablica 3. Glavni podaci motora 2.0 FSI [14]

VELIČINA	OZNAKA	IZNOS	MJERNA JEDINICA
Broj cilindara	z	4	[-]
Promjer klipa	D	82,5	mm
Hod klipa	H	92,8	mm
Kompresijski omjer	ε	11,5	[-]
Duljina klipnjače	l	144	mm
Radni volumen	V_H	1984	cm ³
Broj taktova	T	4	[-]
Broj usisnih ventila po cilindru	$n_{v,u}$	2	[-]
Broj ispušnih ventila po cilindru	$n_{v,i}$	2	[-]
Promjer usisnog ventila	$d_{v,u}$	33,85	mm
Promjer ispušnog ventila	$d_{v,i}$	28	mm
Maksimalni efektivni moment	M_e	200 (3500 min ⁻¹)	Nm
Maksimalna efektivna snaga	P_e	110 (6000 min ⁻¹)	kW

5.3. Opis simulacijskog modela u programskom paketu AVL BOOST™

Simulacijski model motora izrađen u programskom paketu AVL BOOST™ prikazan je na Slici 15.



Slika 15. Simulacijski model u programskom paketu AVL BOOST™

Motor ima 4 cilindra, ubrizgavanje se vrši direktno, a snaga se regulira zaklopkom. Podaci potrebni za modeliranje uzeti su od strane proizvođača. Model motora sadrži filter zraka (CL1), zaklopku (TH1), usisnu granu (PL2), cilindre (C1-C4), restriktore (R), katalizatore (CAT1-CAT3), prigušivač zvuka (PL1) te cijevi (1-25). Jedna od specifičnih karakteristika korištenog motora u simulaciji je njegov ispuh, gdje su po dvije ispušne cijevi spojene u jednu, što

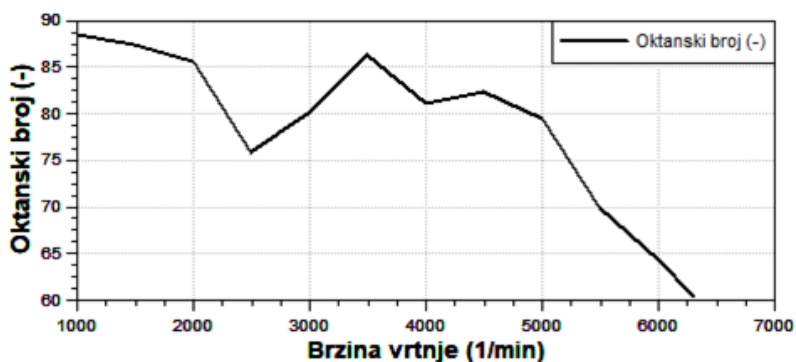
omogućava veći efektivni moment na niskim okretajima. Svaka cijev opremljena je katalizatorom. Rubnim uvjetima su određeni tlak, temperatura i sastav smjese u usisnoj cijevi.

5.3.1. Dvozonski Vibeov model izgaranja

U simulacijskom modelu korišten je dvozonski Vibeov model izgaranja. Dvozonski Vibeov model izgaranja podrazumijeva da se cjelokupna masa radne tvari u cilindru za vrijeme izgaranja dijeli na izgorjelu i neizgorjelu smjesu. Ne koristi se pretpostavka da izgorjela i neizgorjela zona ima istu temperaturu kao kod slučaja jednozonskog Vibeovog modela. Prednost primjene Vibeove funkcije je brzo i jednostavno računanje brzine oslobađanja topline.

5.3.2. Model detonativnog izgaranja

Detonativno izgaranje je nepoželjno jer u vrlo kratkom roku može uništiti motor. Kao parametar u pogledu pojave detonativnog izgaranja uzeta je vrijednost istraživačkog oktanskog broja koju sadrže goriva na benzinskim postajama. Ta vrijednost iznosi 95 i to je gornja granica do koje oktanski broj smije doći tijekom simulacije. Prikaz oktanskog broja za puno opterećenje prikazano je na sljedećoj slici gdje se može vidjeti da je on u cijelom području rada ispod dozvoljene vrijednosti.

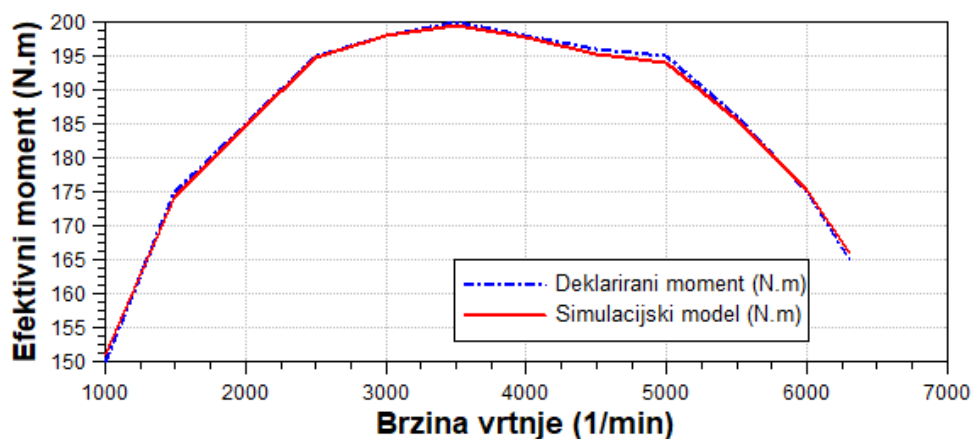


Slika 16. Prikaz oktanskog broja kod punog opterećenja

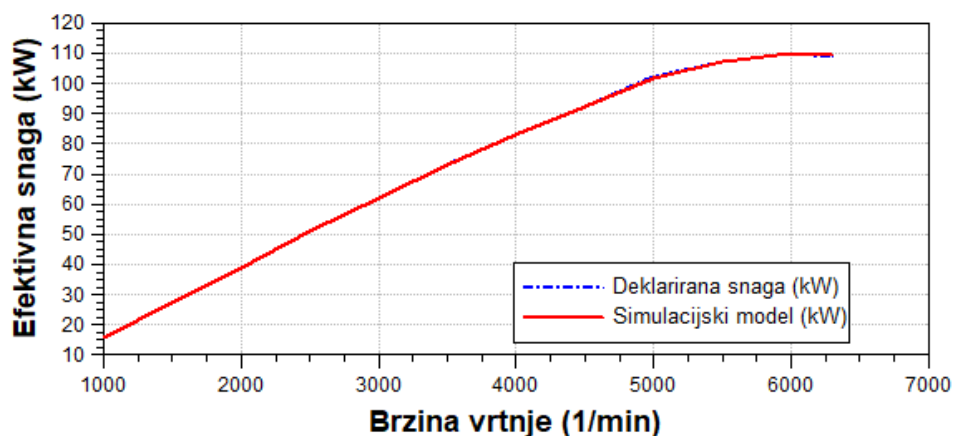
5.3.3. Kalibracija simulacijskog modela

Kalibracija modela provedena je iterativnim postupkom usporedbe dobivenog efektivnog momenta sa deklariranim podacima. Gruba kalibracija provedena je na temelju dimenzioniranja usisa, ispuha te svih pripadajućih komponenti. Svi potrebni podaci uzeti su od strane proizvođača, a oni koji su bili nedostupni uzeti su kao preporučene vrijednosti od strane samog programa. Nadalje, fina kalibracija provedena je pomoću podešavanja točke paljenja za

svaku pripadajuću brzinu vrtnje motora. Ovdje je također važan oktanski broj, pošto je najranija točka paljenja ograničena upravo pojavom detonantnog izgaranja. Na sljedećim slikama prikazana je usporedba efektivnog momenta i efektivne snage motora dobivenih u simulaciji s deklariranim podacima od strane proizvođača, za slučaj 4 aktivna cilindra kod 100-postotnog opterećenja.



Slika 17. Usporedba deklarirane i simulacijske vrijednosti efektivnog momenta motora



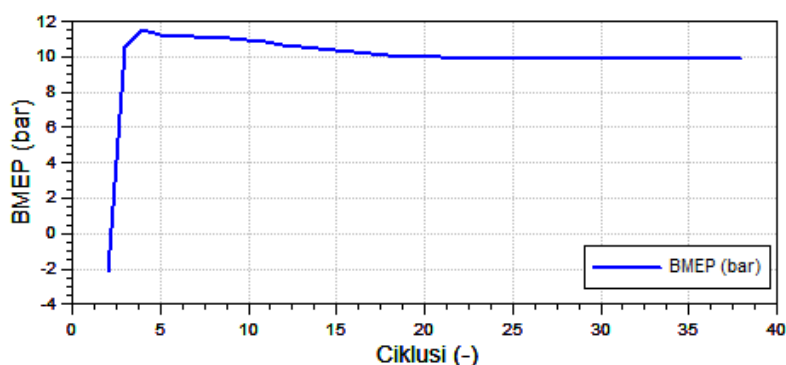
Slika 18. Usporedba deklarirane i simulacijske vrijednosti efektivne snage motora

Iz Slike 17. i 18. vidljivo je da su odstupanja između vrijednosti dobivenih simulacijama i deklariranih vrijednosti jako mala (unutar 5 %) pa možemo zaključiti da je kalibracija simulacijskog modela zadovoljavajuća.

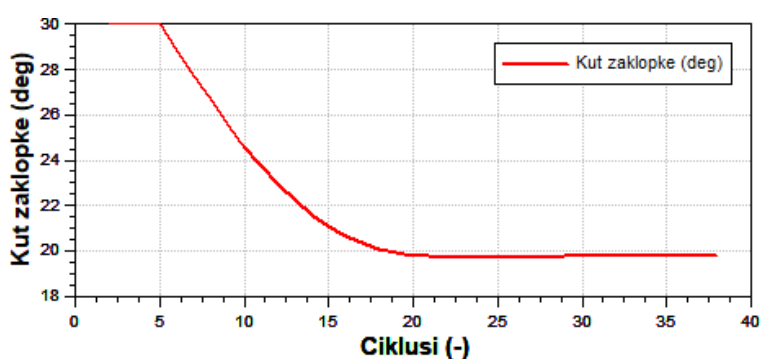
5.3.4. Način provedbe djelomičnih opterećenja unutar simulacije

Za dobivanje radnih točaka motora u području djelomičnih opterećenja, moramo regulirati kut zakreta zaklopke. U programu se to vrši pomoću opcije *BMEP Control* gdje se definira traženi srednji efektivni tlak uz pretpostavljeni kut zakreta zaklopke te integracijske konstante ICG. U području djelomičnih opterećenja potrebno je u programu staviti stehiometrijsku smjesu ($\lambda = 1$), da bi trokomponentni katalizator mogao ispravno djelovati. Nakon pokretanja simulacije, program prilagođava položaj zaklopke da bi ostvario traženi srednji efektivni tlak, odnosno traži konvergenciju kuta zaklopke te konvergenciju pripadajućeg srednjeg efektivnog tlaka.

Sljedeće dvije slike prikazuju primjer konvergencije srednjeg efektivnog tlaka (BMEP) te pripadajuću konvergenciju kuta zaklopke za radnu točku pri brzini vrtnje od 5000 min^{-1} i 80% opterećenja za slučaj sva 4 aktivna cilindra.



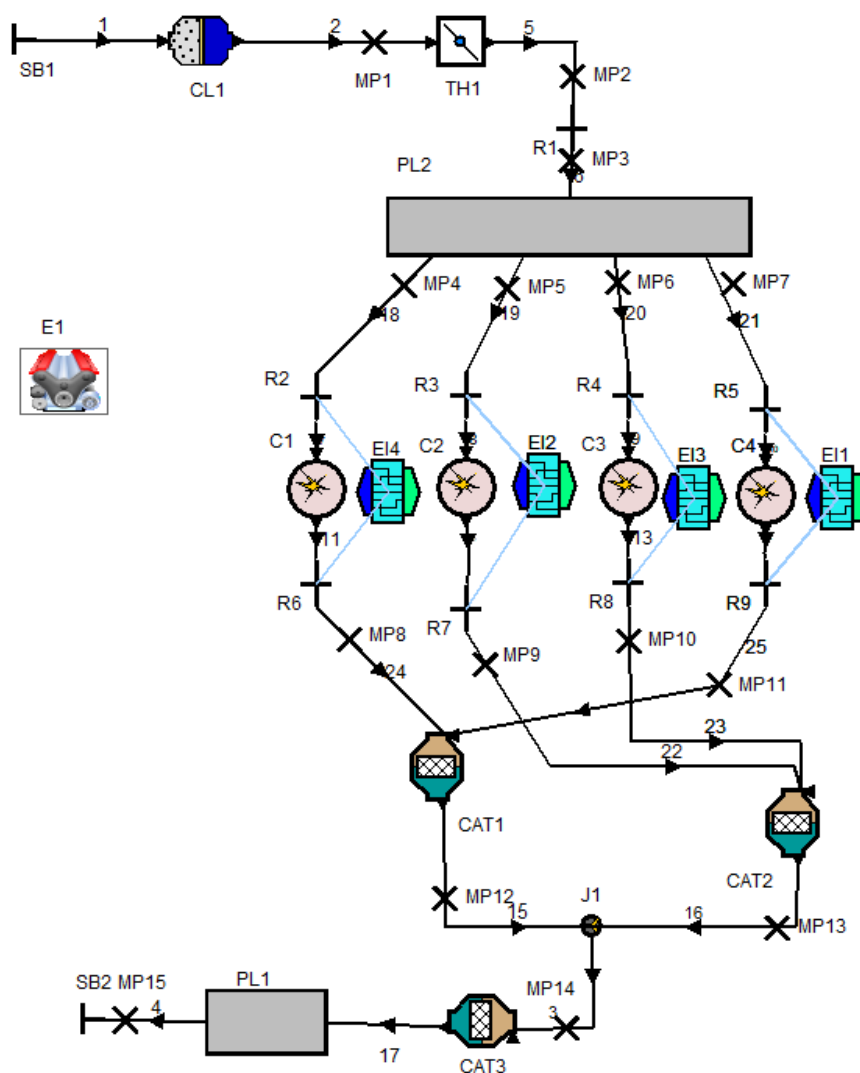
Slika 19. Prikaz konvergencije srednjeg efektivnog tlaka



Slika 20. Prikaz konvergencije kuta zaklopke

5.3.5. Način gašenja pojedinih cilindara tijekom rada simulacije

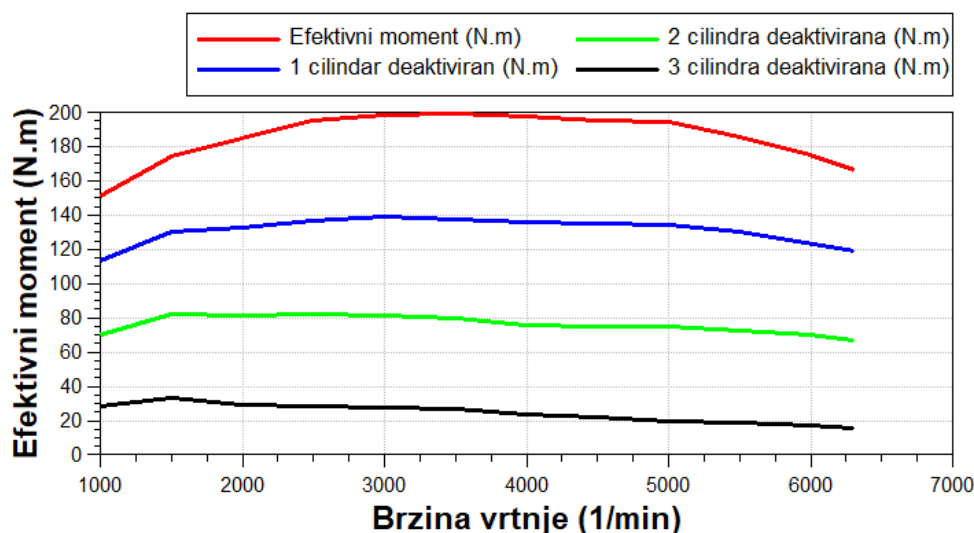
Više je mogućnosti isključivanja cilindara prilikom rada u simulaciji. Odlučeno je korištenje restriktora, tj. ograničivača protoka na ulazu i izlazu iz cilindra. Uz njega se koristio i element pod nazivom „Engine Interface“, tj. sučelje motora. On omogućava upravljanje koeficijentom protoka u ovisnosti o ciklusima simulacije. Uz pomoć njega eliminirano je pretjerano zaustavljanje mase u samom cilindru nakon njegovog gašenja. Samo gašenje na cilindru izvedeno je tako da se nakon određenog broja ciklusa, u fazi nakon završetka ispuha kada je najmanje mase zarobljeno unutar samog cilindra, koeficijent protoka stavi na nultu vrijednost, čime se stvara isti efekt kao kod zatvaranja ventila. Također potrebno je ugasiti i dovod goriva na cilindru kojeg želimo isključiti. Na sljedećoj slici prikazan je takav modificirani simulacijski model, u odnosu na prvobitni, s mogućnošću gašenja cilindara u programskom paketu AVL BOOST™.



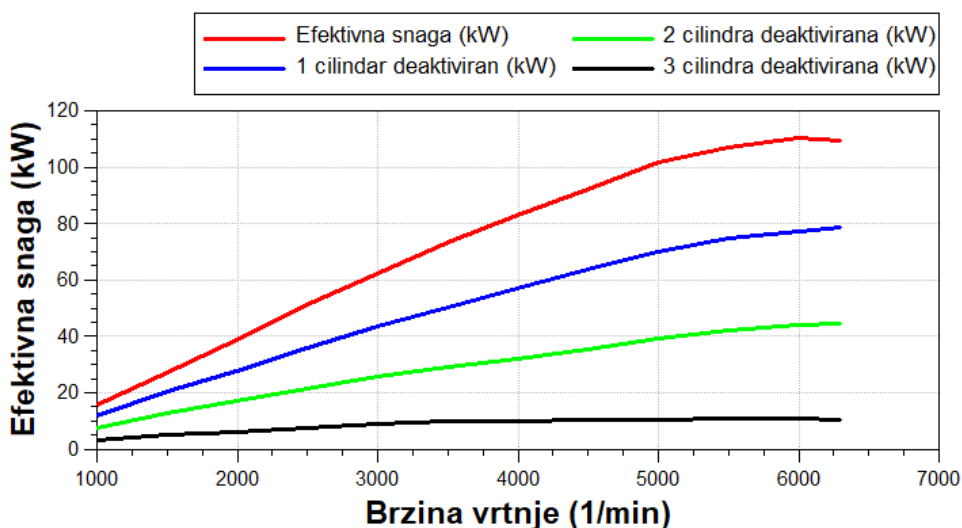
Slika 21. Modificirani simulacijski model s mogućnošću gašenja pojedinog cilindra u programskom paketu AVL BOOST™

6. REZULTATI

U ovom dijelu rada bit će prikazani rezultati simulacija za puna i djelomična opterećenja uz različite razine kontinuirane isključenosti cilindara. Također, bit će provedena analiza potrošnje goriva u NEDC standardiziranom voznom ciklusu. Sljedeće dvije slike prikazuju krivulje efektivne snage i efektivnog momenta za različite razine kontinuirane isključenosti cilindara kod punog opterećenja.



Slika 22. Krivulje efektivnog momenta za različite kontinuirane razine isključenosti cilindara

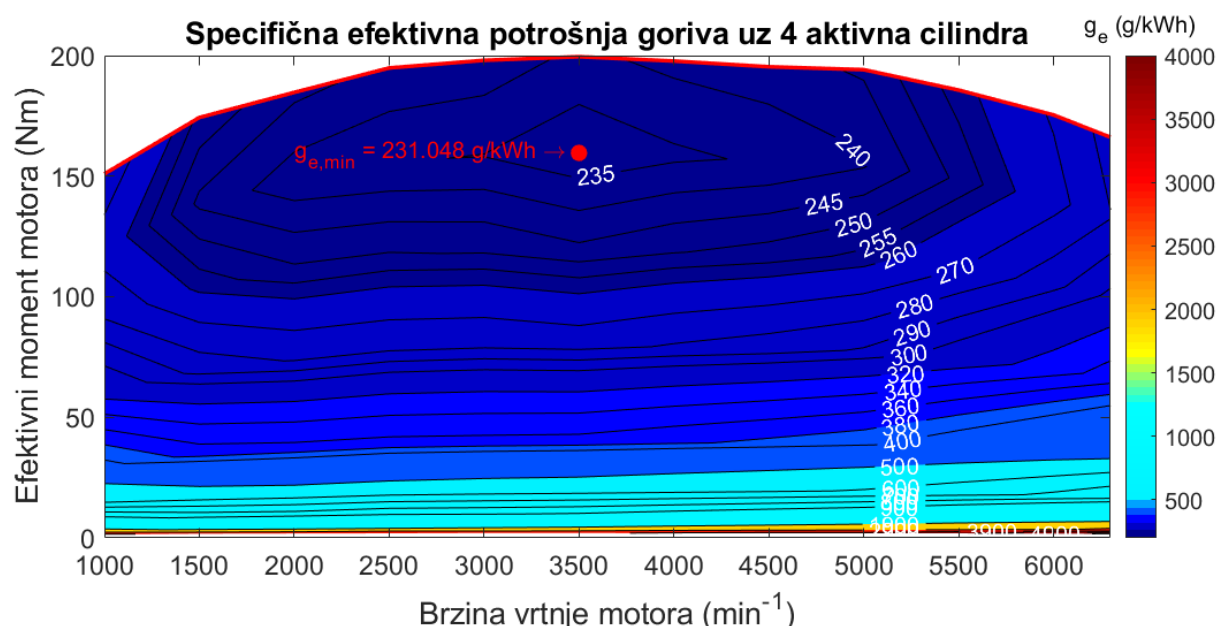


Slika 23. Krivulje efektivne snage za različite kontinuirane razine isključenosti cilindara

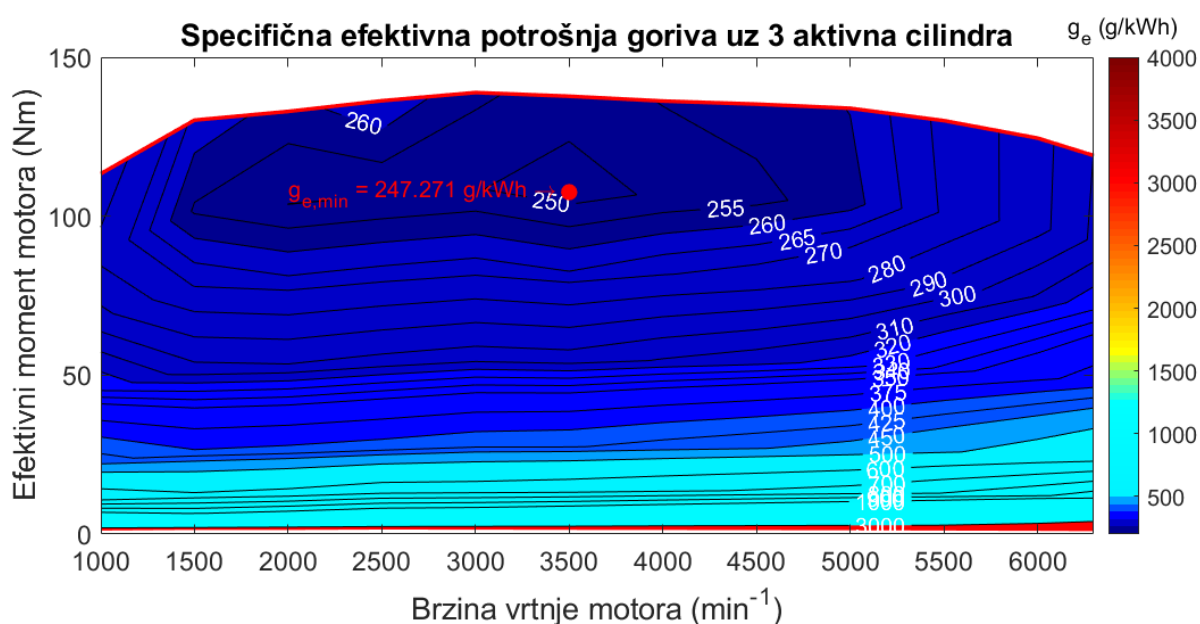
Iz Slike 22. i 23. vidljivo je da deaktivacijom cilindara pada efektivni moment odnosno efektivna snaga kod punog opterećenja što je i očekivano. Manji broj cilindara, uz isto opterećenje, manji je srednji efektivni tlak odnosno efektivni moment, a time i efektivna snaga.

6.1. Prikaz topografskih dijagrama specifične efektivne potrošnje goriva za različite razine isključenosti cilindara

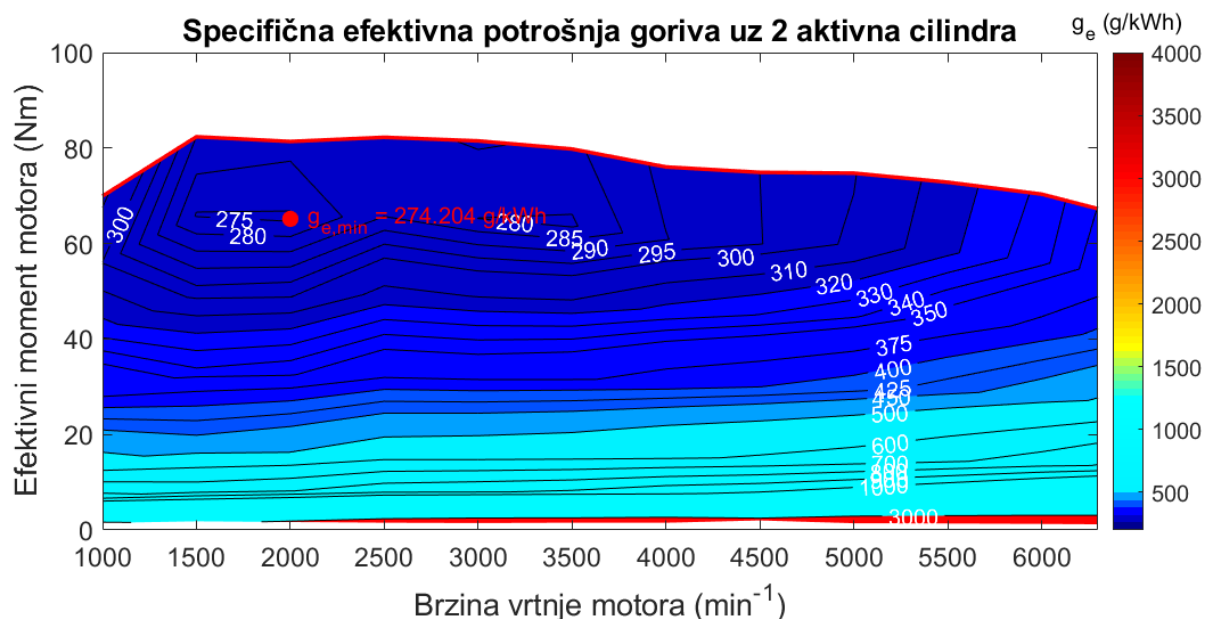
Topografski dijagrami izrađeni su prema rezultatima dobivenim za djelomična opterećenja. Da bi topografski dijagrami bili što točniji potrebno je simulirati što više djelomičnih opterećenja. Za potrebe ovih dijagrama simulirano je 12 djelomičnih opterećenja po svim brzinama vrtnje u rasponu od najmanjeg momenta u praznom hodu do najvećeg mogućeg, za odgovarajuću razinu isključenosti cilindra.



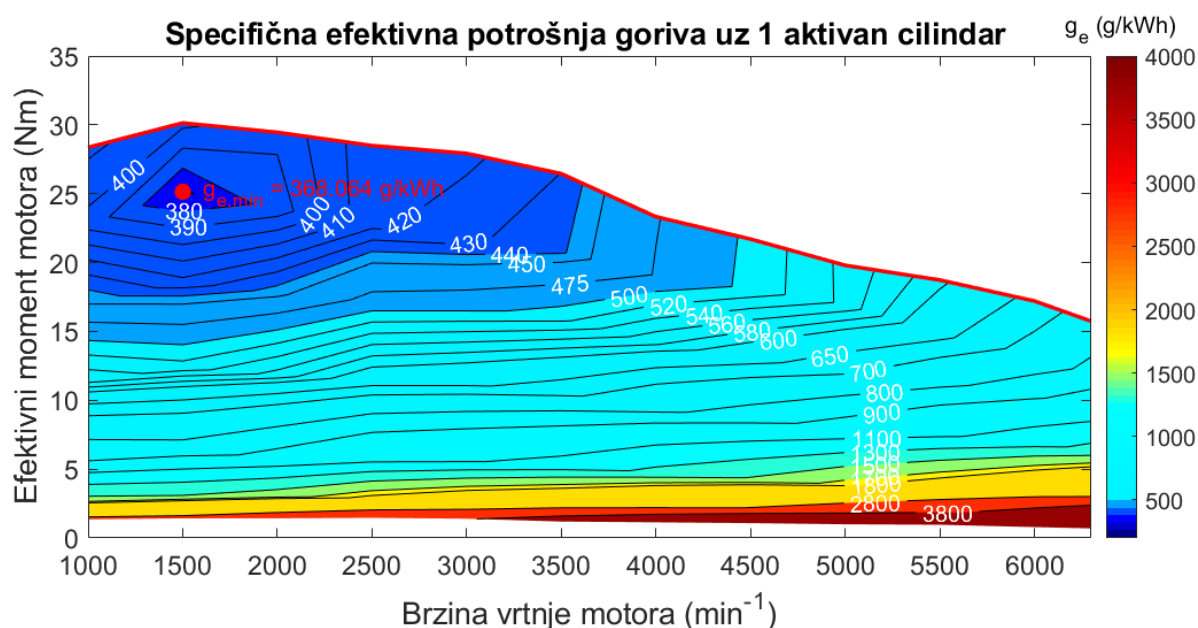
Slika 24. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 4 aktivna cilindra



Slika 25. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 3 aktivna cilindra



Slika 26. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 2 aktivna cilindra

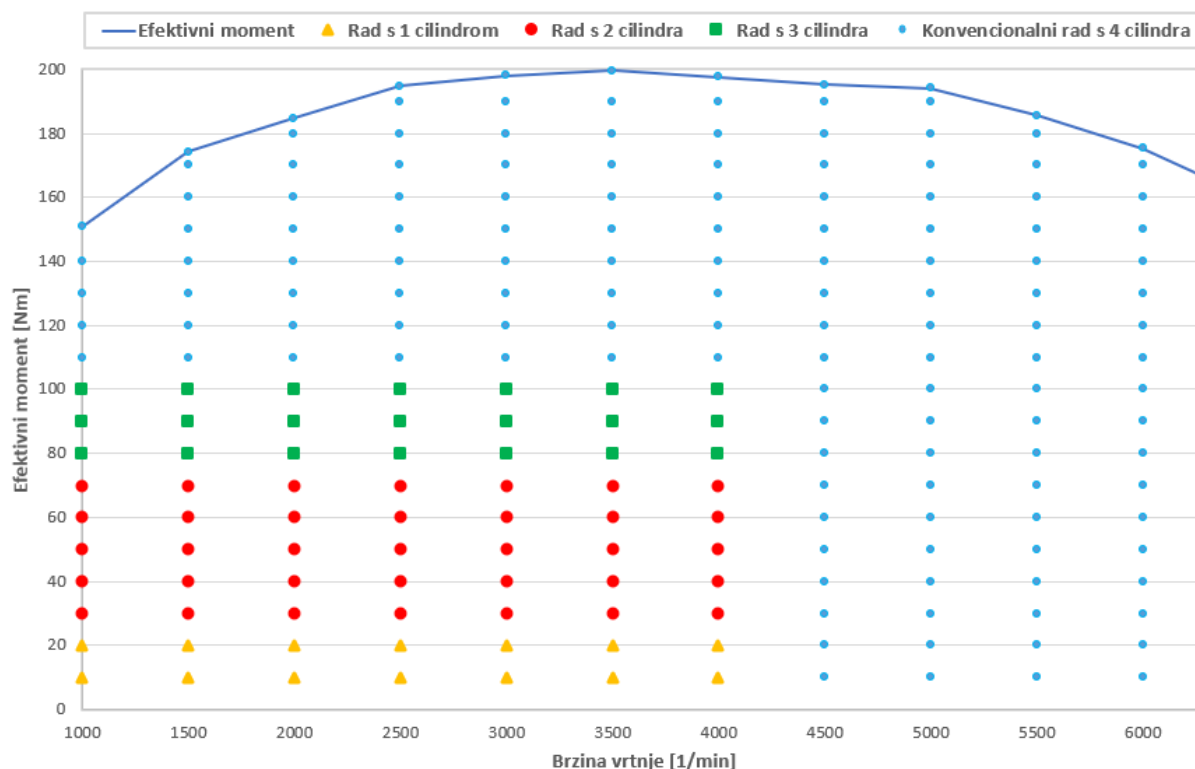


Slika 27. Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva uz 1 aktivan cilindar

Iz prikazanih topografskih dijagrama vidljive su pojedine zone rada motora ovisno o razini isključenosti cilindara. Uspoređujući dijagrame te odabiranjem proizvoljne radne točke, lako je odrediti režim rada koji je najpovoljniji, odnosno s koliko deaktiviranih cilindara postizemo najmanju specifičnu efektivnu potrošnju goriva uz postizanje istog efektivnog momenta. Deaktivacijom cilindara postizemo ekvivalent gustoći paljenja, pa tako su tako 4 aktivna cilindra ekvivalent 100% gustoće paljenja, 3 aktivna cilindra 75% gustoće paljenja, 2 aktivna cilindra 50% gustoće paljenja, a 1 aktivan cilindar 25% gustoće paljenja.

6.2. Odabir radne mape motora s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva

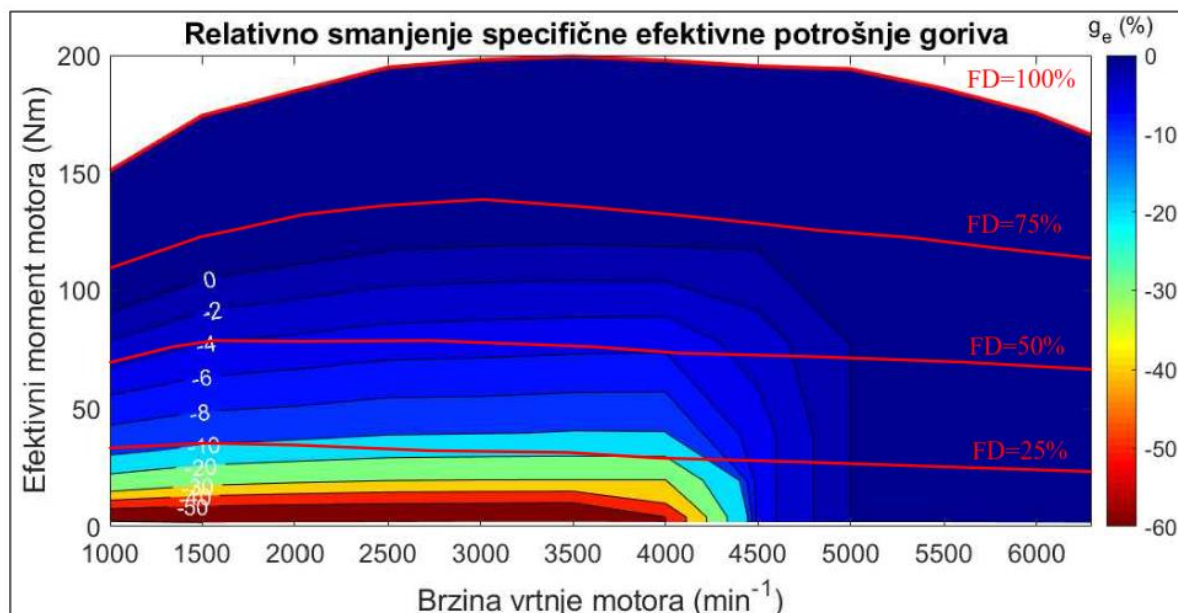
Usporedbom izrađenih topografskih dijagrama dobivaju se radne zone u području cjelokupne radne mape motora. Te radne zone prikazane su na sljedećoj slici, a odabrane su tako da se odabire najmanja specifična efektivna potrošnja goriva, da bi se i dalje postigao željeni efektivni moment.



Slika 28. Mapa motora s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva u ovisnosti o razini isključenosti cilindara

Iz Slike 28. vidljive su 4 odabrane zone rada, tj. zone isključivanja pojedinih cilindara. Gornje vrijednosti tih zona limitirane su maksimalnim ostvarivim efektivnim momentom za pojedinu razinu isključenosti cilindara, dok je desna granica odlučena s obzirom na specifičnu efektivnu potrošnju goriva te porast trenja u motoru. Ovako definirana mapa motora s pripadajućim radnim točkama bit će korištena za računanje potrošnje goriva po standardiziranom voznom ciklusu NEDC, modeliranog u programskom paketu Microsoft Excelu. Također, ovako definirane točke mogu biti korištene u algoritmu za nasumično isključivanje cilindara pošto su definirane kao točke s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva, uz dobivanje povoljnog efektivnog momenta.

Iz definirane optimalne radne mape motora kreiran je topografski dijagram relativnog smanjenja specifične efektivne potrošnje goriva, koristeći pripadajuće izabrane radne točke te uspoređujući ih sa radnim točkama kod rada motora sa svim aktivnim cilindrima.

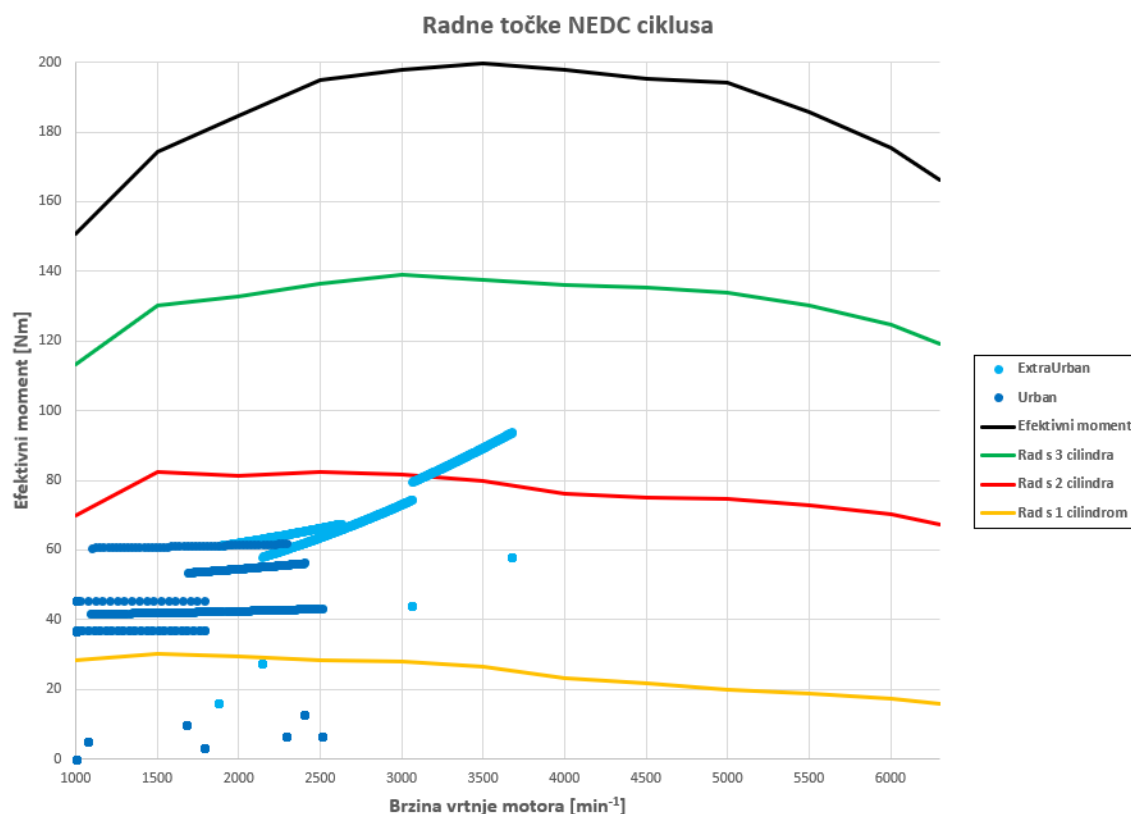


Slika 29. Relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva

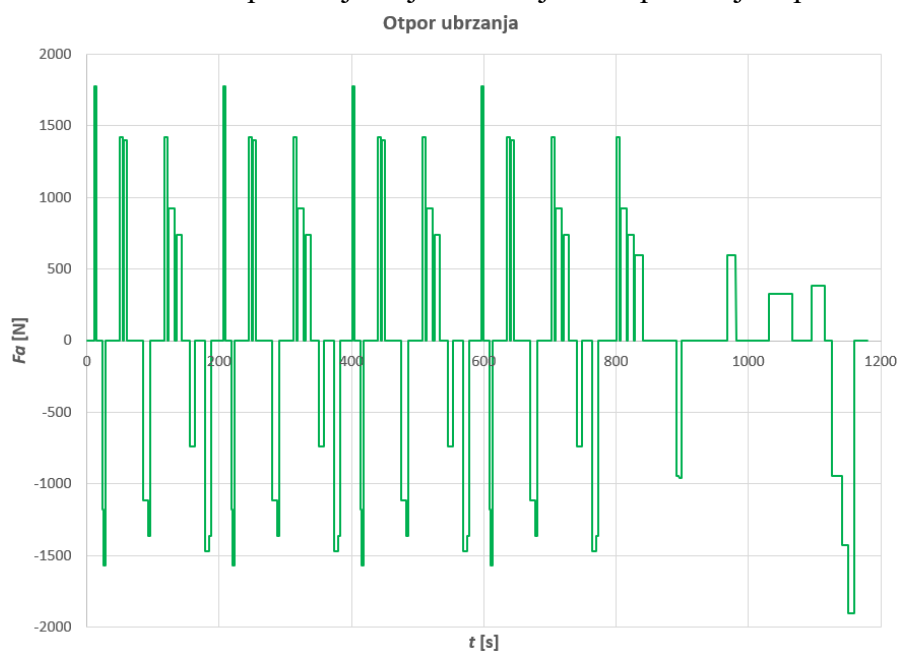
Iz dijagrama je vidljivo područje primjene isključivanja cilindara. Ono ima smisla do 4500 min⁻¹ dok je gornja granica limitirana područjem isključivanja jednog cilindra odnosno kod gustoće paljenja (FD - *Firing Density*) od 75%. Relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva ne proteže se skroz do gustoće paljenja od 75% iz razloga što su odabrane optimalne radne točke do 100 Nm efektivnog momenta, vidljive sa Slike 28. Razlog zbog čega nisu odabrane sve točke do krivulje od 75% gustoće paljenja, nego samo do 100 Nm, je taj da nam za NEDC ciklus nije potreban veći moment od navedenog, pošto NEDC ciklus radi sa niskim okretajima pri niskom opterećenju.

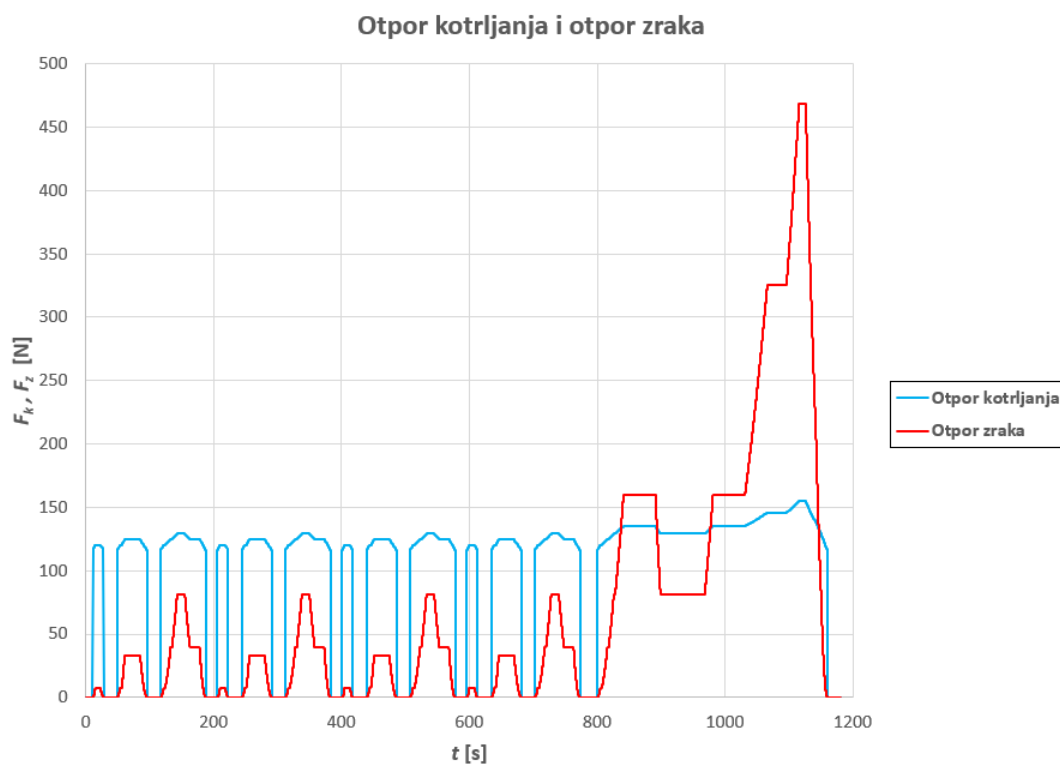
6.3. Analiza vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC

Odabranu optimalnu radnu mapu motora potrebno je ubaciti u NEDC vozni ciklus. Potrebni su podaci o brzini vrtnje, efektivnom momentu te pripadajućoj specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva. Pošto je definiran samo određeni broj radnih točaka potrebno je napraviti linearnu interpolaciju za sve ostale točke. Uvrštavanjem podataka o vozilu iz Tablice 1. i 2. te korištenjem interpoliranih podataka dobiveni su svi sljedeći prikazani rezultati. Na sljedećoj slici prikazane su radne točke u NEDC ciklusu za kombiniranu vožnju, s ucrtanim krivuljama efektivnog momenta za različite razine isključenosti cilindara.



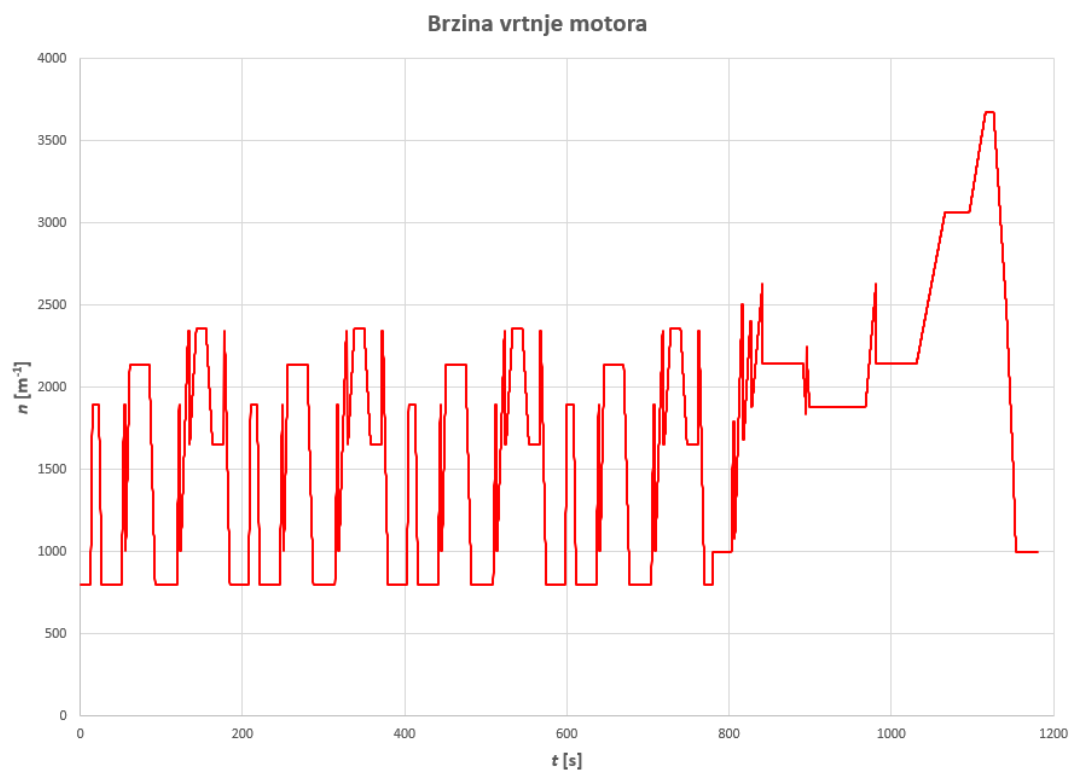
Iz Slike 30. vidljivo je da su sve radne točke NEDC ciklusa u rasponu od 1000 do 4000 min^{-1} , a maksimalni potrebni efektivni moment do 100 Nm. On radi na niskim okretajima kod niskih opterećenja, a upravo tu je primjena DSF tehnologije. To je i jedan od razloga zašto je izabran vozni NEDC ciklus za izračun potrošnje. Sljedeće dvije slike prikazuju otpore vožnje.





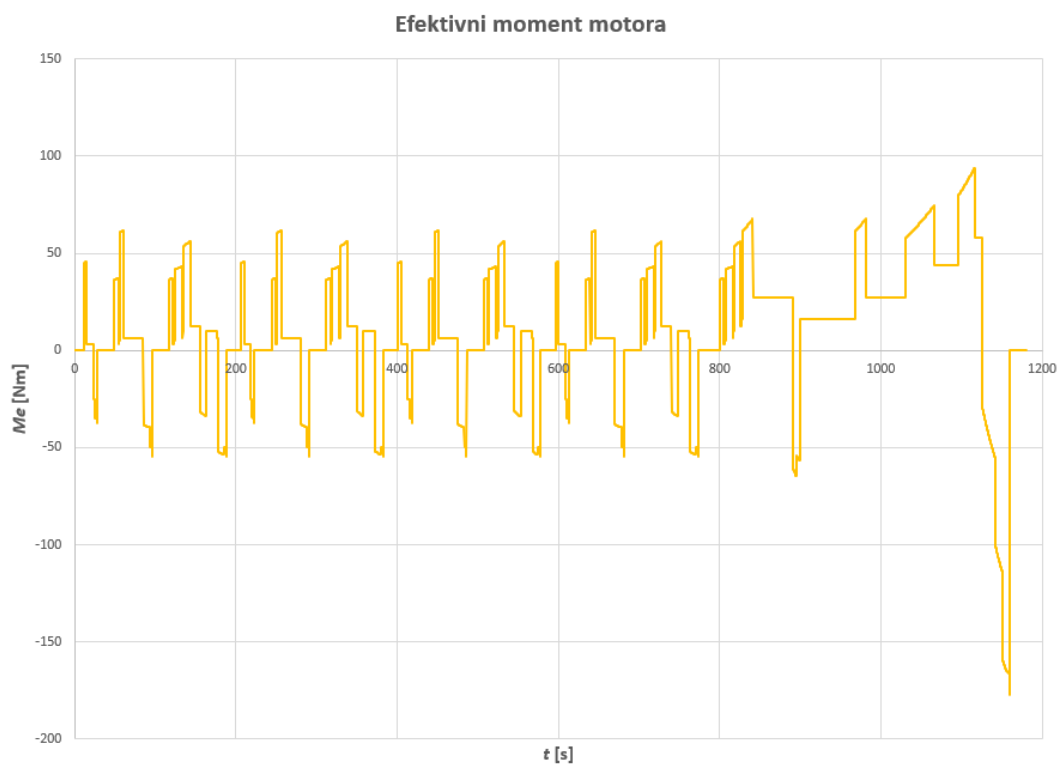
Slika 32. Prikaz otpora kotrljanja i otpora zraka

Sljedeća slika prikazuje promjenu brzine vrtnje motora o ovisnosti o vremenu.



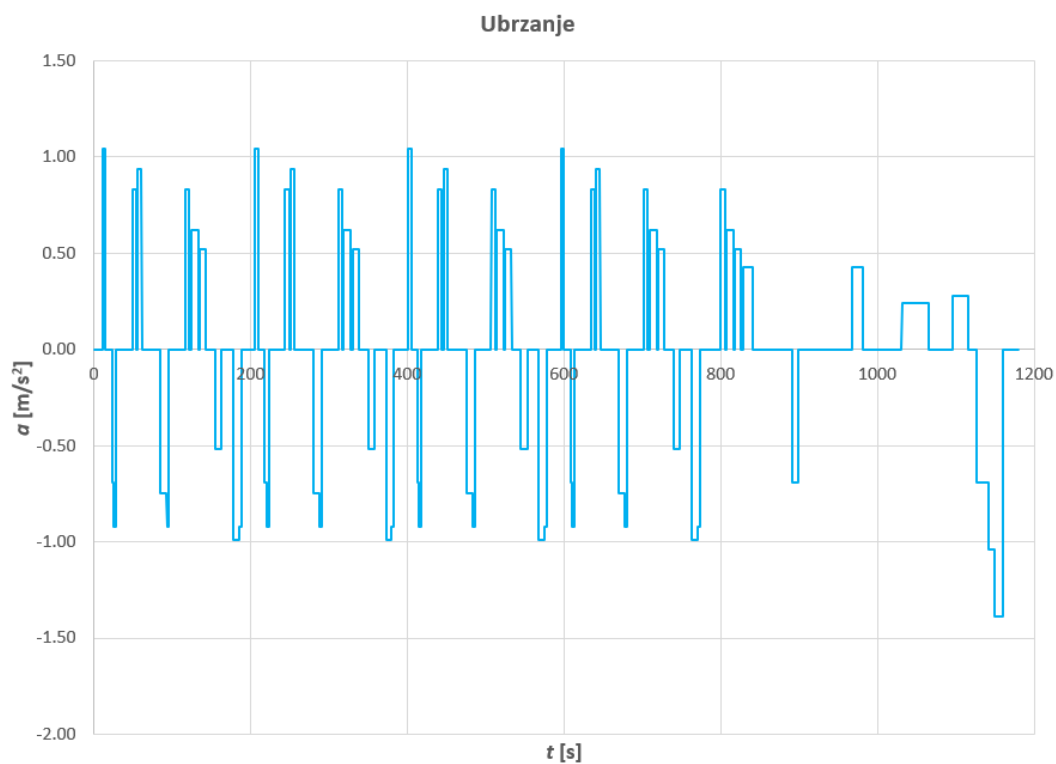
Slika 33. Prikaz ovisnosti brzine vrtnje motora o vremenu

Sljedeća slika prikazuje promjenu efektivnog momenta u ovisnosti o vremenu.



Slika 34. Prikaz ovisnosti efektivnog momenta o vremenu

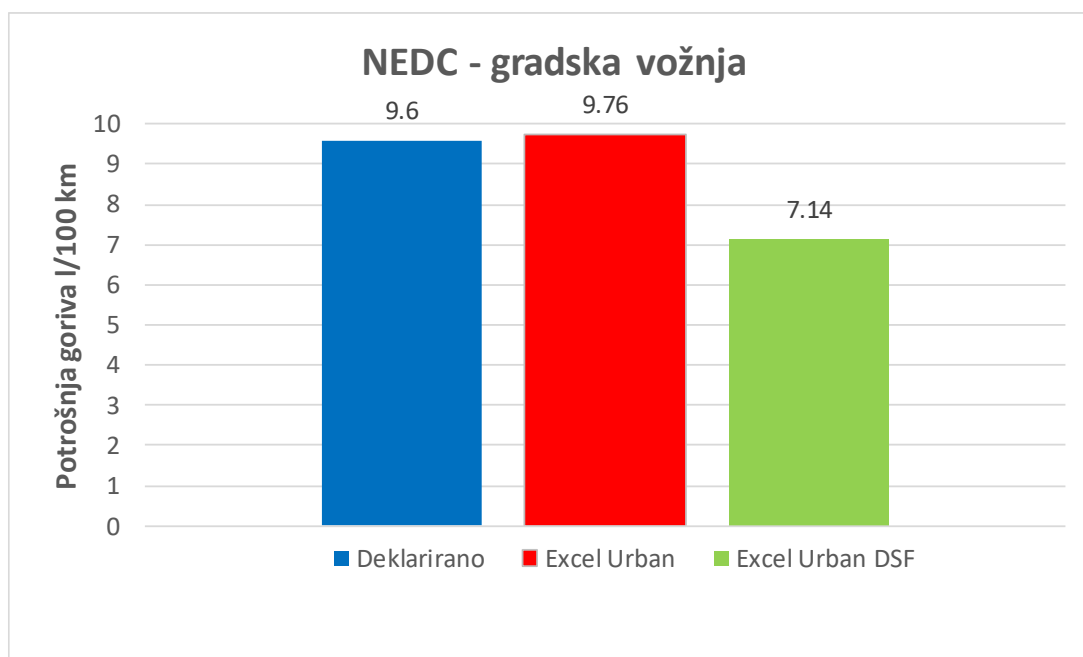
Sljedeća slika prikazuje promjenu ubrzanja u ovisnosti o vremenu.



Slika 35. Prikaz ovisnosti ubrzanja o vremenu

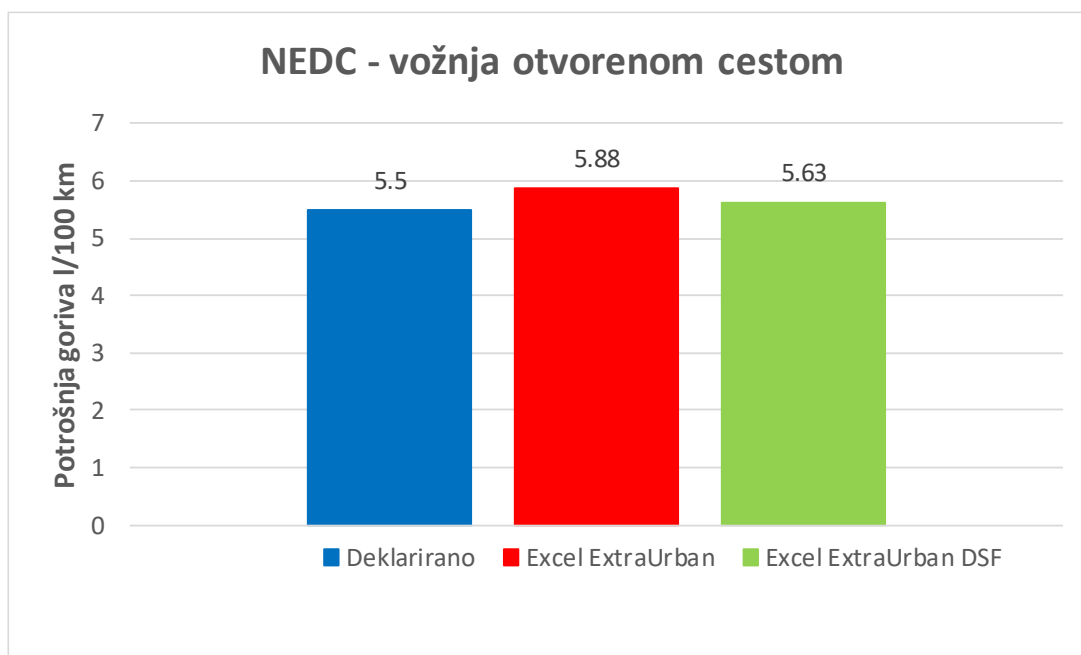
6.3.1. Prikaz dobivenih rezultata potrošnje goriva

U ovom dijelu rada bit će prikazani dobiveni rezultati potrošnje goriva u NEDC voznom ciklusu. Prvi stupac u dijagramima je deklarirani podatak o potrošnji goriva za određeni tip vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC, za odabrani Audi A3, preuzet sa web kataloga. [14] Drugi stupac u dijagramima je podatak o potrošnji goriva za određeni tip vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC, dobiven u modeliranom NEDC ciklusu u Microsoft Excelu. Taj podatak nam služi da bi bilo vidljivo koliko je modelirani NEDC ciklus u Microsoft Excelu zapravo točan. Treći stupac u dijagramima je podatak o potrošnji goriva za određeni tip vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC, korištenjem DSF tehnologije, odnosno gašenjem cilindara.



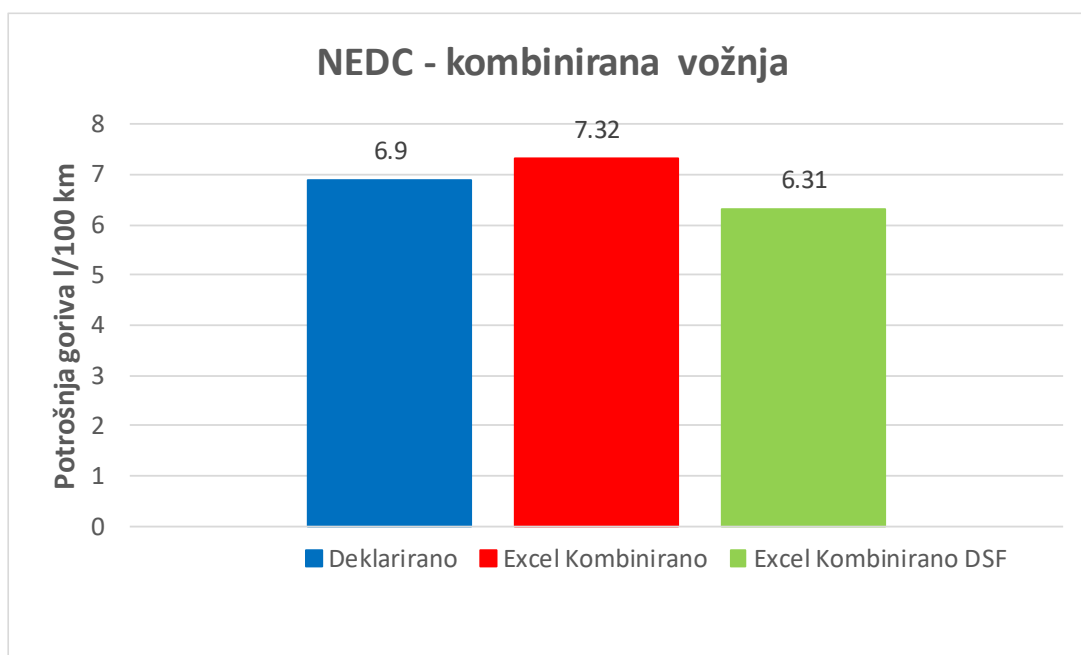
Slika 36. Prikaz potrošnje goriva prilikom gradske vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC

Iz Slike 36. vidljiva je potrošnja goriva prilikom gradske vožnje. Razlika između deklariranog podatka o potrošnji goriva i podatka dobivenog u modeliranom NEDC ciklusu u Microsoft Excelu je 1,64%, iz čega se može zaključiti da je modelirana gradska vožnja u NEDC ciklusu prihvatljiva. Uspoređujući drugi i treći stupac vidljiva je ušteda potrošnje goriva, isključivanjem cilindara, od 26,8%.



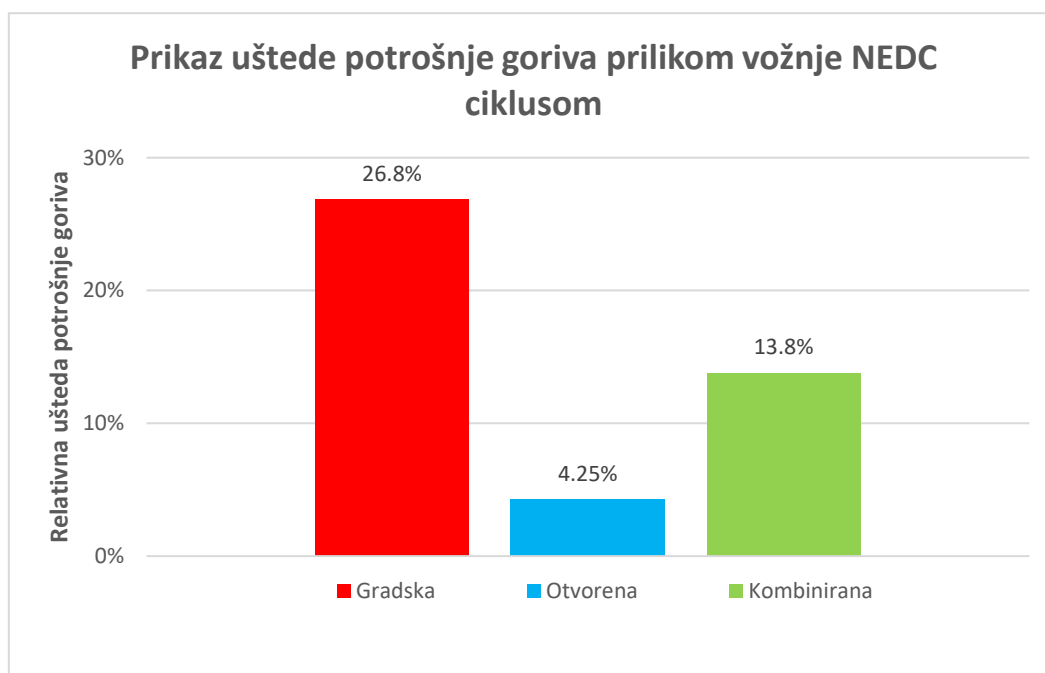
Slika 37. Prikaz potrošnje goriva prilikom vožnje otvorenom cestom po standardiziranom voznom ciklusu NEDC

Iz Slike 37. vidljiva je potrošnja goriva prilikom vožnje otvorenom cestom. Razlika između deklariranog podatka o potrošnji goriva i podatka dobivenog u modeliranom NEDC ciklusu u Microsoft Excelu je 6,46%, iz čega se može zaključiti da je modelirana vožnja otvorenom cestom u NEDC ciklusu prihvatljiva. Uspoređujući drugi i treći stupac vidljiva je ušteda potrošnje goriva, isključivanjem cilindara, od 4,25%.



Slika 38. Prikaz potrošnje goriva prilikom kombinirane vožnje po standardiziranom voznom ciklusu NEDC

Iz Slike 38. vidljiva je potrošnja goriva prilikom kombinirane vožnje. Razlika između deklariranog podatka o potrošnji goriva i podatka dobivenog u modeliranom NEDC ciklusu u Microsoft Excelu je 5,74%, iz čega se može zaključiti da je modelirana kombinirana vožnja u NEDC ciklusu prihvatljiva. Uspoređujući drugi i treći stupac vidljiva je ušteda potrošnje goriva, isključivanjem cilindara, od 13,8%.



Slika 39. Prikaz uštede potrošnje goriva

Iz Slike 39. vidljiv je raspon uštede potrošnje goriva od 4 do skoro 27% ovisno o načinu vožnje u NEDC ciklusu. Već je prije spomenuto da se očekuju uštede od 8 do 20%, ovisno od literature odnosno provedenog istraživanja, pa se može zaključiti da su dobiveni rezultati zadovoljavajući.

7. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu promatrana je metoda nasumičnog isključivanja cilindara. Sukladno tome provedena je simulacija rada 2.0 FSI motora u programskom paketu AVL BOOST™. Pošto program nema mogućnost upravljanja s algoritmima za kontrolu nasumičnog isključivanja cilindara, simulacija je provedena sa kontinuiranim isključivanjem različitih broja cilindara i bez isključivanja cilindara. S kontinuiranim isključivanjem cilindara dobiveni su potrebni podaci o specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva te je sukladno tome definirana optimalna radna mapa motora. U ovom radu nije analiziran potpuni efekt DSF tehnologije jer se u gotovo cijelom području rada motora koristila i zaklopka. Ovo je kombinirani pristup, ali zbog smanjivanja broja aktivnih cilindara smanjuje se negativni rad izmjene radne tvari zbog prigušenja usisa kako idemo na manja opterećenja. Krajnji dobiveni efekt je isti, u pogledu da motor radi u najpovoljnijem režimu rada s najpovoljnijom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva koristeći pri tome minimalan potreban broj radnih cilindara.

Isključivanjem cilindara dolazi do povećanja opterećenja radnih cilindara te se negativni rad izmjene radnog medija smanjuje što nam povećava stupanj djelovanja motora. Analizom simulacijskih rezultata dobiveni su potrebni podaci za izračun potrošnje goriva u NEDC standardiziranom voznom ciklusu. Rezultati pokazuju uštedu potrošnje goriva u gradskoj vožnji od 26,8%, u vožnji otvorenom cestom od 4,25%, a prilikom kombinirane vožnje ušteda iznosi 13,8%. Već je prije spomenuto da se upotrebom nasumičnog isključivanja cilindara očekuje ušteda potrošnje od 8 do 20%, ovisno od literature odnosno provedenog istraživanja. Sukladno tome može se zaključiti da su dobiveni rezultati zadovoljavajući jer ne odstupaju od očekivanih.

Iz rezultata ovog rada može se zaključiti da je sustav za nasumično isključivanje cilindara dobro rješenje u pogledu smanjenja potrošnje goriva, posebno kod niskih opterećenja i malih brzina vrtnje, posebice prilikom gradske vožnje, gdje se vide najveće uštede.

LITERATURA

- [1] Mahalec, Lulic, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [2] Grdinic S., *Granice isključivanja cilindara kao metode za smanjenje potrošnje goriva*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [3] <https://www.tulatech.com/dsf-overview/> (rujan 2020.)
- [4] <https://www.schaeffler.com/> (rujan 2020.)
- [5] <http://schaeffler-events.com/symposium/lecture/e2/index.html> (rujan 2020.)
- [6] Elliott Ortiz-Soto, Robert Wang, Masaki Nagashima, and Matthew Younkins, Tula Technology Inc., *Dynamic Skip Fire with Homogeneous Lean Burn for Improved Fuel Consumption, Emissions and Drivability*, 03.04.2018.
- [7] Mark Wilcutts, Masaki Nagashima, Kian Eisazadeh-Far and Matthew Younkins, Tula Technology, Inc., *Electrified Dynamic Skip Fire (eDSF): Design and Benefits*, 03.04.2018.
- [8] S Kevin Chen, Aditya Mandal, Li-Chun Chien, and Elliott Ortiz-Soto, Tula Technology, Inc. *Machine Learning for Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine*, 03.04.2018.
- [9] Mark Wilcutts, Joshua Switkes, Mark Shost and Adya Tripathi, Tula Technology, Inc. *Design and Benefits of Dynamic Skip Fire Strategies for Cylinder Deactivated Engines*, 04.08.2013.
- [10] T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae, P.G. Boulter: *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, 06/2009
- [11] Lulic, Ormuž, Šagi: *Motorna vozila – skripta iz predavanja*, FSB Zagreb, 2019/2020.
- [12] <https://www.autoplenum.de/auto/audi/a3/kompaktwagen-2003/2-0-fsi-150-ps>
(rujan 2020.)
- [13] <https://mlfree.com/2-0-fsifsi-motor/> (rujan 2020.)
- [14] https://www.automobilecatalog.com/car/2004/251015/audi_a3_sportback_2_0_fsi.html
(rujan 2020.)

[15] AVL BOOST™ - version 2013.2., *Users Guide and Theory*

PRILOZI

I. CD-R disc