

Promjene značajki rada i opterećenja motora s unutarnjim izgaranjem prilikom promjene pogonskog goriva s benzina na vodik

Pirraku, Zana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:690784>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zana Pirraku

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Zana Pirraku

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Momiru Sjeriću na korisnim savjetima i strpljenju prilikom pisanja ovog rada.

Još bih se zahvalila obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom dosadašnjeg studiranja, a posebno svojim roditeljima koji su mi uvijek bili oslonac i vjerovali u mene.

Zana Pirraku



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Zana Pirraku** Mat. br.: 0035205886

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Promjene značajki rada i opterećenja motora s unutarnjim izgaranjem prilikom promjene pogonskog goriva s benzina na vodik**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The change in performance and in load of internal combustion engine when fuel is changed from gasoline to hydrogen**

Opis zadatka:

Sve očitiji utjecaj ljudskog djelovanja na klimatske promjene doveo je do svijesti da se emisije stakleničkih plinova, prvenstveno CO₂, moraju znatno smanjiti. Smanjenje emisije CO₂ u transportu može se ostvariti značajnim povećanjem učinkovitosti motora, primjenom alternativnih pogona (električna vozila) ili pak primjenom alternativnih goriva koja u sebi sadrže manje ili uopće ne sadrže ugljik, kao npr. vodik. Vodik je plinovito gorivo koje u odnosu na benzin ima visoki oktanski broj, malu gustoću, veću brzinu širenja plamena te drugačija toplinska svojstva. Zbog toga će zamjena benzinskog goriva vodikom, pored toga što će ispuh iz motora biti bez CO₂, u motoru s unutarnjim izgaranjem uzrokovati promjene u značajkama rada te u toplinskim i mehaničkim opterećenjima motora.

U ovom radu potrebno je prikazati potrebne radnje da se konvencionalni motor pogonjen benzinom preradi na pogon vodikom. Pored toga, u softverskom paketu AVL Boost™ potrebno je izračunati i prikazati promjene u značajkama rada koje će se desiti prilikom opisane promjene goriva.

U radu je stoga potrebno:

- Odabrati suvremeni Ottov motor i za isti napraviti simulacijski model u programu AVL Boost™.
- Podesiti model tako da daje približne značajke rada onima koje su dostupne za taj motor.
- Odrediti potrebne promjene koje će omogućiti primjenu vodika u motoru.
- Pomoću modela motora u programu AVL Boost™ izračunati promjene u značajkama rada.
- Prikazati rezultate i izvesti zaključke.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

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

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

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM.....	2
2.1. Ottov motor	2
2.2. Izgaranje.....	4
2.3. Benzin	6
3. VODIK	10
3.1. Glavne karakteristike vodika	10
3.2. Vodik u MSUI.....	11
3.2.1. Razlike vodikovog i benzinskog motora.....	11
3.2.2. Cestovna vozila s pogonom na vodik	13
4. SIMULACIJSKI PRIKAZ BENZINSKOG MOTORA.....	15
4.1. Simulacija Ottovog motora	15
4.1.1. <i>Mazda MX-5</i>	15
4.1.2. Simulacijski prikaz motora <i>Mazde MX-5</i>	17
4.1.3. Rezultati simulacijskog prikaza motora <i>Mazde MX-5</i>	20
5. SIMULACIJSKI PRIKAZ VODIKOVOG MOTORA.....	23
5.1. Simulacijski prikaz pogona na vodik bez promjene geometrijskih parametara.....	23
5.2. Simulacijski prikaz pogona na vodik sa promjenom geometrijskih parametara	26
5.3. Dovođenje maksimalne efektivne snage vodikovog motora na maksimalnu efektivnu snagu vodika	30
6. ANALIZA REZULTATA	32
6.1. Maksimalna temperatura i tlak u cilindru	32
6.2. Efektivni stupanj djelovanja.....	35
6.3. Emisija NO _x , HC i CO spojeva	36
7. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	43
PRILOZI.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1. Četverotaktni motor s unutarnjim izgaranjem [7].....	2
Slika 2. Ottov idealni radni proces [1]	3
Slika 3. Ottov stvarni radni proces [1]	3
Slika 4. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora [1]	5
Slika 5. Faktor zraka λ u radnom području Ottovog motora [1]	6
Slika 6. Destilacijska krivulja benzina [1]	7
Slika 7. <i>BMW Hydrogen 7</i> [8].....	14
Slika 8. Shema unutarnjih dijelova <i>Hydrogen 7</i> automobila [9].....	14
Slika 9. <i>Mazda MX-5</i> [11]	16
Slika 10. Simulacijski model motora <i>Mazde MX-5</i>	18
Slika 11. Dijagram efektivne snage.....	20
Slika 12. Dijagram efektivnog momenta.....	21
Slika 13. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja benzinovog motora.....	21
Slika 14. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja benzinovog motora	22
Slika 15. Dijagram usporedbe efektivne snage benzina i vodika kod maksimalnog opterećenja	23
Slika 16. Dijagram usporedbe efektivnog momenta benzina i vodika kod maksimalnog opterećenja.....	24
Slika 17. Oktanski broj kod najvećeg opterećenja benzina i vodika.....	25
Slika 18. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja vodikovog motora	25
Slika 19. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja vodikovog motora	26
Slika 20. Iteracija kompresijskog omjera u svrhu definiranja gornje granice detonacije kod vodikovog motora.....	27
Slika 21. Ponovna iteracija kompresijskog omjera u svrhu definiranja gornje granice detonacije kod vodikovog motora	27
Slika 22. Dijagram efektivne snage – usporedba svih provedenih konfiguracija	28
Slika 23. Dijagram efektivnog momenta – usporedba svih provedenih konfiguracija	29
Slika 24. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja vodikovog motora s promjenom kompresijskog omjera.....	29
Slika 25. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja vodikovog motora s promjenom kompresijskog omjera.....	30
Slika 26. Usporedba maksimalne snage benzinovog i vodikovog motora izvedenih s različitim sustavima za ubrizgavanje.....	31
Slika 27. Topografski dijagram najveće temperature u cilindru za benzin.....	33
Slika 28. Topografski dijagram najveće temperature u cilindru za vodik	33
Slika 29. Topografski dijagram najvećeg tlaka u cilindru za benzin	34
Slika 31. Topografski dijagram efektivnog stupnja djelovanja za benzin	35
Slika 32. Topografski dijagram efektivnog stupnja djelovanja za vodik.....	36
Slika 33. Topografski dijagram emisije NO _x spojeva za benzin	37
Slika 34. Topografski dijagram emisije NO _x spojeva za vodik.....	37
Slika 36. Topografski dijagram emisije HC spojeva za vodik	38
Slika 37. Topografski dijagram emisije CO spojeva za benzin	39
Slika 38. Topografski dijagram emisije CO spojeva za vodik.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijska svojstva vodika [6]	10
Tablica 2. Specifikacije <i>Mazde MX-5</i> [11].....	16
Tablica 3. Specifikacije motora <i>Mazde MX-5</i> [11]	17
Tablica 4. Vibeov dvozonski model izgaranja	19

POPIS OZNAKA**Latinične oznake**

Oznaka	Jedinica	Opis
A_r	gmol^{-1}	Relativna atomska masa
D	mm	Promjer klipa
H	mm	Hod klipa
H_d	MJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost
M_e	Nm	Efektivni moment motora
P_e	kW	Efektivna snaga motora
Q_1	J	Toplina dovedena u proces
Q_2	J	Toplina odvedena iz procesa
T	K	Temperatura u cilindru
T_1	K	Temperatura na početku kompresije
T_2	K	Temperatura na kraju kompresije
V_H	m^3	Volumen cilindra
W_1	J	Rad desnokretnog procesa u p, V -dijagramu
W_2	J	Rad lijevokretnog procesa u p, V -dijagramu
W_2	J	Rad lijevokretnog procesa u p, V -dijagramu
W_i	J	Indicirani rad
Z	kgz/kgG	Stvarna količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva
Z_0	kgz/kgG	Stehiometrijska količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva
$d_{v,i}$	mm	Promjer ispušnog ventila
$d_{v,u}$	mm	Promjer usisnog ventila
l	mm	Duljina klipnjače
n	min^{-1}	Brzina vrtnje motora
n_v	-	Broj ventila po cilindru
p	bar	Tlak u cilindru
z	-	Broj cilindara

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
ΔH_{fus}	kJmol^{-1}	Toplina taljenja
ΔH_{vap}	kJmol^{-1}	Toplina isparavanja
α	°	Kut zakreta koljenastog vratila
γ	-	Omjer specifičnih toplina pri konstantnom tlaku i volumenu
ε	-	Kompresijski omjer
η_e	-	Efektivni stupanj djelovanja

ϑ_t	°C	Temperatura talište
ϑ_v	°C	Temperatura vrelišta
λ	-	Faktor pretička zraka
ρ	kgm ⁻³	Gustoća

POPIS KRATICA

Oznaka	Jedinica
CO	Ugljikov monoksid
CO ₂	Ugljikov dioksid
C _x H _y	Ugljikovodik
H ₂	Vodik
H ₂ O	Voda
HC	Ugljikovodik (zaostali)
N ₂	Dušik
NO	Dušikov monoksid
NO ₂	Dušikov dioksid
NO _x	Dušični oksid
O ₂	Kisik
OB	Oktanski broj

SAŽETAK

U svrhu smanjenja štetne emisije u ispuhu motora s unutarnjim izgaranjem, nameće se potreba za odabirom alternativnog goriva. Jedna od opcija je vodik, plinovito gorivo specifičnih kemijskih svojstava. U ovom završnom radu opisane su potrebne radnje kako bi se konvencionalni Ottov motor preradio na motor pogonjen vodikom.

Mala gustoća, niska temperatura vrelišta i tališta, te visoka temperatura samozapaljenja igrat će ulogu u konstrukcijskoj izvedbi takvog motora. Najvažnije geometrijske preinake biti će potreba za većim cilindrom za izgaranje, te za većim i bolje toplinski izoliranim spremnikom za gorivo. S obzirom na znana svojstva vodika objasniti će se konkretan primjer proizvedenog konvencionalnog automobila na vodik.

Za potrebe rada napravljena je simulacija jednostavnog Ottovog motora u programu AVL BoostTM, podešena na način da daje vrijednosti efektivne snage i momenta deklarirane od proizvođača. S obzirom na simulaciju benzinovog motora, napravljene su dvije konfiguracije vodikovog motora; sa i bez promjene geometrijskih parametara. Svaka od njih daje svojstvene značajke rada čiji su rezultati prikazani u dijagramima. Na temelju provedenih simulacijskih kalibracija napravljene su usporedni topografski dijagrami pojedinih ključnih parametara (mehaničkih i toplinskih opterećenja, efektivnog stupnja djelovanja i koncentracije štetnih emisija).

Ključne riječi: AVL BoostTM, Ottov motor, vodik, potrošnja goriva, štetne emisije

SUMMARY

To reduce harmful emissions in the exhaust of internal combustion engines, there is a need to choose an alternative fuel. One option is hydrogen, a gaseous fuel with specific chemical properties. This bachelor thesis describes the actions required to convert a conventional Otto engine to a hydrogen-powered engine.

Low density, low boiling point and melting point, and high autoignition temperature will play a role in the design of such an engine. The most important geometric modifications will be the need for a larger combustion cylinder and a larger and better thermally insulated fuel tank. Given the known properties of hydrogen, a specific example of a conventional hydrogen-produced car will be explained.

For the need of this paper, a simulation of a simple Otto engine was made in the AVL Boost™ software, adjusted in a such way to give the maximum engine performance values declared by the manufacturer. Regarding the gasoline engine simulation, two configurations of the hydrogen engine were made; with and without changing geometric parameters. Each of them provides inherent features of the work and their results are shown in the diagrams. Based on the performed simulation calibrations, comparative topographic diagrams of individual key parameters (mechanical and thermal loads, effective efficiency, and concentration of harmful emissions) were made.

Key words: AVL Boost™, Otto engine, hydrogen, fuel consumption, harmful emissions

1. UVOD

Motori s unutarnjim izgaranjem jedan su od najvećih zagađivača okoliša, a konstantna industrijalizacija današnjeg svijeta to pospješuje. Konkretnan problem čini izgaranje fosilnog goriva u motoru, čiji je rezultat visoka emisija štetnih CO, HC i NO_x spojeva. Takvo djelovanje uzrokuje zagrijavanje našeg planeta, te ima za posljedicu mnoge prirodne katastrofe. Kako bi to izbjegli i očuvali što duže život koji znamo, upotreba alternativnog goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem nameće se kao logičan izbor. Kako bi mogli efikasno koristiti takvo gorivo, ono mora biti prikladno za korištenje u postojećim konstrukcijskim izvedbama motora ili s minimalnom izmjenom. Također mora se lako skladištiti, prenositi, te imati nižu ili nikakvu emisiju štetnih tvari. Jedna od opcija alternativnog goriva svakako je vodik.

Vodik se odavno koristi za pogon raketnih vozila, no neko vrijeme cilj je mnogih automobilskih tvrtki bio razvoj funkcionalnog automobila na vodik za korištenje u komercijalne svrhe. Činjenica da se vodikovim izgaranjem dobiva samo voda, jedan je od glavnih argumenata za njegovo uvođenje u konvencionalne motore s unutarnjim izgaranjem. A kada bi uzeli u obzir da je moguće duže komprimirati radnu smjesu s vodikom, mogli bi zaključiti da će takvi motori imati veći kompresijski omjer od benzinovih, a s time i veći termički stupanj djelovanja procesa. Unatoč tome, mnoge su automobilske kompanije odustale od idejnih projekata vezanih uz razvoj vodikovih motora, s tvrdnjom da motori pogonjeni fosilnim gorivima ipak imaju bolje performanse.

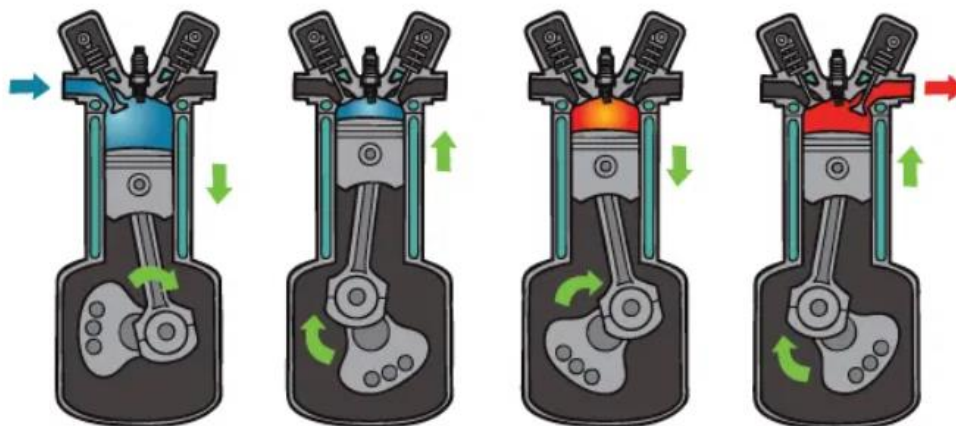
Cilj ovog rada prikazati je potrebne radnje da se konvencionalni, jednostavni, a suvremeni motor pogonjen benzinom preradi na pogon vodikom. Također, potrebno je pomoću softverskog paketa AVL BoostTM izračunati i prikazati promjene u značajkama rada te u toplinskim i mehaničkim opterećenjima motora koje će se dogoditi prilikom opisane promjene goriva.

2. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s unutarnjim izgaranjem toplinski su strojevi koji pretvaraju kemijsku energiju goriva u mehaničku energiju te se koriste za pogon različitih cestovnih i željezničkih vozila. Dvije glavne karakteristike koje opisuju svaki motor s unutarnjim izgaranjem su trajanje jednog radnog procesa, to jest broj taktova, i način zapaljenja goriva u cilindru. S obzirom na broj taktova, motor može biti dvotaktni, četverotaktni i šesterotaktni, a s obzirom na način zapaljenja goriva u cilindru, Ottov i Dieselov motor. U nastavku će konkretnije biti pojašnjen Ottov četverotaktni motor.

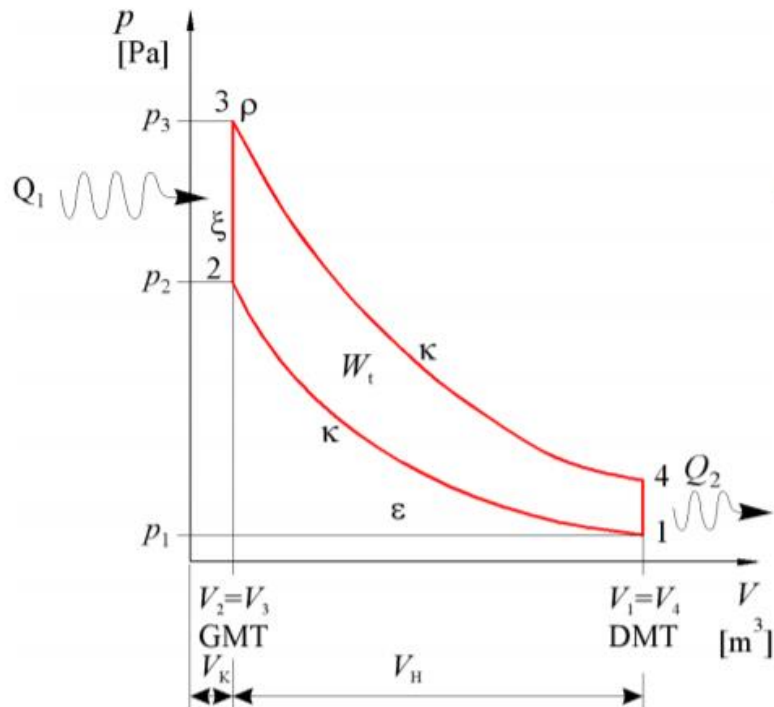
2.1. Ottov motor

Radni proces svakog motora s unutarnjim izgaranjem sastoji se od četiri dijela: usis, kompresija, ekspanzija i ispuh. U taktu usisa, u cilindar ulaze svježi radni plinovi koji se zatim u taktu kompresije tlače, te im se povećavaju tlak i temperatura. Nešto prije završetka kompresije započinje izgaranje, koje utječe na ekspanziju na način da oslobođena toplina povećava tlak i temperaturu plinovima u cilindru. Zatim slijedi takt ispuha u kojem se plinovi istiskuju iz cilindra kroz otvoreni ispušni ventil. Kod četverotaktnih motora jedan radni proces utječe da se koljenasto vratilo okrene dva puta. Korektnije možemo reći da se kemijska energija nastala izgaranjem goriva pretvara prvo u toplinsku energiju, koja utječe na visoku temperaturu i tlak plinova tijekom ekspanzije, a zatim se pod njihovim utjecajem giba klip, osovinica i klipnjača, te se koljenasto vratilo zakreće, to jest dobiva se mehanički rad na njemu. Na slici 1. prikazani su taktovi u četverotaktnom motoru. [1]



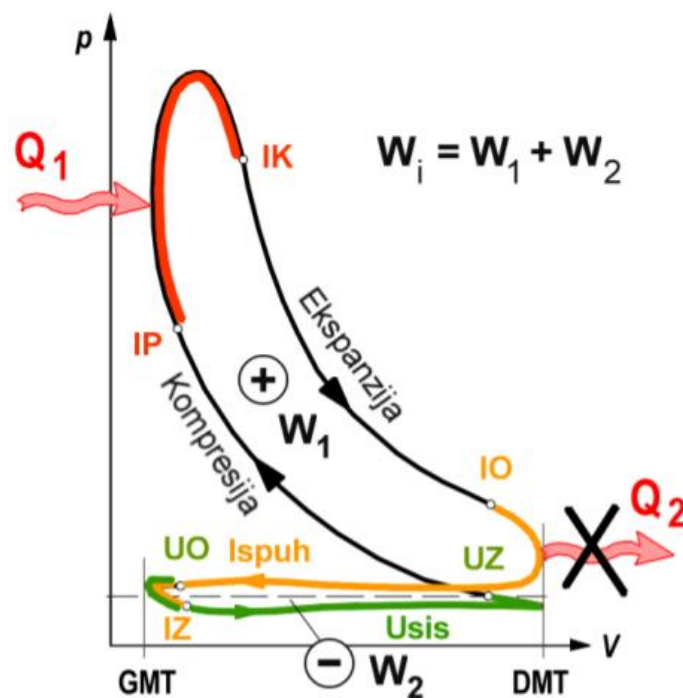
Slika 1. Četverotaktni motor s unutarnjim izgaranjem [7]

Ottov radni proces osnova je rada Ottovog motora. Ottov idealni kružni proces prikazan je na slici 2.



Slika 2. Ottov idealni radni proces [1]

Sastoji se od izentropske kompresije (1-2), dovođenja topline pri konstantnom volumenu (2-3), izentropske ekspanzije (3-4) i odvođenja topline pri konstantnom volumenu (4-1). No kako u stvarnosti ovakav raspored termodinamičkih promjena stanja nije moguć, dijagram zapravo izgleda kao na slici 3. [1]



Slika 3. Ottov stvarni radni proces [1]

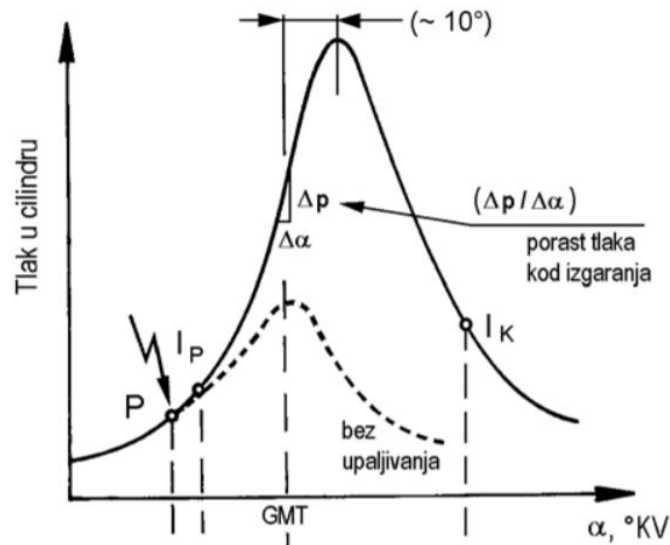
U idealnom procesu izgaranje je zamijenjeno dovođenjem topline, ali to ne može nikako biti cijelo vrijeme pod konstantnim volumenom jer ekspanzija počinje nastupati vrlo brzo i klip se spušta prema dolje. Isto tako kompresija i ekspanzija nisu izentropske jer je nemoguće postići takvu promjenu stanja bez izmjene topline između radne tvari i stijenke. Usis i ispuh nisu niti prikazani u dijagramu idealnog Ottovog ciklusa jer nisu termodinamičke promjene stanja, već samo predstavljaju izmjenu radne tvari s okolišem, što se ne poklapa sa pretpostavkom idealnog modela da cijelo vrijeme imamo zatvoreni proces. Stvarni Ottov proces sastoji se od desnokretnog radnog dijela, te lijevokretnog dijela izmjene radne tvari. Time se želi ukazati na činjenicu da se u stvarnosti nikada ne može iskoristiti cijela energija oslobođena izgaranjem i dio uvijek odlazi na različite toplinske i mehaničke gubitke.[1]

2.2. Izgaranje

U taktu usisa motor usisava zrak iz okoliša, a gorivo se ubrizgava izravno u cilindar ili usisnu cijev. To je takozvana unutarnja priprema gorive smjese. S druge strane, vanjska priprema gorive smjese označavala bi usisavanje gotove smjese goriva i zraka. Motori s izravnim ubrizgavanjem goriva u usisnu cijev nude veće potencijalne mogućnosti smanjenja potrošnje goriva, te će takav model miješanja goriva sa zrakom biti jedan od obilježja simulacije provedene u ovom završnom radu. [1]

Kod Ottovog motora izgaranje započinje paljenjem radne smjese električnom iskrom svjećice, s obzirom da je temperatura koju radna smjesa postiže tijekom takta kompresije preniska za samozapaljenje (400-500°C). Smjesa se komprimira na maksimalni tlak 20-30 bara, a kompresijski omjer kreće se u granicama $\varepsilon = 8 \dots 12$. [1]

Paljenje smjese idealno započinje od 20 do 50°KV prije GMT, kako bi težište izgaranja (točka do koje je izgorjelo 50% goriva unesenog u proces) bilo oko 10°KV iza GMT. U takvim uvjetima indicirani je rad najveći (suma pozitivnog rada dobivenog radnim dijelom procesa i negativnog dobivenog izmjenom radne tvari). Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora prikazan je na slici 4. [1]



Slika 4. Dijagram tlaka u cilindru Ottovog motora [1]

Energija iskre, tj. zapaljenja je energija potrebna za sigurno upaljivanje smjese i ovisi o omjeru goriva i zraka, te kod stehiometrijske smjese benzina i zraka iznosi oko 0,24 mJ. Omjer goriva i zraka prikazuje se pomoću faktora pretička zraka λ :

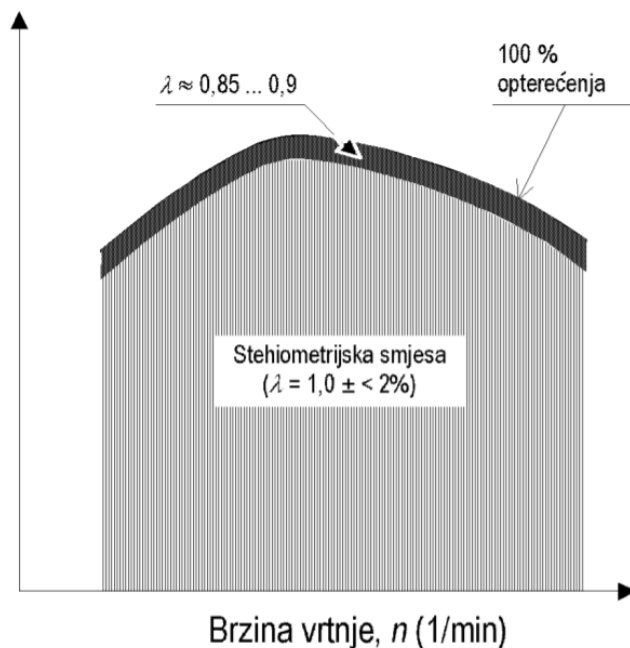
$$\lambda = \frac{Z}{Z_0} \quad (2.1)$$

gdje je:

Z – stvarna količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva [kgz/kg_G];

Z_0 – stehiometrijska količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva, tj. ona količina zraka s kojom bi 1 kg goriva u idealnim uvjetima potpuno izgorio, ali tako da u produktima izgaranja ne bi bilo slobodnog kisika [kgz/kg_G]. [1]

Ako je omjer stvarne i stehiometrijske količine zraka manji od jedan govorimo o bogatoj gorivoj smjesi, ako je veći od jedan govorimo o siromašnoj gorivoj smjesi, a ako je jednak jedan, to jest ako je stvarna količina zraka jednaka stehiometrijskoj, govorimo o stehiometrijskoj smjesi. Na slici 5. prikazan je faktor zraka λ u radnom području Ottovog motora. [1]



Slika 5. Faktor zraka λ u radnom području Ottovog motora [1]

Najranija točka paljenja ograničena je pojavom detonantnog izgaranja. Detonacija je nepoželjno i nenormalno izgaranje do kojeg dolazi u situaciji kada neizgorjeloj smjesi u cilindru temperatura naraste iznad temperature samozapaljenja. Kako se u cilindru u isto vrijeme nalaze i produkti izgaranja i neizgorjela smjesa, produkti izgaranja svojim širenjem tlače neizgorjelu smjesu te joj na taj način povišu temperaturu i tlak. Cilj je postići ujednačeno izgaranje postavljanjem svjećice na optimalan položaj u komori za izgaranje kako bi se smjesa palila ravnomjerno. Također trebalo bi postići uvjete bez ranijih početaka paljenja smjese i prevelikih kompresijskih omjera (iznad granica raspona $\varepsilon = 8 \dots 12$), kako ne bi produživanjem kompresije omogućili neizgorjeloj smjesi da bude duži period od dozvoljenog u prisustvu vrućih ispušnih plinova. [1]

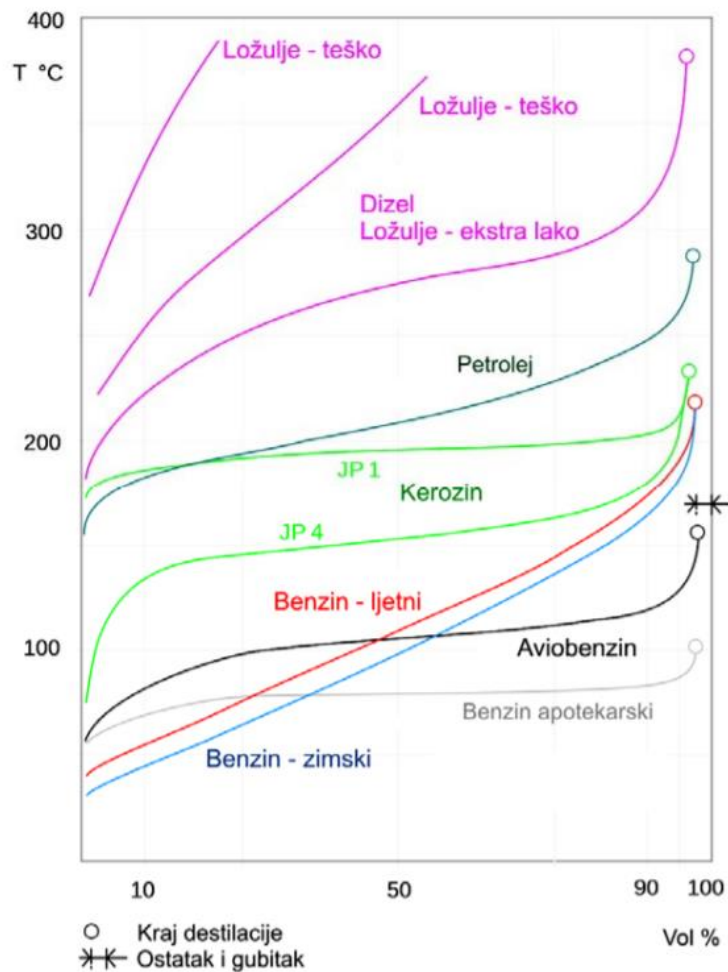
Zanimljivo je kako snaga raste s kompresijskim omjerom, a s njime i opasnost od detonacije. Reguliranje snage kod Ottovog motora vrši se povećanjem ili smanjenjem stupnja punjenja, tj. promjenom količine usisavane smjese. To se izvodi prigušivanjem usisa pomoću zaklopke u usisnoj cijevi, a omjer goriva i zraka pritom se ne mijenja. [1]

2.3. Benzin

Benzin je produkt frakcijske destilacije nafte, te je po građi smjesa cikličkih i lančanih ugljikovodika C_4 - C_{12} (parafini, olefini, cikloalkani). Motorni benzin smjesa je benzina i različitih aditiva, ovisno o želji za poboljšanjem pojedinih značajki goriva ili motora. Motorni benzin dakle nema standardnu kemijsku strukturu već ona ovisi o broju ugljikovih atoma i

aditivu koji je dodan. U daljnjem tekstu referirat ćemo se samo na benzin upotrebljiv u motorima s unutarnjim izgaranjem. [2]

Za dobro ponašanje motora u različitim pogonskim uvjetima važno je razumjeti destilacijsku krivulju benzina. Ona prikazuje koji će volumni udio goriva ispariti pri nekoj temperaturi. Pri analizi destilacijske krivulje uzima se pet referentnih točaka: temperatura početka destilacije ($T_{poč} \sim 40^{\circ}\text{C}$), temperatura 10% destiliranog goriva (T_{10}), temperatura 50% destiliranog goriva (T_{50}), temperatura 90% destiliranog goriva (T_{90}) i temperatura kraja destilacije ($T_{kraj} \sim 200^{\circ}\text{C}$). Destilacijska krivulja prikazana je na slici 6. [1]



Slika 6. Destilacijska krivulja benzina [1]

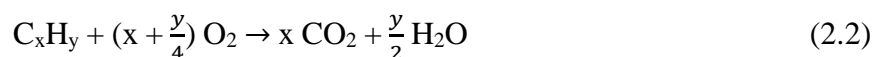
Glavni zahtjev koji gorivo za Ottove motore mora ispunjavati otpornost je na detonantno izgaranje. Ta se otpornost iskazuje oktanskim brojem goriva, čija veća vrijednost znači da je gorivo otpornije na detonaciju. Oktanski broj određuje se ispitivanjem, točnije smještanjem ispitivanog goriva na skalu između dviju krajnjih referentnih vrijednosti, na detonaciju otpornog izooktana C_8H_{18} (OB 100) i detonaciji sklonog n-heptana C_7H_{16} (OB 0). Gorivo se

stavlja u ispitni motor i izaziva se namjerna pojava detonacije kako bi se ustanovilo kako se gorivo ponaša u takvim uvjetima. Zatim se slaže smjesa izooktana i n-heptana koja bi davala isti intenzitet detonacije u postavljenim uvjetima kao i ispitivano gorivo. Oktanski broj ispitivanog goriva tada je jednak volumnom postotku izooktana u smjesi dva referentna ugljikovodika. [1]

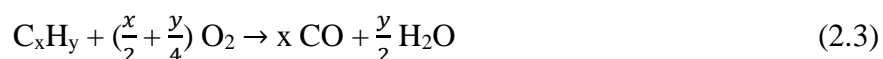
Kako bi poboljšali svojstva goriva, značajke performansa vozila ili zadovoljili nametnute standarde i norme, u benzin se dodaju aditivi. Oni se dodaju u malim količinama tako da se sastav goriva ne mijenja jako (i dalje je baza ugljikovodik), i uglavnom se odmah dodaju u proizvodnji. Čisti benzin ima nizak oktanski broj i to je bio jedan od glavnih razloga zašto su se aditivi počeli upotrebljavati. Primjeri aditiva su: aditivi za poboljšanje tečenja, koji olakšavaju paljenje motora u zimskim uvjetima; inhibitori korozije, čija je svrha eliminacije zaostale vode iz benzina koja bi u reakciji sa zrakom mogla utjecati na stvaranje korozije na metalnim dijelovima u motoru; aditivi protiv stvaranja naboja, koji sprječavaju stvaranje neželjene električne iskre i preranog paljenja smjese; deaktivatori metala, koji sprječavaju metalnim dijelovima konstrukcije motora reagiranje sa drugim metalnim dijelovima i stvaranje topivih soli u gorivu; aditivi za uklanjanje naslaga čestica i nečistoća u usisu itd. [2]

Motori s unutarnjim izgaranjem u ispušnim plinovima imaju različite otrovne i štetne spojeve od kojih se izdvajaju CO, HC i NO_x spojevi.

Benzin potpuno izgara u ugljikov dioksid i vodenu paru kako je prikazano u slijedećoj jednadžbi:



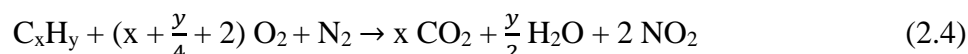
No u stvarnosti to nije uvijek tako. Nedovoljna količina kisika pri izgaranju utječe na stvaranje otrovnog ugljikovog monoksida, plina bez boje, mirisa i okusa, koji se veže na hemoglobin u krvi i sprječava prijenos kisika. Ugljikov monoksid također može nastati izgaranjem siromašne smjese. Iako takva smjesa ima višak kisika, a manjak goriva, zbog nedovoljno dobrog miješanja za rezultat se dobiva izrazito nehomogena smjesa čiji dijelovi imaju različitu koncentraciju kisika. Nepotpuno izgaranje benzina prikazano je jednadžbom (3):



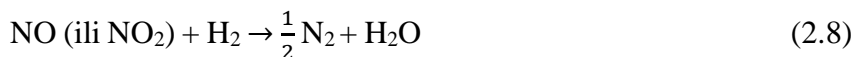
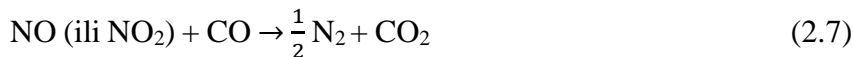
Nepotpuno izgaranje jedan je od faktora koji utječe i na stvaranje neizgorenih ugljikovodika HC. Razloga za izgaranje s kisikom u suvišku je nekoliko; zaostajanje smjese u malim procjepima komore za izgaranje, zaostajanje smjese u uljnom filmu komore za izgaranje,

te bježanje smjese u ispuh tijekom prekrivanja ventila (period u kojem su u isto vrijeme otvoreni i usisni i ispušni ventil, slika 3.). [1]

Jednadžbe (2.2) i (2.3) prikazuju izgaranje benzina na zraku, ali ne uzimaju u obzir i činjenicu da ugljikovodik ne reagira samo s kisikom iz zraka već i s dušikom, što za produkt izgaranja uz sve prije navedeno ima i dušični oksid (monoksid ili dioksid). Emisija NO_x spojeva raste povećanjem opterećenja motora (primjerice vožnja uzbrdicom ili naglo ubrzavanje) i s temperaturom izgaranja. Dušični oksidi izravno utječu na stvaranje smoga i kiselih kiša. U jednadžbi (4) prikazano je izgaranje benzina u kojem nastaje i NO_x spoj:



Unazad pedeset godina radi se na smanjenju štetne emisije ispušnih plinova. Kroz različita istraživanja došlo se do zaključka da se ograničenja kod Ottovih motora mogu zadovoljiti samo primjenom bezolovnog benzina i katalizatora. Tu se izdvaja trokomponentni katalizator koji razlaže CO, NO_x i HC na način prikazan u slijedećim jednadžbama:



Unatoč strogim regulacijama vezano uz emisiju štetnih plinova neki proizvođači automobila odlučili su otići u drugom smjeru kako bi smanjili zagađenje okoliša, a to je zamjenom benzina, goriva s dugogodišnjom tradicijom korištenja, nekom drugom opcijom. Tu se izdvaja pogon motornih vozila na vodik.

3. VODIK

3.1. Glavne karakteristike vodika

Vodik (H_2) je prvi kemijski element u periodnom sustavu elemenata, no unatoč tome ne pripada alkalijskim elementima pored kojih se nalazi. Naziv mu dolazi od grčke riječi *hydrogene*, onaj koji stvara vodu, što aludira na jednu od temeljnih kemijskih jednadžbi života:



U tablici 1. prikazana su osnovna kemijska svojstva vodika:

Tablica 1. Kemijska svojstva vodika [6]

KEMIJSKO SVOJTVO	OZNAKA	VRIJEDNOST	MJERNA JEDINICA
Atomski broj	Z	1	-
Relativna atomska masa	A_r	1,008	$g\text{mol}^{-1}$
Gustoća	ρ	0,0899 (pri 20°C)	kg/m^3
Talište	ϑ_t	-259,2	°C
Vrelište	ϑ_v	-252,8	°C
Toplina taljenja	ΔH_{fus}	0,117	kJ/mol
Toplina isparavanja	ΔH_{vap}	0,904	kJ/mol

Pri standardnim uvjetima zapaljivi je plin bez boje, mirisa i okusa, lakši je od zraka i neutrovan je. Slabo je topiv u polarnim, a dobro u nepolarnim otapalima. Osim kao plin, pojavljuje se i u druga dva agregatna stanja, kao bezbojna tekućina i čvrsta heksagonska kristalna struktura. Na sobnoj temperaturi nije previše reaktivan zbog snažne kovalentne veze u molekuli, za koju se smatra da je naj snažnija od svih jednostrukih veza između istovrsnih atoma. Reaktivnost mu raste s temperaturom. Ima tri znana izotopa – procij, deuterij i tricij, od kojih je tricij radioaktivan. [6]

Vodik je najrasprostranjeniji kemijski element na Zemlji. Nalazi se u oceanima, rijekama i ledenjacima u obliku vode, u nafti i životinjskim i biljnim tkivima kao dio organskih spojeva, te u elementarnom obliku u atmosferi. Čini tri četvrtine mase svemira, te je ishodišna čestica iz koje nuklearnom fuzijom nastaju složeniji kemijski elementi. Za masovnu upotrebu dobiva se pak elektrolizom vode (razlaganje vode na vodik i kisik uslijed djelovanja električne struje), pirolizom metana (razgradnja organskih spojeva pri povišenoj temperaturi u

anaerobnim uvjetima), parnim reformiranjem nižih ugljikovodika i vodene pare (kidanje ugljikovodičnih veza pri povišenoj temperaturi) ili na tradicionalan način, onako kako ga je prvi put dobio Henry Cavendish, reakcijom cinka i klorovodične kiseline. [6]

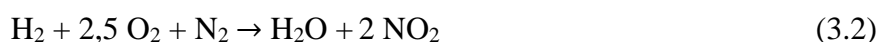
U industriji se najviše primjenjuje u različitim petrokemijskim procesima kao što su hidrodeshulfurizacija (uklanjanje zaostalog sumpora iz fosilnih goriva), hidrokrekiranje (razbijanje dugih lanaca složenijih ugljikovodika u jednostavnije ugljikovodike povezane dvostrukom ili trostrukom vezom) i dobivanje amonijaka. U drugim granama industrije koristi se kao raketno gorivo, za punjenje zračnih balona, za zavarivanje metala i kao rashladno sredstvo u elektranama. [6]

3.2. Vodik u MSUI

Motorno cestovno vozilo s pogonom na vodik je ono vozilo koje pretvara kemijsku energiju vodika u mehaničku energiju izgaranjem tekućeg ili plinovitog vodika, ili reagiranjem vodika i kisika u gorivim ćelijama. Prvi način svojstven je motorima s unutarnjim izgaranjem, a drugi električnim automobilima. U daljnjem tekstu referirat ćemo se isključivo na vozila kojima je benzinski motor modificiran za korištenje vodikovog goriva.

3.2.1. Razlike vodikovog i benzinskog motora

Primarna razlika između ova dva motora je činjenica da izgaranjem vodika ne nastaju ugljikovodici, što nije slučaj kod benzina kao što je i prikazano jednadžbom (2.4). Teorijsko izgaranje vodika prikazano je jednadžbom (3.1), no kako u stvarnosti nije moguće izvesti da vodik reagira samo s kisikom iz zraka, a ne i s dušikom (posebno pri povišenim temperaturama), izgaranje izgleda kako je prikazano u slijedećoj jednadžbi:



Kao i izgaranjem benzina, izgaranjem vodika nastaju NO_x spojevi te se zbog toga vodik ne može smatrati u potpunosti čistim izvorom energije. [3]

Još jedna zanimljiva razlika je u tome što je omjer zraka i goriva za izgaranje vodika veći od onog za izgaranje benzina, te on iznosi 34,3:1, u odnosu na benzinovih 14,7:1. To znači da je za potpuno izgaranje 1 kg vodika potrebno 34,3 kg zraka. Zbog velikog omjera zraka i goriva manje goriva je potrebno za pokretanje vodikovog motora, te takav motor može raditi sa siromašnom smjesom što izravno utječe na nižu temperaturu izgaranja, čiji je rezultat manja emisija NO_x spojeva u ispuhu. No smjesa ne smije biti ni presiromašna kako se ne bi dogodilo da izlazna snaga ne bude dostatna. [3] i [4]

Vodik ima nisku energiju zapaljenja koja iznosi 0,02 mJ, što je 12 puta manje nego kod benzina. To je također jedan od razloga zašto tako prilagođeni motori mogu raditi sa siromašnom smjesom. S druge strane, negativna strana tog svojstva je utjecaj nenadane povišene temperature u cilindru na pojavu prijevremenog izgaranja ili detonacije. [3] i [4]

Iako mu je energija zapaljenja niska, temperatura samozapaljenja mu je visoka. Što je viša temperatura samozapaljenja, veću temperaturu moguće je postići kompresijom bez uranjenog zapaljenja, pa je s time i kompresija duža, to jest kompresijski je omjer veći. Opisanu konstataciju prikazuje jednačica (3.3):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad (3.3)$$

gdje je:

T_1 – temperatura na početku kompresije [K];

T_2 – temperatura na kraju kompresije [K];

V_1/V_2 – kompresijski omjer [-];

γ – omjer specifičnih toplina pri konstantnom tlaku i volumenu [-]. [3]

Zbog visoke temperature samozapaljenja, vodik postiže visoku vrijednost oktanskog broja (oko 130).

Ostala svojstva vodika koja daju pozitivne značajke u motorima s unutarnjim izgaranjem su velika difuznost i raspršivanje u zraku, što znači da je smjesa vodika i zraka homogenija, te da smo na strani sigurnosti ako dođe do curenja spremnika za gorivo (učinkovitim raspršivanjem u zraku smanjuje se rizik od eksplozije); te velika brzina širenja plamena koja omogućuje vodikovom motoru preciznije postizanje idealnog termodinamičkog procesa (u ovom slučaju Ottovog). No kako se u vodikovim motorima koristi uglavnom siromašna smjesa, u svrhu niže emisije NO_x spojeva, brzina širenja plamena opada, a tako i korisnost procesa. [3] i [4]

Od negativnih značajki primjene vodika u motoru izdvaja se mala udaljenost od stijenki cilindra na kojoj se plamen izgaranja gasi (0,6 mm u usporedbi s 2 mm kod benzina), što može za posljedicu imati povratni plamen, te loše ide uz svojstvo niske energije zapaljenja. Tu još treba napomenuti i malu vrijednost gustoće vodika, što automatski znači da će za istu masu vodika i benzina vodik imati veći volumen, to jest da će za njegovu pohranu trebati veći spremnik. [3] i [4]

3.2.2. Cestovna vozila s pogonom na vodik

Takva se vozila razvijaju zadnjih pedeset godina, a Sveučilište u Tokyju tu prednjači i može se pohvaliti s čak deset modela, dok se od komercijalnih proizvođača automobila izdvaja BMW.

BMW je 2007. izbacio automobil *BMW Hydrogen 7*, sestrinski model *serije 7*. Oba automobila koriste identičan motor, šestolitarski V12, no onaj u *Hydrogen 7* prepravljen je kako bi mogao podržavati izgaranje i vodika i benzina. Motori koji mogu raditi pogonjeni različitim vrstama goriva nazivaju se bivalentnim motorima. [9]

BMW je u to vrijeme tvrdio da je ovaj model prvi automobil s vodikovim motorom spreman za masovnu proizvodnju. Proizveli su 100 komada i poklonili ih različitim poznatim sportašima, političarima i medijskim ličnostima, kako bi na taj način promovirali pozitivan utjecaj ove tehnologije na okoliš. Unatoč dobroj ideji, automobil nije postigao komercijalni status u usporedbi sa *serijom 7*. Razlog tome bila je velika potrošnja goriva (50 L/100 km za vodik u usporedbi s 13,9 L/100 km za benzin), nepristupačnost punionica za vodik (svega pet mjesta kompatibilnih s njihovom tehnologijom u cijelom svijetu), te visoka cijena automobila (118 000\$, što je daleko više od automobila koji pripadaju *seriji 7*). [9]

S tehnološkog aspekta najviše problema zadavao je spremnik za gorivo. Osim što je trebao biti veći nego kod prosječnog vozila (170 L u odnosu na 88 L sestrinske *serije 7*), zahtijevao je izrazito dobru izolaciju kako bi vodik ostao u tekućem stanju (minimalna kriogena temperatura od -253 °C). Ako uzmemo još u obzir da bi nekorištenje motora u periodu od 17 sati uzrokovalo pad tlaka u spremniku za gorivo, a time i povećanje temperature i postepeno isparavanje goriva, razumljivo je zašto ovaj BMW-ov model nikada nije postao komercijalno uspješan. Povrh svega, brojne udruge za zaštitu okoliša tvrdile su da automobili na vodik nikako ne mogu biti ekološki prihvatljivi zbog velike količine utrošene energije za dobivanje vodika, što je u usporedbi s dobivenom snagom motora zaista nerazmjerno, te da je tvrdnja da takvi automobili ne ispuštaju ugljikovodike lažna, jer i dalje koriste ulje za podmazivanje fosilnog podrijetla koje se nenamjerno spaljuje i odlazi u ispuh. [8] i [9]

Automobil *BMW Hydrogen 7* prikazan je na slici 7., a njegova shema unutarnjih dijelova na slici 8.



Slika 7. *BMW Hydrogen 7* [8]



Slika 8. Shema unutarnjih dijelova *Hydrogen 7* automobila [9]

4. SIMULACIJSKI PRIKAZ BENZINSKOG MOTORA

Računalne simulacije doživjele su uzlet zadnjih desetaka godina pod pritiskom tržišta za pouzdanijim, bržim, preciznijim i ekonomičnijim proizvodima i proizvodnim procesima. Osim što eliminiraju skupa i dugotrajna modelska i prototipna mjerenja i ispitivanja, laboratorijski rad premještaju u virtualnu okolinu i nude različitim branšama inženjera i znanstvenika pristupačniji način dobivanja rezultata. Modelirati računalnu simulaciju znači definirati osnovne fizikalne zakone koji opisuju neki problem, prikazati ih na matematički način uz definiranje geometrije i početnih i rubnih uvjeta nalik stvarnim uvjetima, te kritički osvrt na dobivene rezultate. Komercijalno najzastupljeniji su alati za numeričko modeliranje problema čvrstoće, vibracija, izmjene topline, strujanja, te CAD/CAM sustava. [10]

AVL BOOST™ je softverski paket koji omogućava modeliranje radnog ciklusa motora s unutarnjim izgaranjem, obuhvaćajući simulaciju različitih načina opterećenja, dobivanja maksimalnih performansa, izgaranja, analize ispušnih plinova, te akustike. Razvila ga je austrijska tvrtka AVL i samo je jedan u nizu njihovih proizvoda koji nalazi primjenu u autoindustriji. [13]

4.1. Simulacija Ottovog motora

4.1.1. Mazda MX-5

Simulacijski model napravljen je po uzoru na motor automobila *Mazda MX-5*, prikazan na slici 9. *Mazda Miata*, kako se još naziva, najprodavaniji je sportski kabriolet s dva sjedala svih vremena, te je prodan u milijun primjeraka do 2016. godine. Proizvodio se u Japanu od 1989. do 2015., i to u četiri generacije. Uz ovaj kulturni model vežu se brojne zanimljivosti, kao primjerice krilatica koja mu opisuje dizajn – *Jinba ittai*, što na japanskom znači „jahač i konj u jednom tijelu“. To bi predstavljalo pet načela njegove konstrukcije: kompaktnost i mala težina; unutarnji prostor dovoljno velik za dvije odrasle osobe, ali bez neiskorištenog prostora; raspodjela težine 50:50 između prednje i stražnje osovine; pričvršćenost sva četiri kotača sustavom ovjesa s više karika kako bi se maksimalizirala dinamička stabilnost; i dobra povezanost diferencijala i motora. U okviru ovog završnog rada razmatrat će se *Mazda MX-5 (NB) 1.6* iz 2001. godine. U tablici 2. prikazane su neke specifikacije spomenutog automobila, a u tablici 3. specifikacije pripadajućeg motora. [12]



Slika 9. Mazda MX-5 [11]

Tablica 2. Specifikacije Mazde MX-5 [11]

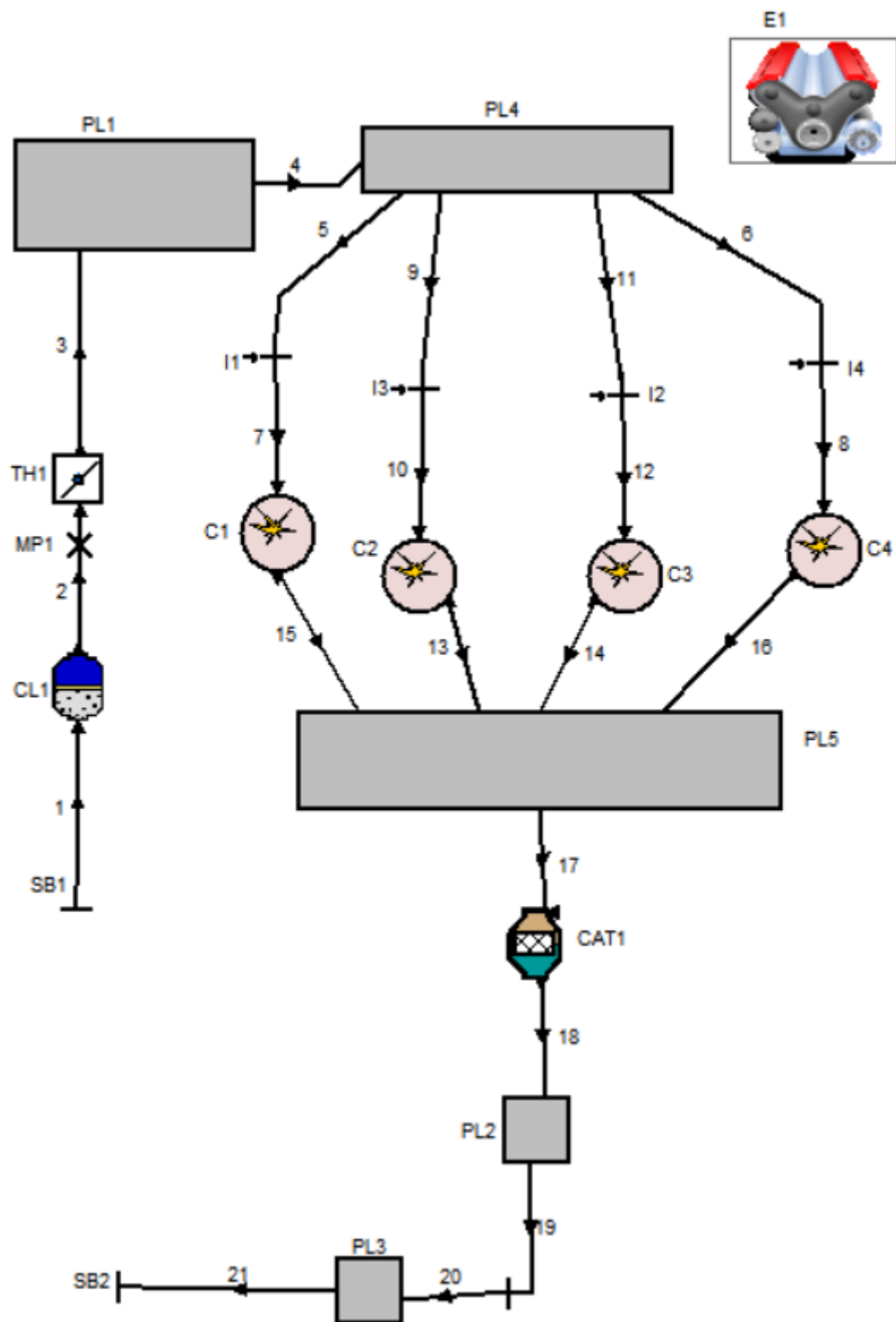
SPECIFIKACIJE VOZILA			
Broj vrata	2	Najveća brzina	191 km/h
Pogon	Stražnji kotači	Težina	1035 kg
Mjenjač	Ručni	Najveće opterećenje	220 kg
Broj brzina	5	Položaj motora	Na prednjoj osovini
Volumen spremnika goriva	50 L	Položaj cilindara	Redni
Potrošnja goriva	8,1 L/100 km	Način ubrizgavanja goriva	U više točaka
Akceleracija do 100 km/h	9,7 s	Razvodni mehanizam	DOHC

Tablica 3. Specifikacije motora *Mazde MX-5* [11]

VELIČINA	OZNAKA	VRIJEDNOST	MJERNA JEDINICA
Maksimalna efektivna snaga	P_e	81	kW
Maksimalni efektivni moment	M_e	134	Nm
Volumen cilindra	V_H	1598	cm ³
Broj cilindara	z	4	-
Promjer klipa	D	78	mm
Hod klipa	H	83,6	mm
Duljina klipnjače	l	133	mm
Kompresijski omjer	ε	9,4	-
Broj ventila po cilindru	n_v	4	-
Promjer usisnog ventila	$d_{v,u}$	33,1	mm
Promjer ispušnog ventila	$d_{v,i}$	28,2	mm

4.1.2. Simulacijski prikaz motora *Mazde MX-5*

Simulacijski model prikazan je na slici 10. i sastoji se od motora (E1), četiri cilindra (C1-4), četiri sapnice goriva (brizgaljke) (I1-4), filtera zraka (CL1), zaklopke za snagu (TH1), katalizatora (CAT1), pet spremnika (PL1-5), dvadeset i jedne cijevi (1-21), jedne mjerne točke (MP1) i dva rubna uvjeta (SB1-2).



Slika 10. Simulacijski model motora Mazde MX-5

Kod simuliranja rada motora posebnu je pozornost trebalo obratiti na modeliranje toplinskih procesa u cilindru, s obzirom da u njemu dolazi do pretvorbi energije, kemijske u mehaničku, što je i primarna svrha motora s unutarnjim izgaranjem. Za model izgaranja u cilindru odabran je dvozonski Vibeov model, koji se temelji na pretpostavci da je tijekom izgaranja radna tvar u cilindru podijeljena na izgorjelu i neizgorjelu zonu između koje je tanka fronta plamena. Za svaku zonu radne tvari postavljaju se relacije prvog glavnog stavka termodinamike, jednadžbe stanja idealnog plina i zakona očuvanja energije u svrhu računanja oslobođene topline i povećanja tlaka i temperature tijekom izgaranja. Ovaj zakon izgaranja opisuju četiri proračunska parametra; početak izgaranja $\alpha_{početak}$, trajanje izgaranja $\alpha_{trajanje}$, Vibeova značajka izgaranja m i parametar potpunosti izgaranja a . Ove vrijednosti mogu biti konstantne veličine ili se mijenjati s obzirom na vrijednost brzine vrtnje motora i/ili srednjeg efektivnog tlaka, o čemu je i riječ u ovom slučaju. U tablici 4. nalaze se uzete vrijednosti navedenih veličina. [13]

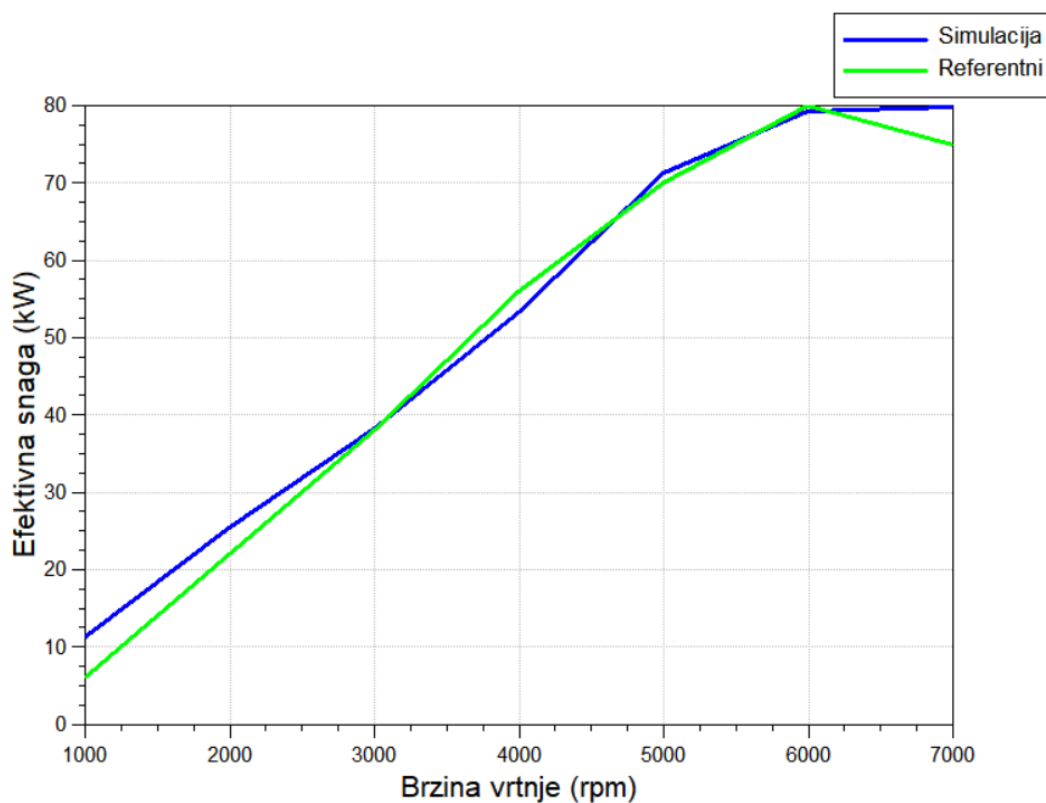
Tablica 4. Vibeov dvozonski model izgaranja

VELIČINA	OZNAKA	BRZINA VRTNJE MOTORA	
		1000	7000
Početak izgaranja	$\alpha_{početak}$	-10 °KV	-35 °KV
Trajanje izgaranja	$\alpha_{trajanje}$	50 °KV	55 °KV
Vibeova značajka izgaranja	m	2,5	2,1
Parametar potpunosti izgaranja	a	6,9	6,9

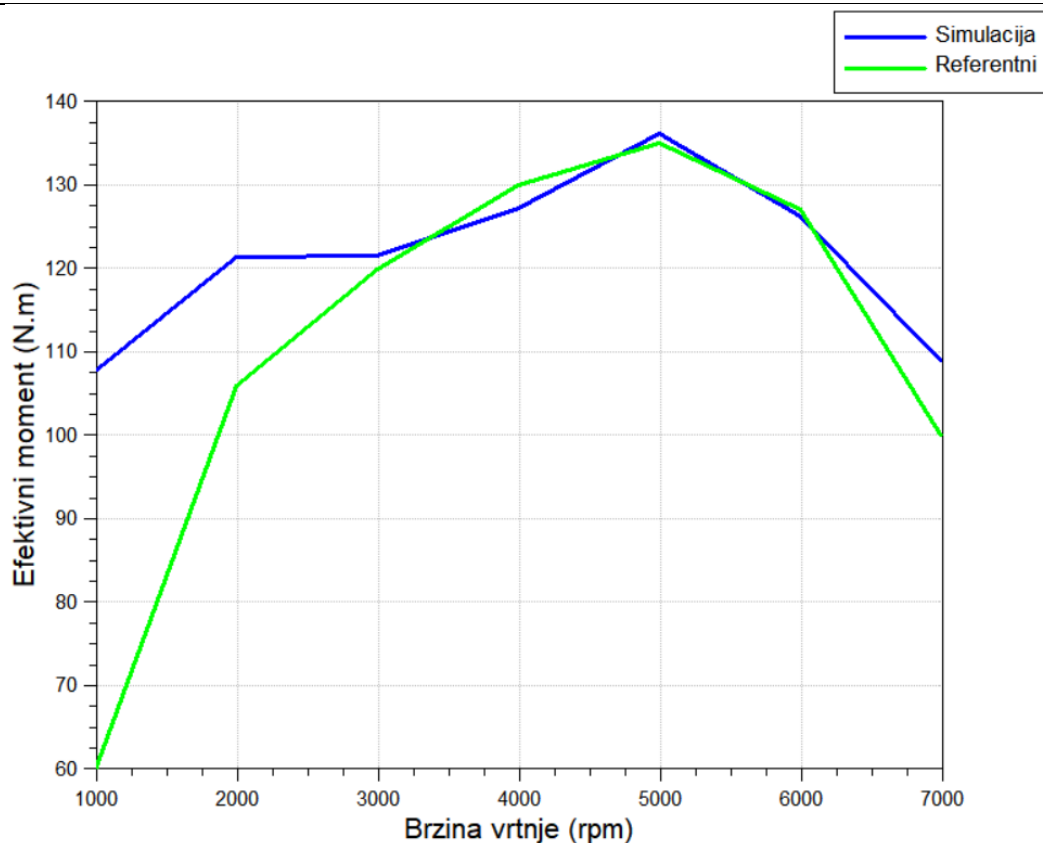
Osim toga bilo je još potrebno definirati način rada brizgaljki, s obzirom da se radi o motoru s ubrizgavanjem goriva u usisnoj cijevi. Uzet je model kontinuiranog ubrizgavanja što znači da je gorivo ubrizgavano tijekom cijelog ciklusa. Omjer zraka i goriva je podešen s obzirom na opterećenje, a pri toplinskom proračunu uzima se u obzir i specifična toplota isparavanja benzina, koja iznosi 420 kJ/kg. Takav način postavljanja utjecat će na to da na mjestu gdje se ubrizgava benzin temperatura benzina pada, a stupanj punjenja raste, što će imati za utjecaj veći efektivni moment i snagu procesa. [13]

4.1.3. Rezultati simulacijskog prikaza motora Mazde MX-5

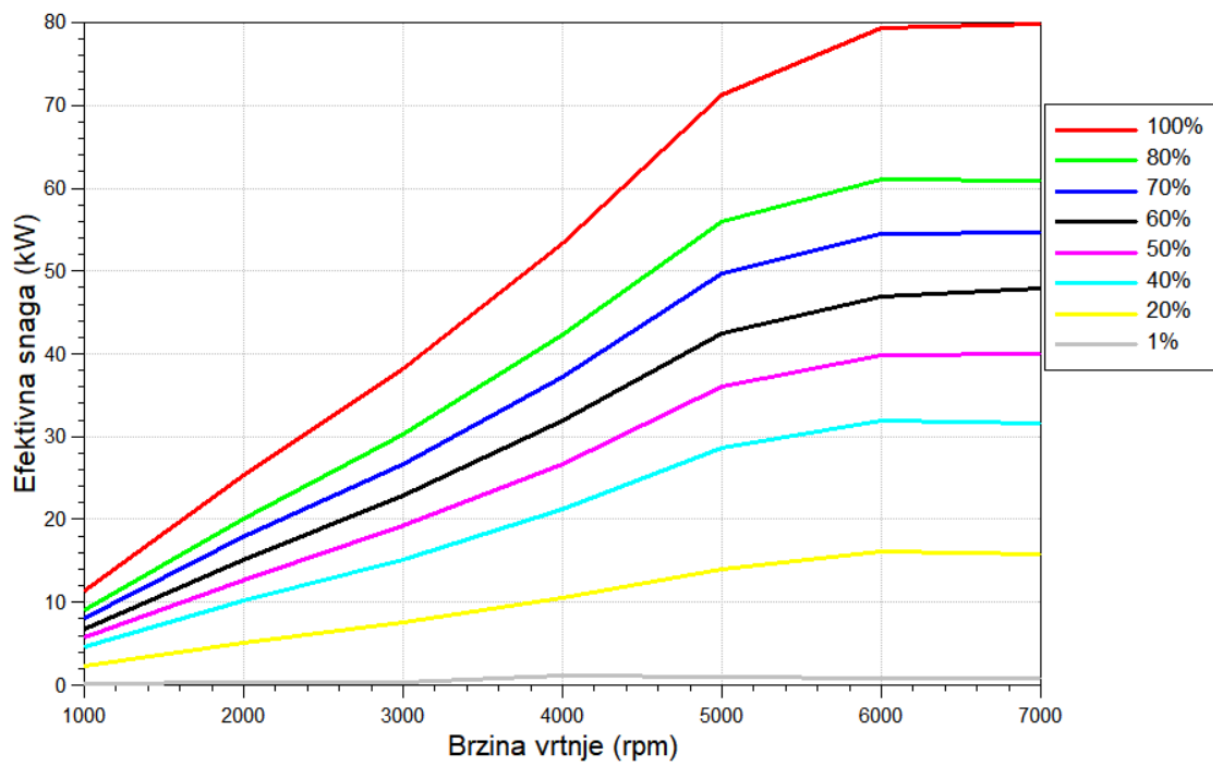
Rezultati simulacijskog prikaza motora obuhvaćaju prikaz kalibriranih vrijednosti efektivne snage i momenta u usporedbi s tvorničkim vrijednostima za spomenuti motor (slika 11. i 12.), te prikaz djelomičnih opterećenja kalibriranog modela (slika 13. i 14.). Podaci su iterirani u 100 ciklusa.



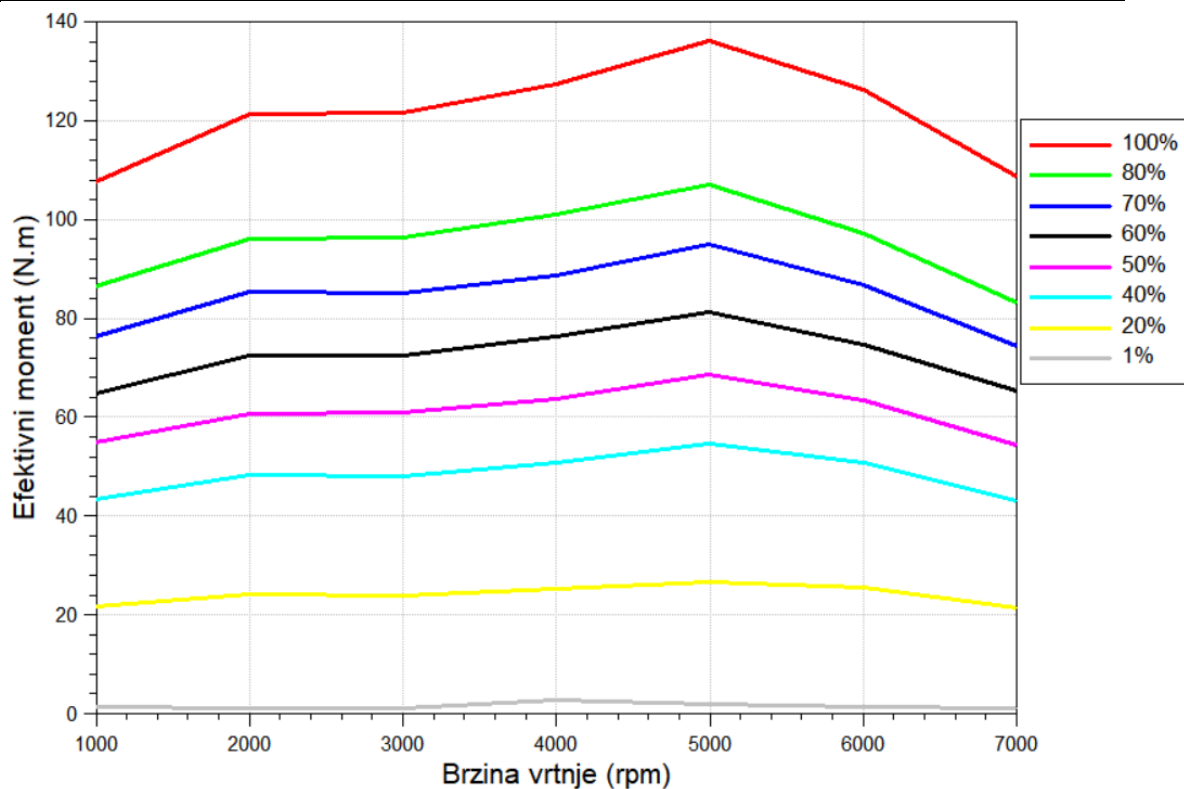
Slika 11. Dijagram efektivne snage



Slika 12. Dijagram efektivnog momenta



Slika 13. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja benzinovog motora



Slika 14. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja benzinovog motora

Iz slika 11. i 12. vidimo da kalibrirani rezultati ne odgovaraju u potpunosti referentnim vrijednostima - pri nižim brzinama vrtnje rezultati dobiveni simulacijom ispadaju za do 80% veći nego što bi trebali biti. Razlog tome je činjenica da ne možemo uzeti pri simuliranju sve tvorničke parametre koji utječu na izgled vanjskih karakteristika, te se onda koncentriramo na podudaranje maksimalnih efektivnih vrijednosti, s obzirom da su one referentna mjera u uspoređivanju različitih motora.

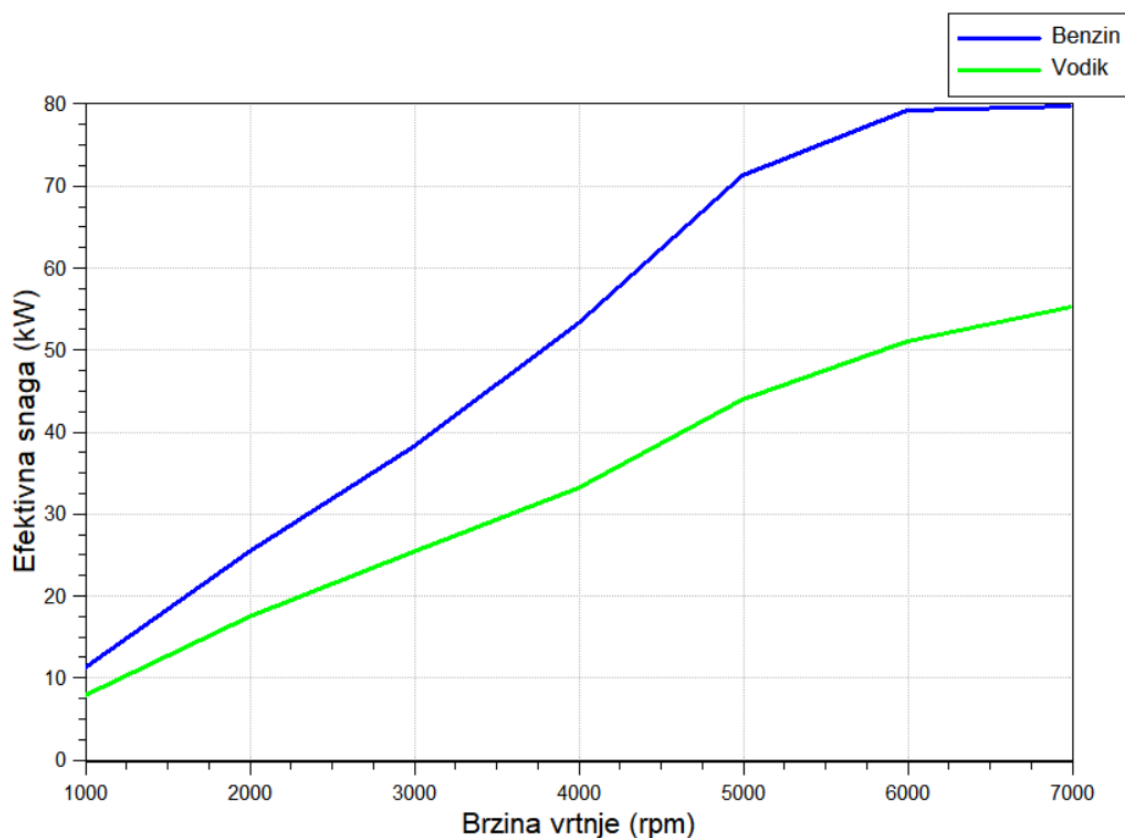
Iteracija efektivne snage i momenta za slučaj djelomičnih opterećenja dobiva se pomoću opcije *Engine - BMEP Control* gdje se parametrizira srednji efektivni tlak za pojedino opterećenje i brzinu vrtnje motora, te se uz pretpostavljeni kut zaklopke i vrijednost integracijske konstante dobivaju tražene vrijednosti, s napomenom da je potrebno još karakteristične vrijednosti u brizgaljkama za bogatu smjesu zamijeniti onima za stehiometrijsku. Dobiveni rezultati djelomičnih opterećenja kalibriranih rezultata izgledaju zadovoljavajuće. [13]

5. SIMULACIJSKI PRIKAZ VODIKOVOG MOTORA

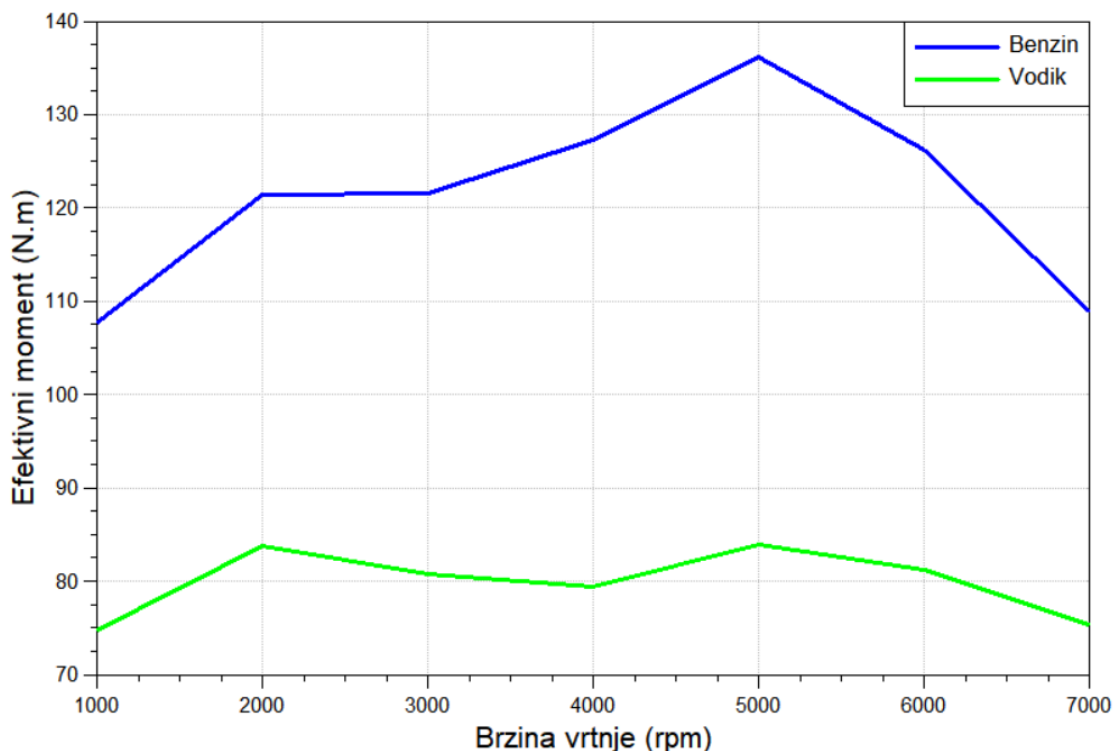
U sklopu analize rada Ottovog motora pogonjenog vodikom analizirat će se dva načina rada; simulacija Ottovog motora kod kojeg je samo zamijenjeno gorivo i njegove dobivene performanse, te simulacija Ottovog motora kod kojeg je zamijenjeno gorivo, ali s takvom geometrijskom izvedbom koja daje maksimalne efektivne značajke.

5.1. Simulacijski prikaz pogona na vodik bez promjene geometrijskih parametara

Simulacijski prikaz vodikovog motora shemom je jednak onom benzinskog motora (slika 10.), tako da su se jedino promijenili pojedini parametri. Kako je bilo i za očekivati, prvo je bilo potrebno promijeniti vrstu goriva u *Simulation Control/Classic Species Setup*, što je automatski predložilo vrijednosti donje ogrjevne vrijednosti i omjer zraka i goriva kod vodika. Nakon toga trebalo je promijeniti vrijednosti omjera zraka i goriva u sapnicama za ubrizgavanje goriva, te pritom paziti da je uzeta razlika između bogate i siromašne smjese s obzirom na opterećenje. Isto vrijedi i za druge elemente modela koji slijede nakon cilindra. Kalibrirani rezultati simulacije s vodikom, uz isključivo zamjenu goriva, u usporedbi s rezultatima simulacije dobivenima u 4. poglavlju prikazani su na slikama 15. i 16.



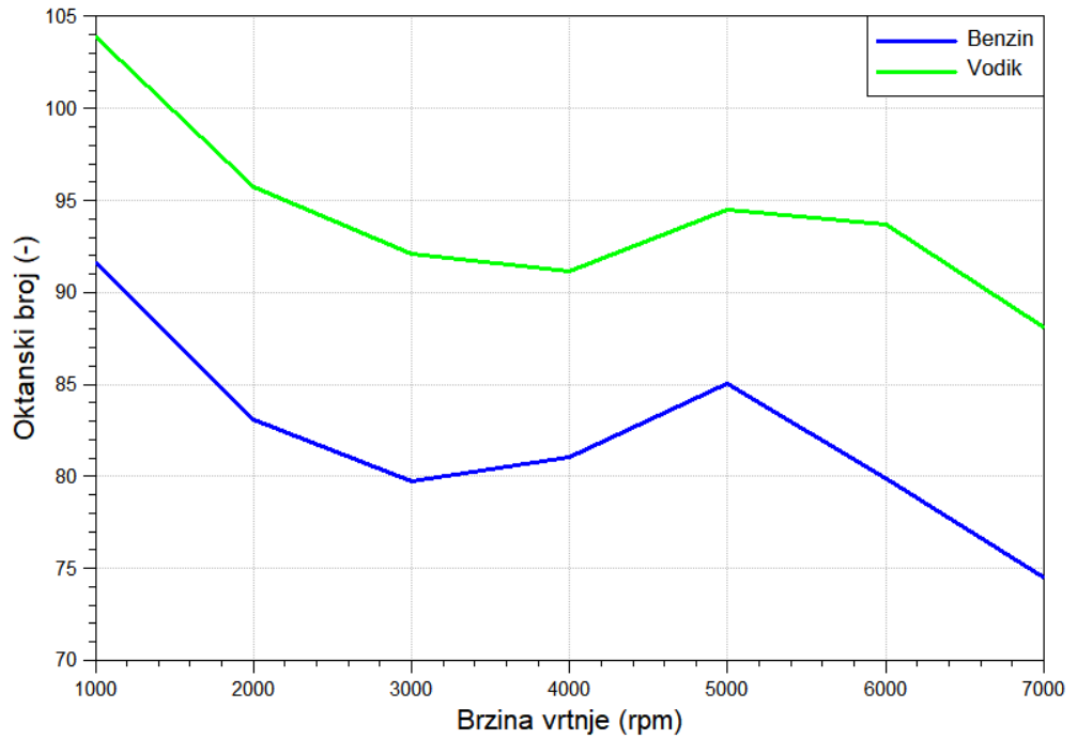
Slika 15. Dijagram usporedbe efektivne snage benzina i vodika kod maksimalnog opterećenja



Slika 16. Dijagram usporedbe efektivnog momenta benzina i vodika kod maksimalnog opterećenja

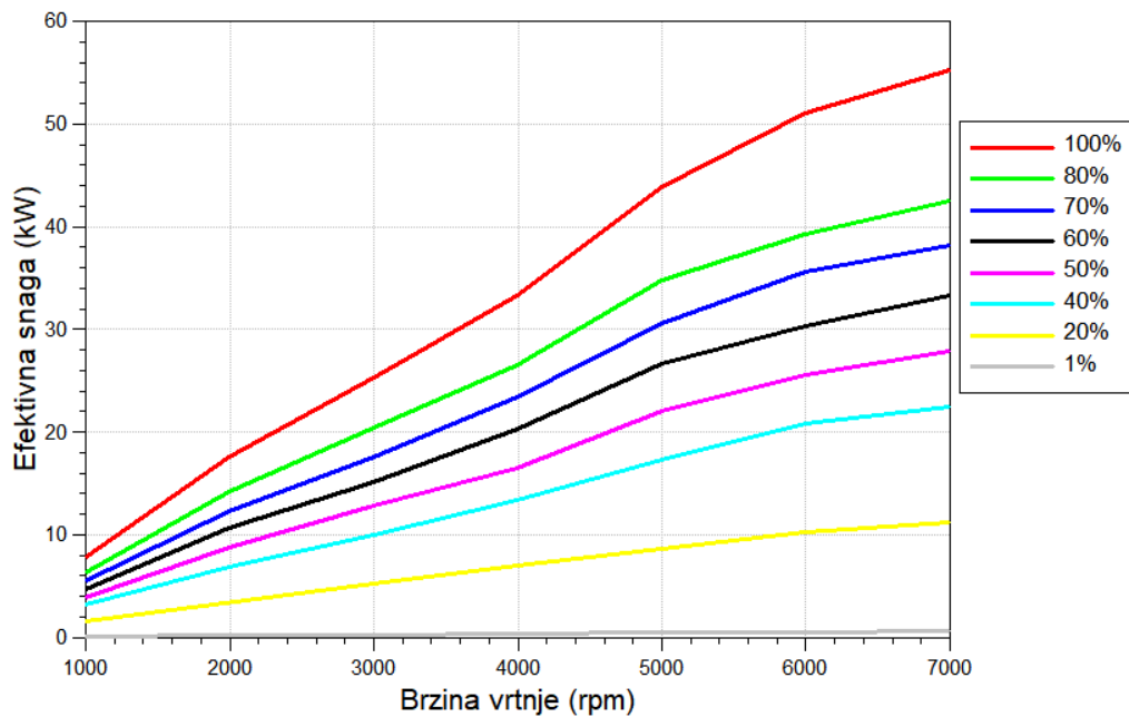
Kako je bilo za predvidjeti, s obzirom na analizu ponašanja vodika u motoru opisanog u poglavlju 3.2.1., zamjenom goriva, snaga i moment poprimili su uvelike manje vrijednosti. Kada bi zanemarili niže brzine vrtnje pri kojima nismo uspjeli iterirati precizne podatke, i promatrali samo brzine vrtnje pri kojima se primjenom benzina postižu maksimalne vrijednosti efektivne snage ($n = 6000$ rpm) i momenta ($n = 5000$ rpm), zaključili bi da su spomenute vrijednosti niže za 37%.

Slika 17. pak pokazuje da se najveća vrijednost oktanskog broja zamjenom goriva povisila za 12%, što znači da je radnu smjesu s vodikom moguće duže komprimirati do pojave detonacije, kao što je bilo ranije pretpostavljeno.

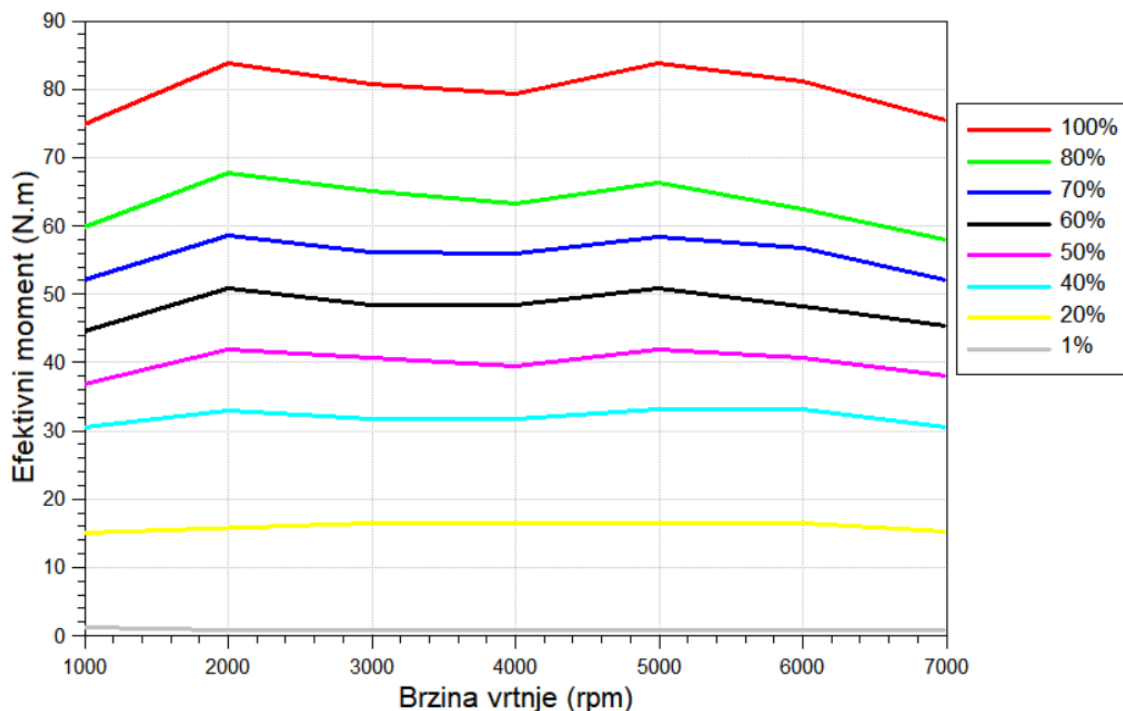


Slika 17. Oktanski broj kod najvećeg opterećenja benzina i vodika

Na slikama 18. i 19. prikazani su još dijagrami efektivne snage i momenta za djelomična opterećenja motora pogonjenog vodikom.



Slika 18. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja vodikovog motora



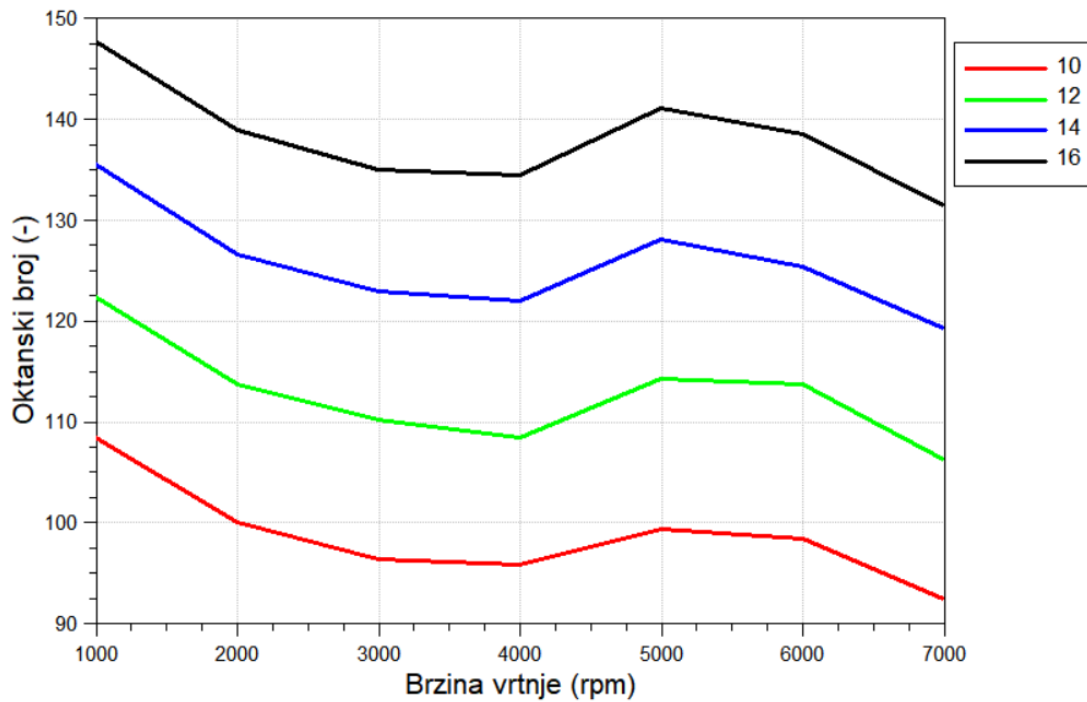
Slika 19. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja vodikovog motora

5.2. Simulacijski prikaz pogona na vodik sa promjenom geometrijskih parametara

S obzirom na poznatu činjenicu da vodik ima nešto višu temperaturu samozapaljenja, za svrhu dobivanja maksimalnih vanjskih karakteristika motora povećat ćemo kompresijski omjer. Sa spoznajom da je pojava detonacije ograničena povećanjem kompresijskog omjera, dijagram oktanskog broja biti će referentan u određivanju one vrijednosti kompresijskog omjera koja će predstavljati granicu pojave detonacije. Za gornju vrijednost oktanskog broja kod vodika uzet ćemo vrijednost 130.

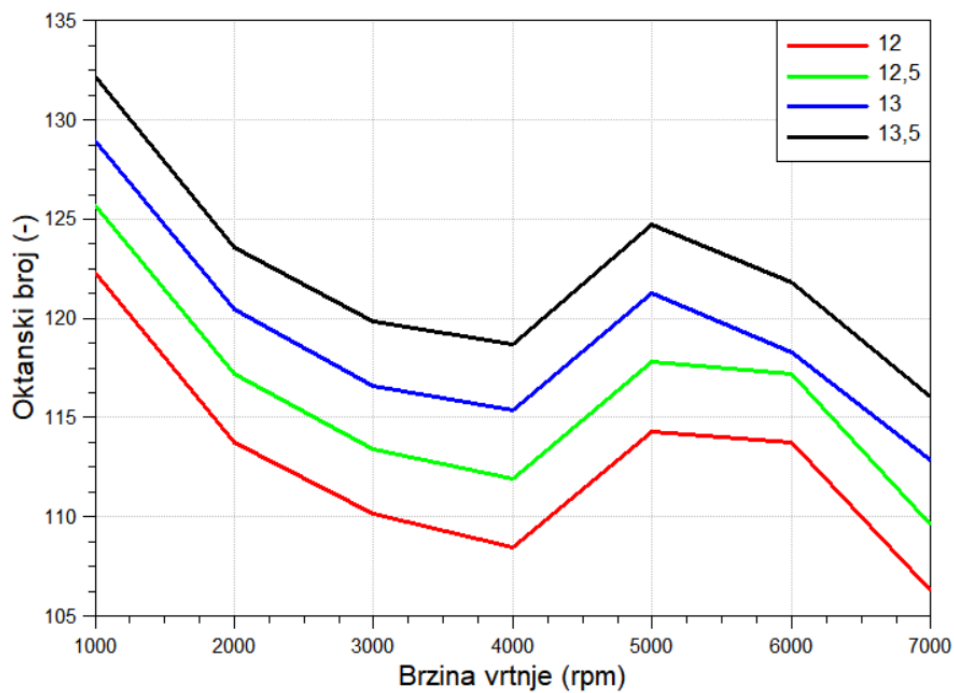
Osim toga uzet je vremenski pomak podizanja ventila tako da se usisni ventili u ovom slučaju otvaraju i zatvaraju 30 °KV kasnije. To će doprinijeti nižem oktanskom broju pri nekom kompresijskom omjeru, te omogućiti veći broj iteracija s rastućom vrijednosti kompresijskog omjera, i u konačnici odabir većeg kompresijskog omjera.

Provest ćemo iteraciju za četiri različite vrijednosti kompresijskog omjera ($\epsilon = 10, 12, 14, 16$) i vidjeti kako će se mijenjanje tih vrijednosti odraziti na oktanski broj. Rezultati navedenog prikazani su na slici 20.



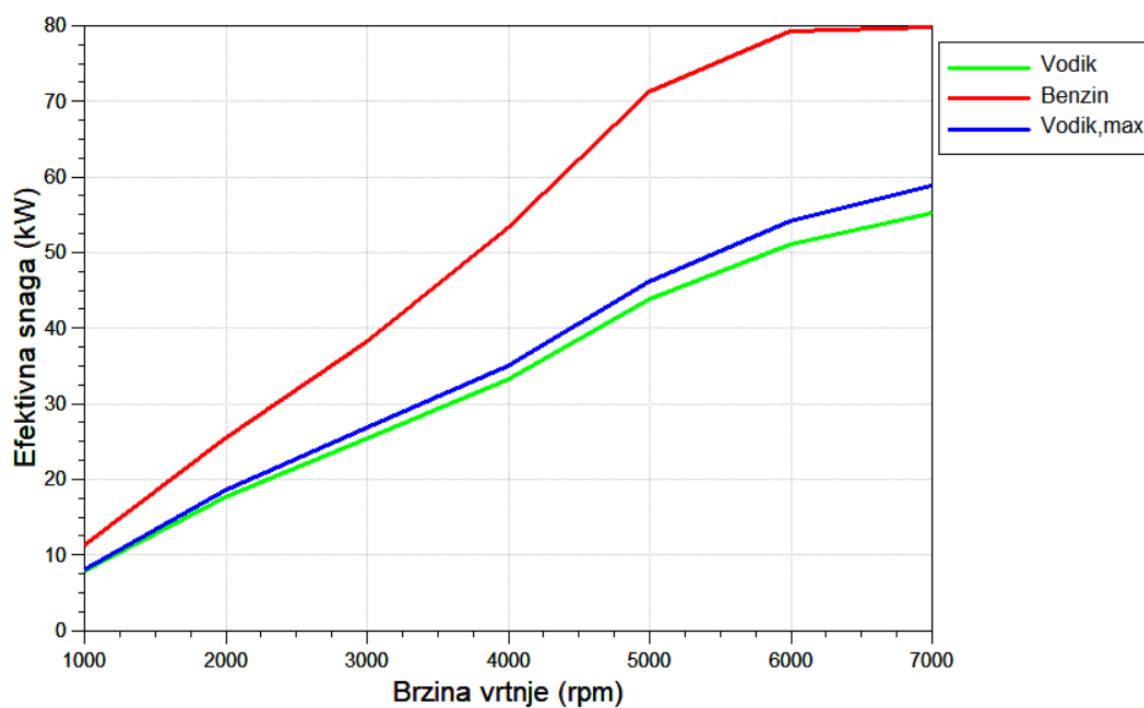
Slika 20. Iteracija kompresijskog omjera u svrhu definiranja gornje granice detonacije kod vodikovog motora

Iz priloženog je vidljivo da traženi kompresijski omjer mora biti na skali između 12 i 14. Rezultati još jednom provedene simulacije u tom rasponu prikazani su na slici 21.

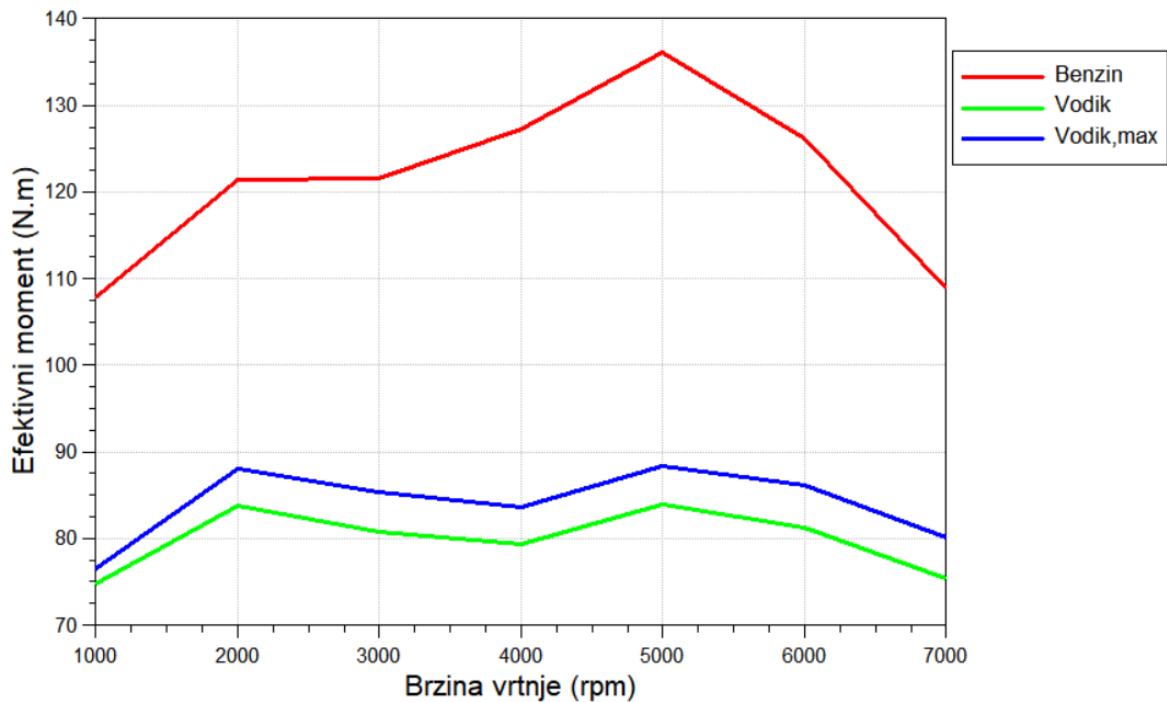


Slika 21. Ponovna iteracija kompresijskog omjera u svrhu definiranja gornje granice detonacije kod vodikovog motora

Iz ponovljene iteracije dobiveno je da bi kompresijski omjer za postizanje maksimalne efektivne snage i momenta za motor *Mazde MX-5* pogonjen vodikom trebao iznositi $\varepsilon = 13$, uz vremensku promjenu podizanja ventila od 30° KV. Dijagrami efektivne snage i momenta dotične konfiguracije u usporedbi sa benzinom i vodikom bez mijenjanja geometrije prikazani su na slikama 22. i 23.

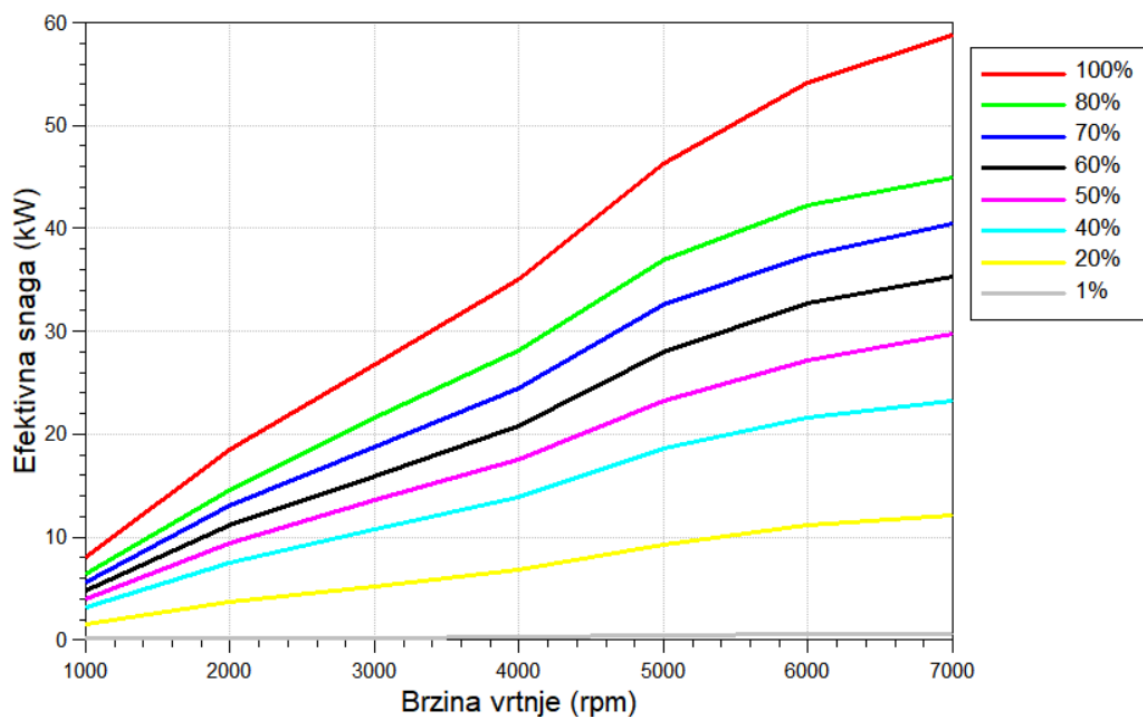


Slika 22. Dijagram efektivne snage – usporedba svih provedenih konfiguracija

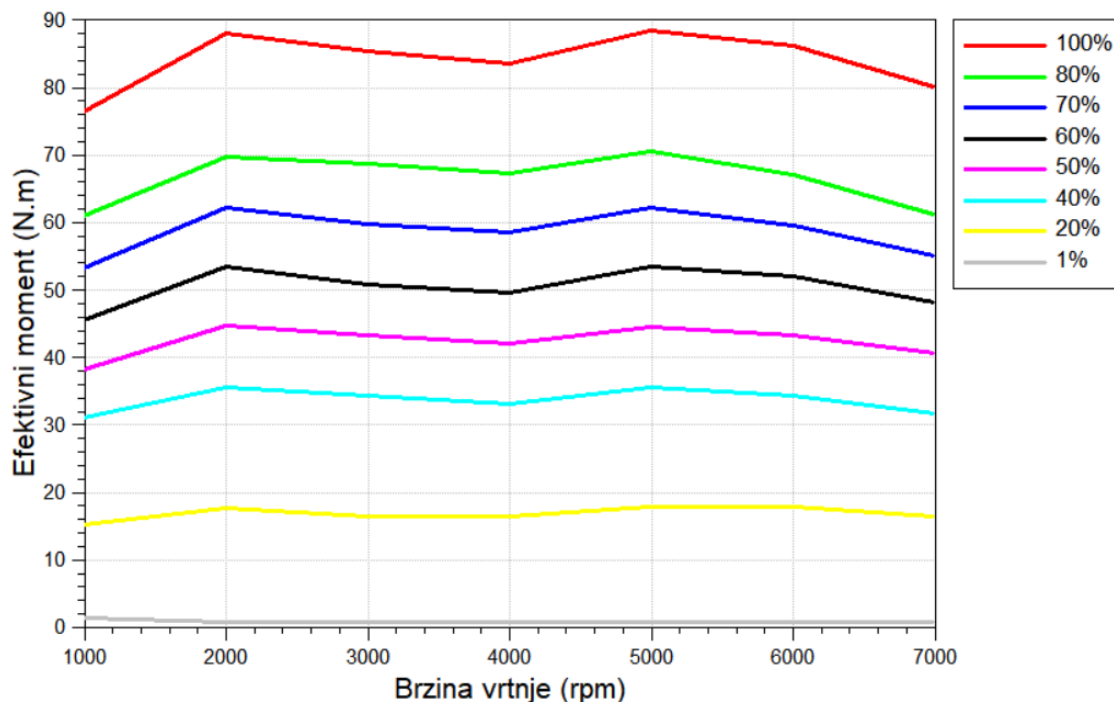


Slika 23. Dijagram efektivnog momenta – usporedba svih provedenih konfiguracija

Dijagrami djelomičnih opterećenja za vodikov motor s postignutim maksimalnim vanjskim karakteristikama prikazani su na slikama 24. i 25.



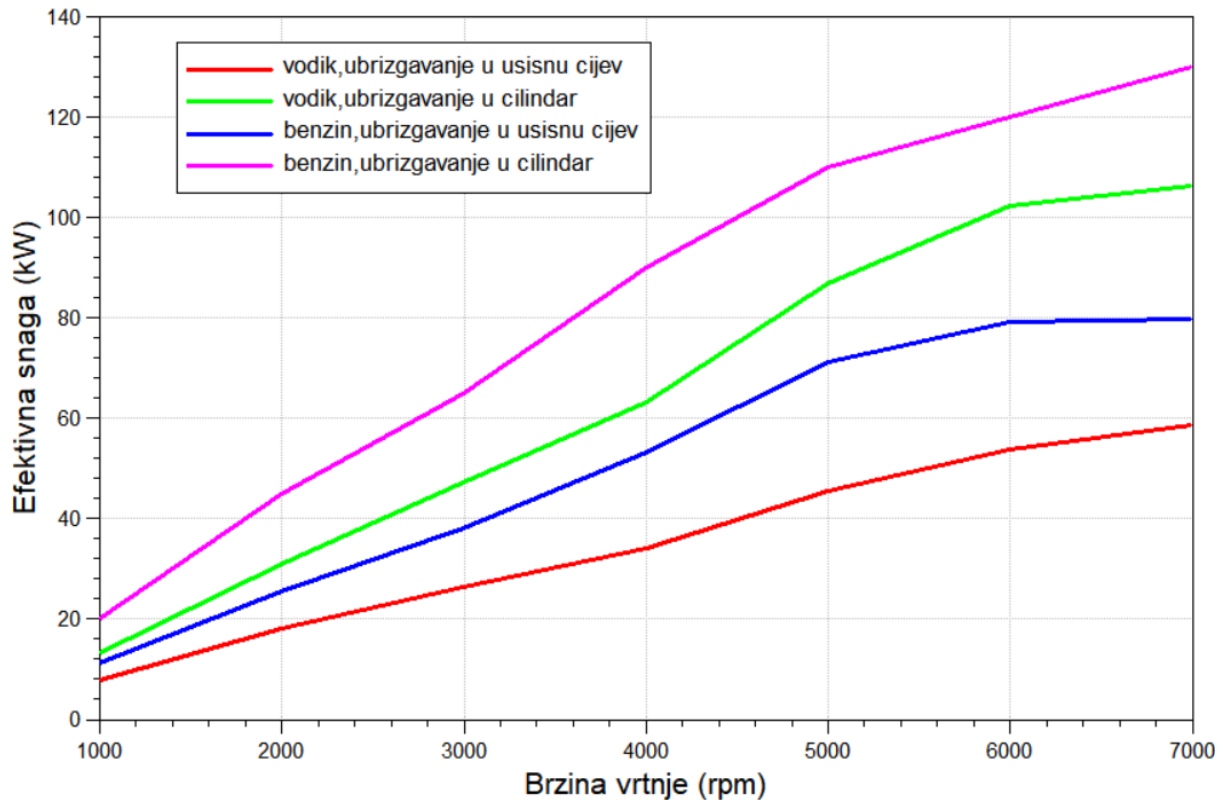
Slika 24. Dijagram efektivne snage za djelomična opterećenja vodikovog motora s promjenom kompresijskog omjera



Slika 25. Dijagram efektivnog momenta za djelomična opterećenja vodikovog motora s promjenom kompresijskog omjera

5.3. Dovođenje maksimalne efektivne snage vodikovog motora na maksimalnu efektivnu snagu vodika

Vidljivo je iz priloženog da vodikov motor ne može konkurirati benzinovom po maksimalnoj izlaznoj snazi. No vanjske značajke bi se u tom slučaju mogle poboljšati ukoliko bi sustav za ubrizgavanje bio izveden na drugačiji način – direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindar. U simulaciji to se jednostavno izvede na način da se uklone brizgaljke spojene na usisnim cijevima, u *Cylinder* se podesi da je riječ o unutarnjoj pripremi smjese, te se definira ovisnost stupnja punjenja o omjeru zraka i goriva. Na slici 26. prikazana je usporedba maksimalne postignute snage benzinovog i vodikovog motora izvedenih s dva različita sustava za ubrizgavanje.



Slika 26. Usporedba maksimalne snage benzinovog i vodikovog motora izvedenih s različitim sustavima za ubrizgavanje

Dobiveni rezultati izgledaju zadovoljavajuće te je potvrđena pretpostavka da su maksimalne performanse veće kada se gorivo ubrizgava izravno u cilindar. Takva izvedba ostaje kao opcija ako se u nekom načinu rada svakako želi približiti vanjskim karakteristikama benzinovog motora, a želi se zadržati vodik kao gorivo.

6. ANALIZA REZULTATA

Analizu rezultata rad provest ćemo za rad motora pri punom opterećenju za oba goriva, a referentne veličine koje ćemo uspoređivati pomoću topografskih dijagrama su maksimalna temperatura i tlak u cilindru, efektivni stupanj djelovanja i emisija NO_x, CO i HC spojeva. Kako bi topografski dijagrami bili što točniji i precizniji bilo je potrebno radno područje motora opisati sa što više točaka. Kako je svaka točka opisana vektorom:

$$A = [n \ M_e \ X] \quad (6.1)$$

gdje je:

n – brzina vrtnje motora [min^{-1}];

M_e – efektivni moment motora [Nm];

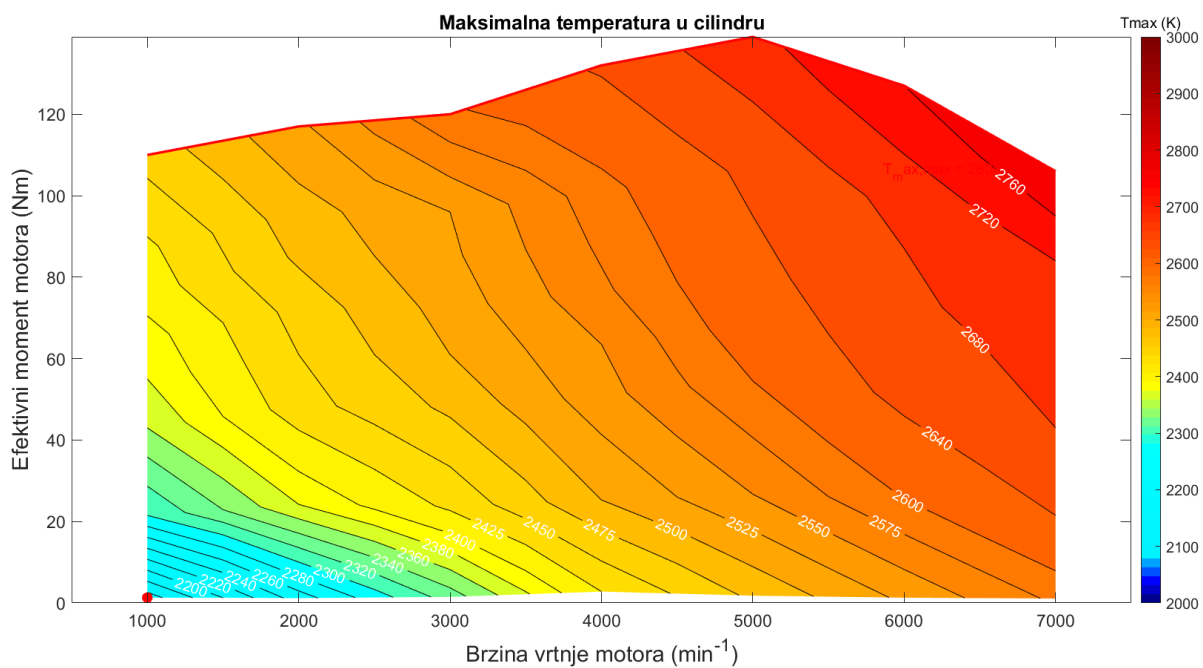
X – veličina koju želimo prikazati;

za precizniju izradu dijagrama trebalo je provesti što veći broj simulacija s djelomičnim opterećenjem. Za svrhu ovog rada definirano je 8 različitih djelomičnih opterećenja (1%, 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 100%), a tražene veličine su se očitavale za raspon brzine vrtnje [1000, 7000] s korakom od 500, što čini 104 radne točke, i zadovoljavajuću preciznost rješenja.

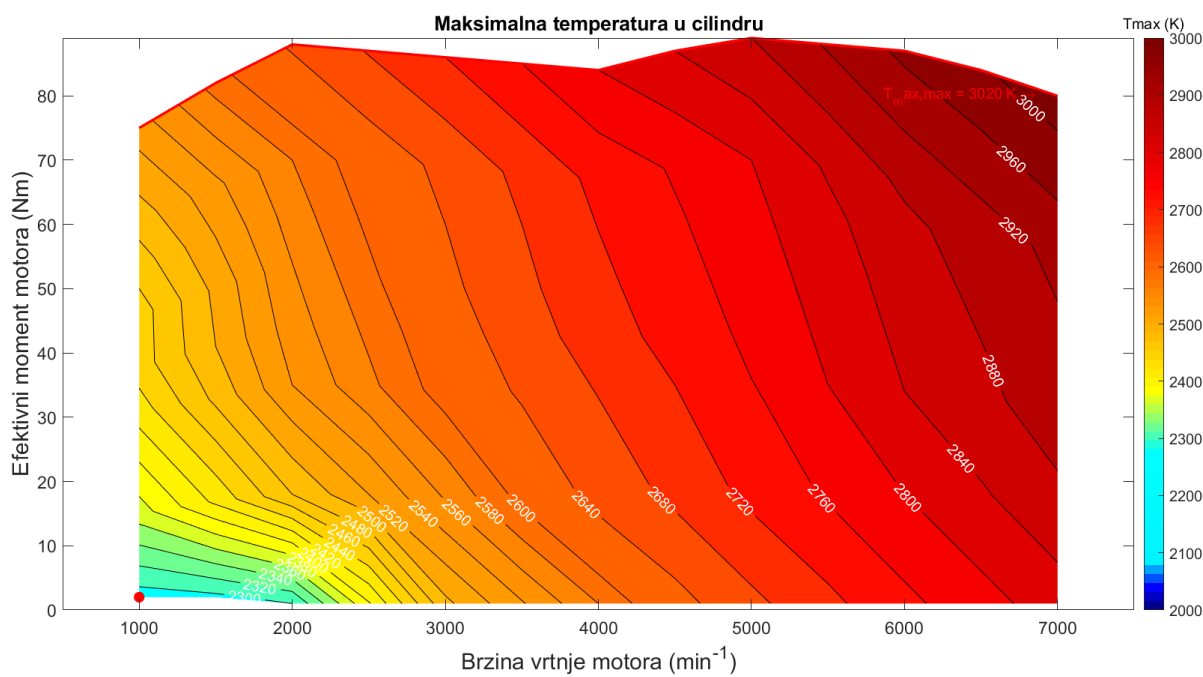
Treba napomenuti da su podaci za vodik uzeti za konfiguraciju s povećanjem kompresijskog omjera, jer će se u tom slučaju javiti veća mehanička i toplinska opterećenja, a tako i efektivni stupanj djelovanja i emisija štetnih tvari.

6.1. Maksimalna temperatura i tlak u cilindru

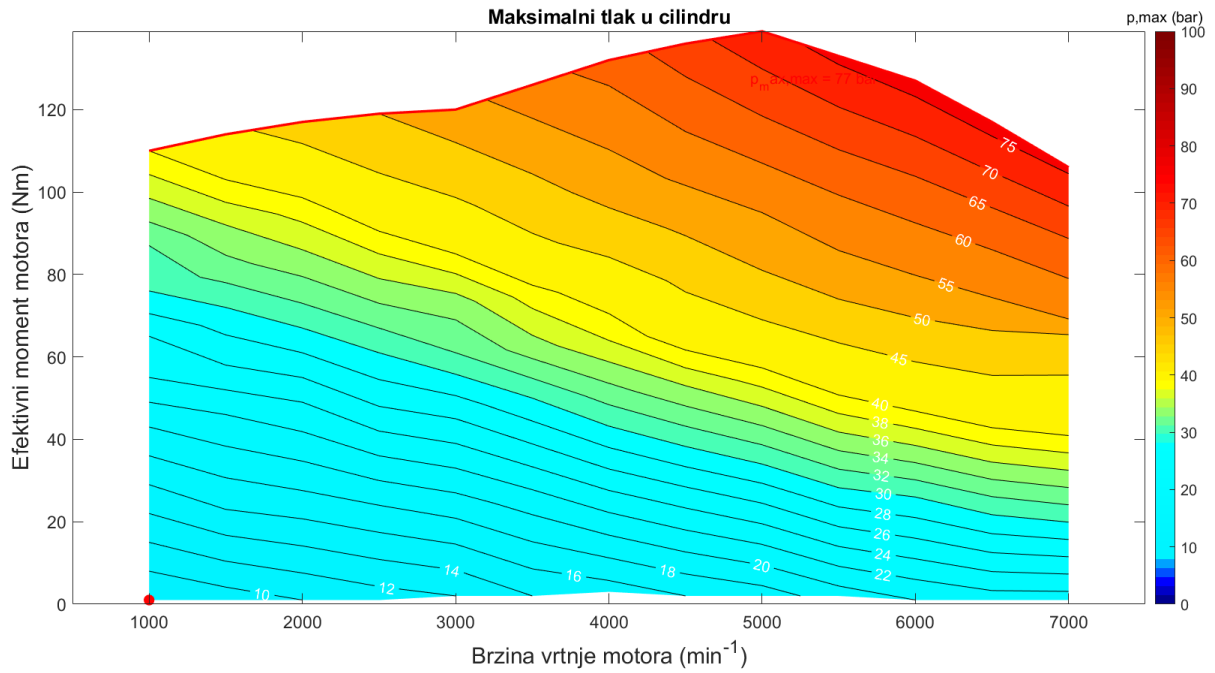
Iznosi maksimalne temperature i tlaka u cilindru predstavljaju iznose maksimalnih toplinskih i mehaničkih opterećenja cilindra, te su prikazani na slikama 27., 28., 29. i 30.



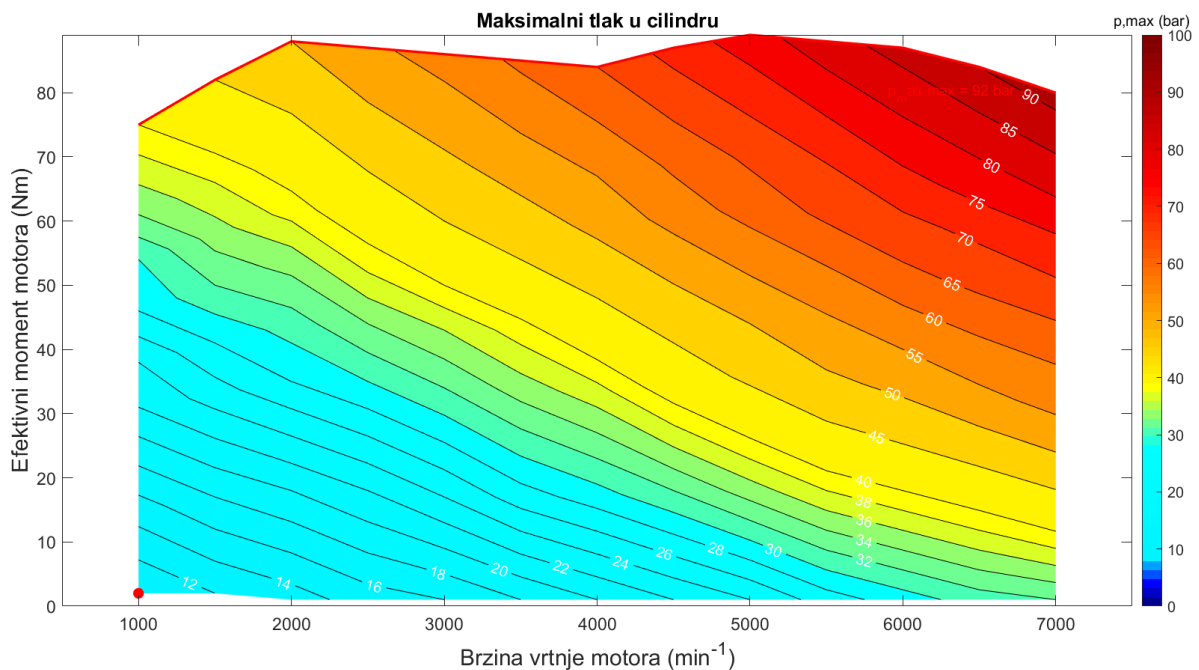
Slika 27. Topografski dijagram najveće temperature u cilindru za benzin



Slika 28. Topografski dijagram najveće temperature u cilindru za vodik



Slika 29. Topografski dijagram najvećeg tlaka u cilindru za benzin

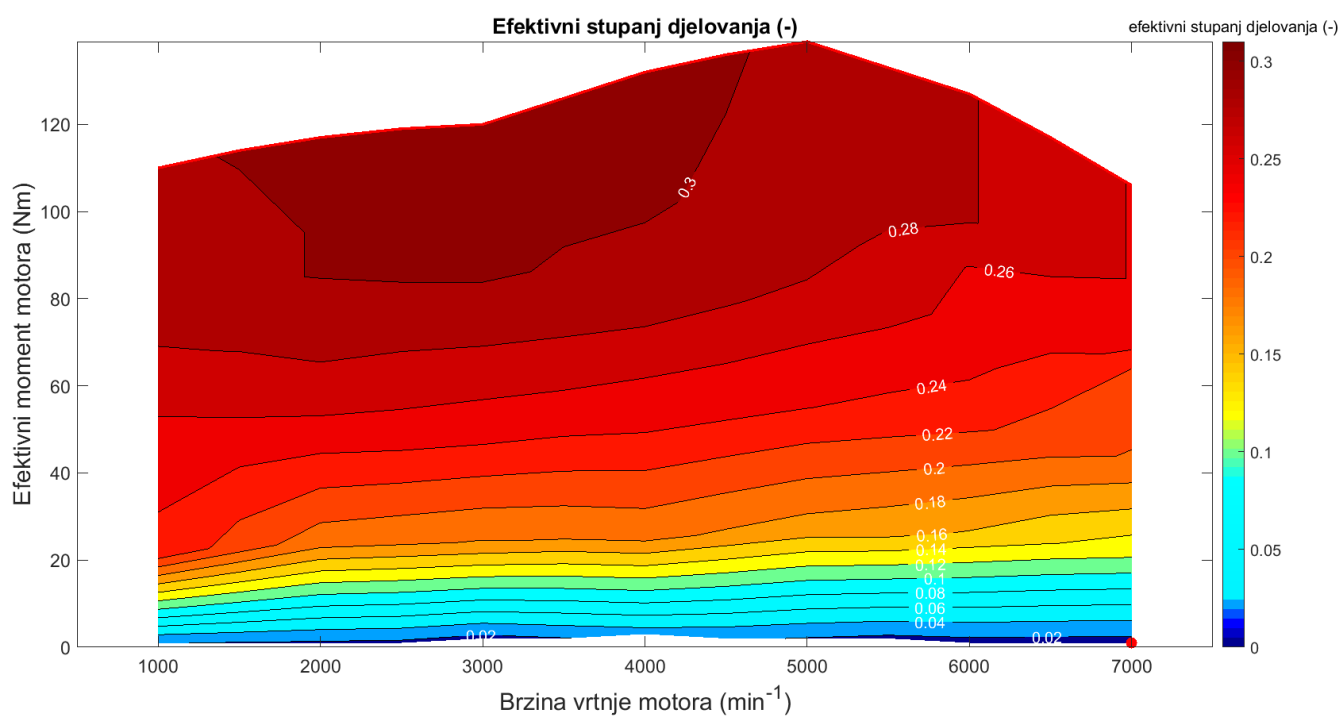


Slika 30. Topografski dijagram najvećeg tlaka u cilindru za vodik

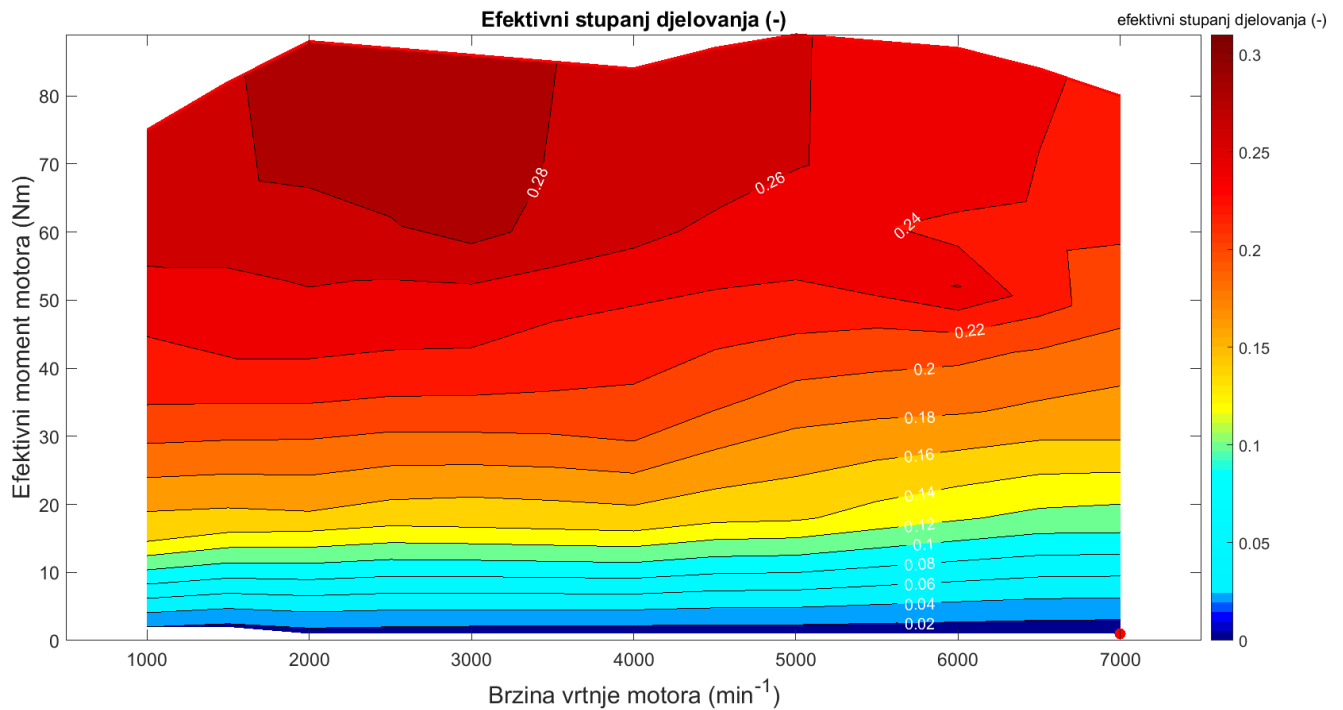
Iz rezultata je vidljivo da će veću temperaturu i tlak u cilindru imati vodikov motor, što je bilo i za pretpostaviti zbog svih svojstava opisanih u 3. poglavlju. U ovom slučaju bilo bi još potrebno konstrukcijski i proizvodno prilagoditi unutarnje dijelove motora kako bi bili otporniji uslijed povećanih toplinskih i mehaničkih opterećenja (poboljšani ventili i sjedišta ventila, kaljene klipnjače, ulje otpornije na visoke temperature i tlakove itd.).

6.2. Efektivni stupanj djelovanja

Efektivni stupanj djelovanja opisuje djelotvornost pretvorbe energije u nekom procesu, te je obrnuto proporcionalan specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva i donjoj ogrjevnoj vrijednosti. Specifična potrošnja goriva je omjer masene potrošnje goriva i efektivne snage motora. Donja ogrjevna vrijednost je toplina oslobođena tijekom izgaranja goriva, s time da ne uključuje toplinu kondenzacije vodene pare. Za donju ogrjevnju vrijednost benzina uzeto je $H_{d,b} = 43,2$ MJ/kg, a vodika $H_{d,v} = 120$ MJ/kg. Topografski dijagrami efektivnog stupnja djelovanja za benzin i vodik prikazani su na slikama 31. i 32.



Slika 30. Topografski dijagram efektivnog stupnja djelovanja za benzin

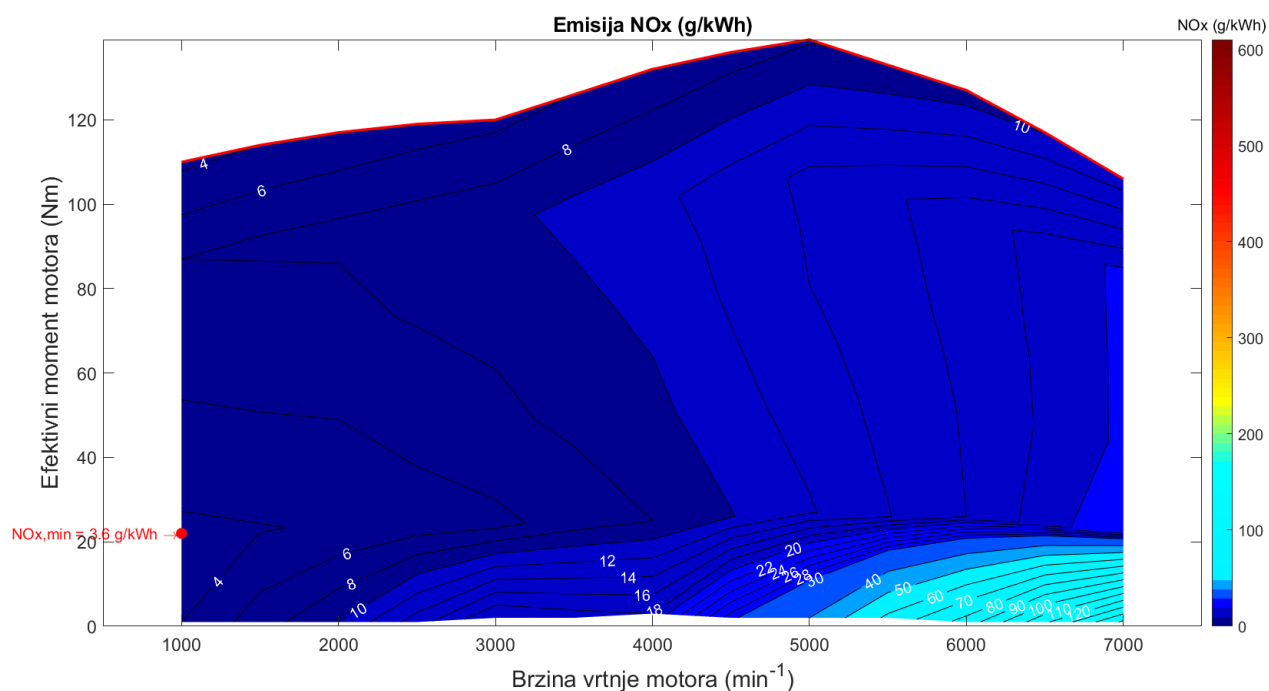


Slika 31. Topografski dijagram efektivnog stupnja djelovanja za vodik

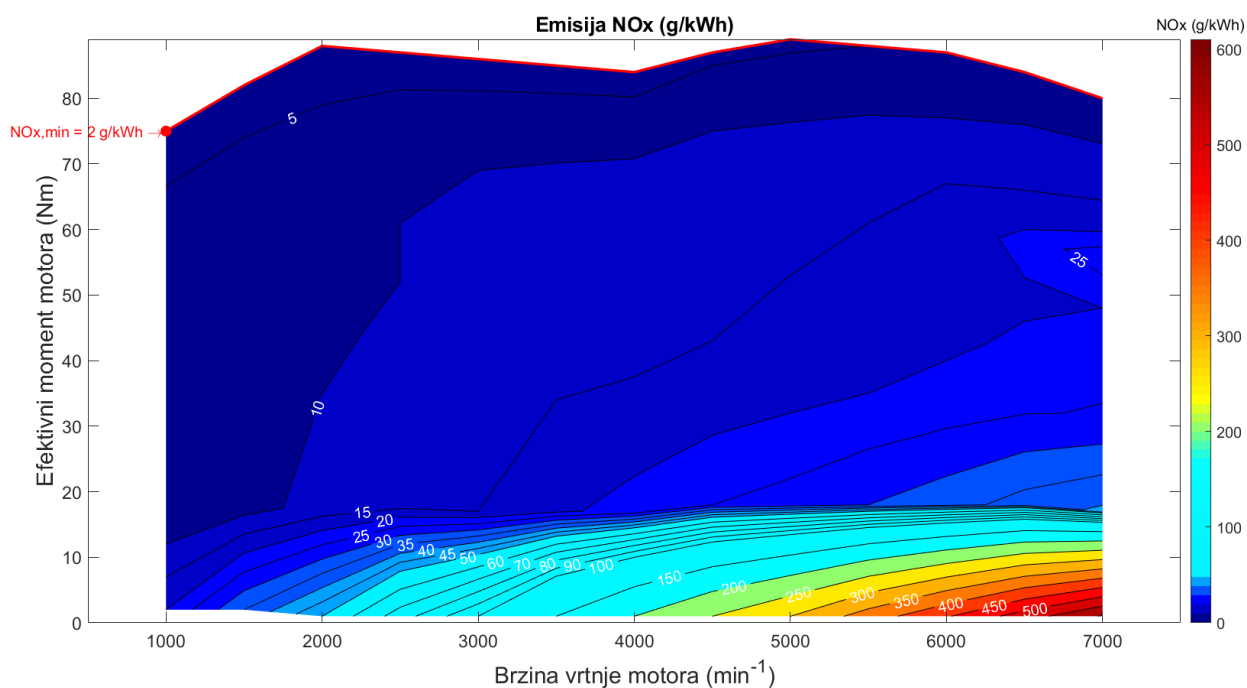
Iz prethodno priloženih dijagrama vidljivo je da veći efektivni stupanj djelovanja ima benzinov motor. To je iz razloga što se više efektivne snage generira u benzinskom motoru.

6.3. Emisija NO_x, HC i CO spojeva

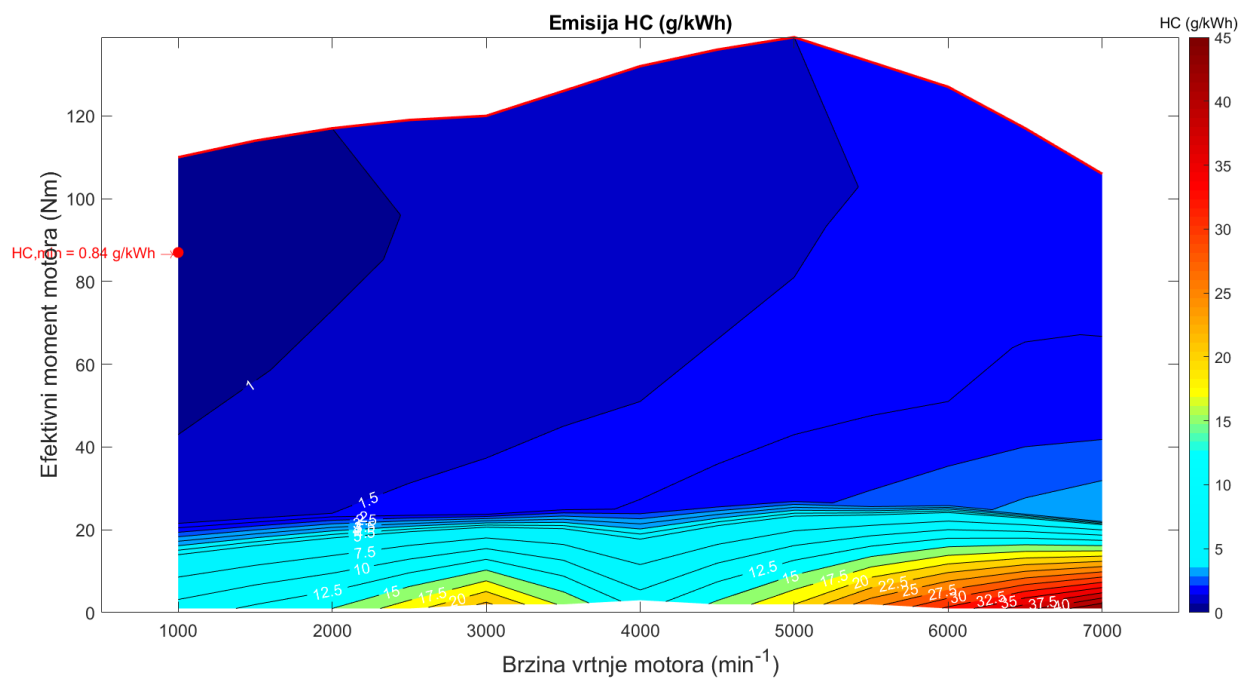
I za kraj analizirat ćemo najrelevantniju tezu vezanu uz zamjenu fosilnih goriva, a to je emisija štetnih spojeva. Na slikama 33., 34., 35., 36., 37 i 38. prikazani su topografski dijagrami emisije NO_x, HC i CO spojeva za benzin i vodik.



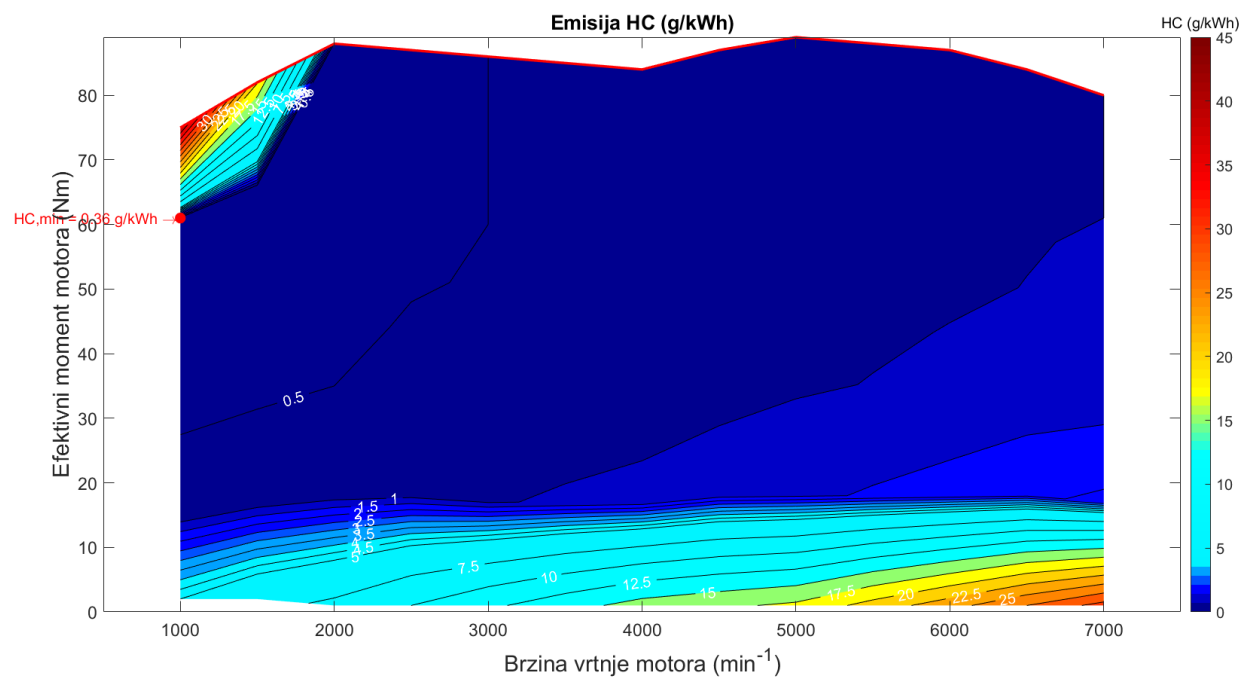
Slika 32. Topografski dijagram emisije NO_x spojeva za benzin



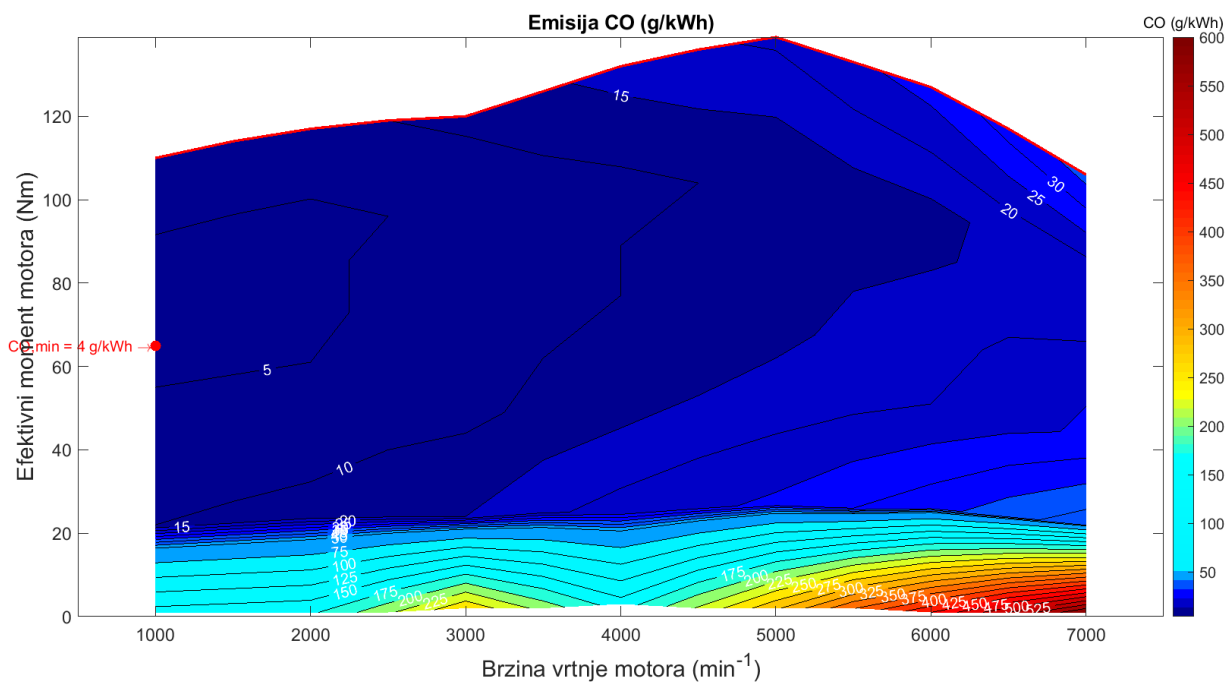
Slika 33 Topografski dijagram emisije NO_x spojeva za vodik



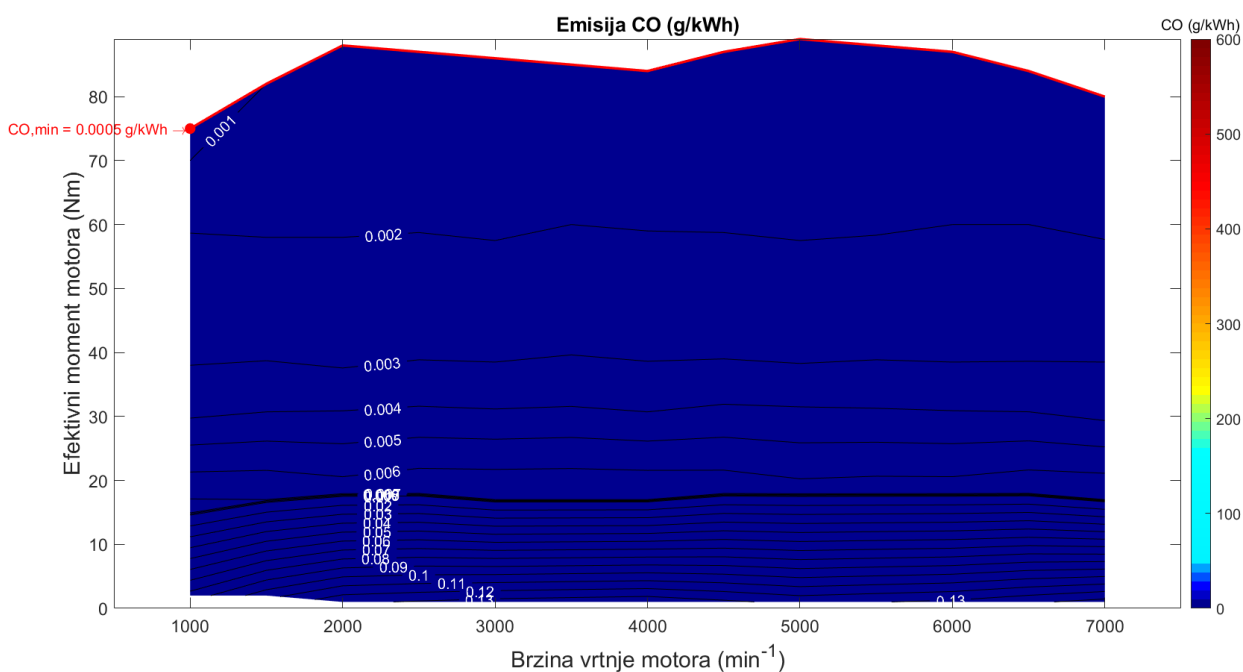
Slika 35. Topografski dijagram emisije HC spojeva za benzin



Slika 34. Topografski dijagram emisije HC spojeva za vodik



Slika 35. Topografski dijagram emisije CO spojeva za benzin



Slika 36. Topografski dijagram emisije CO spojeva za vodik

Iz rezultata je vidljivo da je NO_x emisija itekako prisutna kod izgaranja vodika u motoru, štoviše i veća je nego kod izgaranja benzina. To se može objasniti da vodik u ovoj konfiguraciji motora postiže više temperature i tlakove, što pospješuje vezanje NO_x spojeva.

Emisija ugljikovodika se smanjila upotrebom vodika kao goriva, ali i to je malo. Pretpostavlja se da su nastali ugljikovodici nastali od nenamjernog izgaranja ulja za podmazivanje u motoru, kao što je već i rečeno u ranijem tekstu.

I naposljetku, emisija ugljikovog monoksida smanjila se te njenu koncentraciju možemo gotovo pa zanemariti, i na taj način smo potvrdili tezu iz 3. poglavlja.

Sve u svemu vidimo da su štetne emisije i dalje prisutne. Ugljikov monoksid ispušta se u tragovima, no čak iako bi zanemarili da se emisija zaostalih ugljikovodika nije promijenila, visoka koncentracija NO_x spojeva u slučaju postizanja performansa nalik benzinskom motoru je zabrinjavajuća. Dakako ona se može reducirati smanjenjem kompresijskog omjera, ali na taj način bi i vanjske značajke imale manje vrijednosti.

7. ZAKLJUČAK

Svrha ovog završnog rada bila je pokazati i objasniti okolnosti u kojima se može konvencionalni Ottov motor prenamijeniti na pogon vodikom, te izračunati promjene u značajkama rada. Kalibracija vodikovog Ottovog motora napravljena je na dva načina – sa i bez promjene geometrijskih parametara. U prvoj kalibraciji benzinskom motoru je samo zamijenjeno gorivo, bez drugih preinaka, te je dobiveno da je efektivna snaga pala za 31%, a efektivni moment za 37%. Pod mijenjanje geometrijskih parametara u drugoj kalibraciji bilo je uključeno povećanje kompresijskog omjera i kašnjenje podizaja usisnih ventila. Rezultati prikazuju da je efektivna snaga motora u odnosu na prvu kalibraciju narasla za 7%, dok je efektivni moment narastao za 6%. Te vrijednosti i dalje ne mogu parirati maksimalnim performansima benzinovog motora, stoga je bilo potrebno pronaći konfiguraciju vodikovog motora sa značajkama nalik benzinovim. Teoretski to bi se moglo postići zamjenom ubrizgavanja u usisnu cijev sa ubrizgavanjem izravno u cilindar, te je simulacijom potvrđena teza da takvi motori daju veće vrijednosti efektivne snage i momenta.

Zatim je provedena detaljna analiza rezultata višestrukih simulacija pomoću topografskih dijagrama. U njima je prikazana usporedba maksimalnih vrijednosti temperature i tlaka u cilindru, efektivnog stupnja djelovanja i emisije štetnih tvari za prethodno spomenute dvije izvedbe Ottovog motora. Potvrđena je pretpostavka da će vodikov motor imati veće temperature i tlakove u cilindru zbog duže kompresije i više temperature samozapaljenja. Pokazano je da veći efektivni stupanj djelovanja ima benzinov motor, s obzirom da daje više efektivne snage i momenta. Što se tiče štetnih emisija, simulacijski model pokazao je da je ugljikov monoksid gotovo u potpunosti eliminiran u ispuhu vodikovog motora, to jest da ga u ispuhu benzinovog motora pri višim brzinama vrtnje i nižem opterećenju ima i do 600 puta više. Koncentracija dušičnih oksida je poprilično viša kod vodikovog motora, što se može pripisati uvjetima visoke temperature i tlaka koje pogoduju nastanak tih spojeva. I naposljetku, emisija zaostalih ugljikovodika približno je ista za oba motora, a pretpostavlja se da oni nastaju spaljivanjem ulja za podmazivanje koje je neizbježno fosilnog podrijetla.

Jasno je iz priloženog da vodik ipak nije u potpunosti *čisti izvor energije*, bar ne u motorima s unutarnjim izgaranjem, te ne čudi što su brojne tvrtke odustale od razvoja takvih automobila. Nepotrebno bi bilo trošiti ogromne svote novca na razvijanje tehnologije čije prakticiranje nije na dohvata ruke široj masi (nedostupnost punionica), a u isto vrijeme rezultati te iste tehnologije nisu posve zadovoljavajući. Najsnažniji argument za upotrebu vodika je smanjenje emisije

ugljikovog monoksida, no kako je i dalje postoji mogućnost za nastajanje ugljikovodika, stvaranje smoga i kiselih kiša je neophodno. Nažalost često je emisija tvari štetnih za ljudsko zdravlje u drugom planu u usporedbi s konstantnom željom za boljim i jačim strojevima, a tu vodikov motor nema nikakve šanse.

S obzirom na eksponencijalno razvijanje tehnologije i društva, i dalje će se javljati zahtjevi za smanjenjem štetnih čimbenika na okoliš. Industriji je bitno da različiti strojevi maksimalno daju koliko mogu, dok je širem kolektivu važno da živimo u zdravom okruženju. U budućnosti bi jedino rješenje bilo, ako se i dalje motori s unutarnjim izgaranjem žele upotrebljavati u istoj mjeri, ulaganje više u katalizatore i ispušni sustav, u svrhu maksimalne redukcije štetnih spojeva.

LITERATURA

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [2] Ljubas, Juretić, Dobrović: *Gorivo i mazivo, podloge za predavanja*, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [3] K. Gillingham, *Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direction?*, Stanford University, 2007.
- [4] D. Akal, S. Öztuna, M. Kemalettin Büyükkakın: *A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect*, Trakya University, 2020.
- [5] T. Wallner, H. Lohse-Busch, S. Gurski, M. Douba, W. Thiel, D. Martin, T. Korn: *Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles*, Argonne National Laboratory, 2008.
- [6] <https://www.britannica.com/science/hydrogen>
- [7] <https://www.google.com/amp/s/mechstuff.cm/how-does-a-4-stroke-engine-work/amp/>
- [8] https://en.m.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7
- [9] https://www.autozine.org/technical_school/engine/Hydrogen.html
- [10] <https://www.fsb.unizg-hr/rs/index.htm>
- [11] <https://www.auto-data.net/en/mazda-mx-5-model-1179>
- [12] <https://www.mazda.com/en/innovation/mazda-stories/engineers/jinba-ittai-idealogy/>
- [13] AVL BOOST™ – version 2013.2., *Users Guide and Theory*

PRILOZI

I. CD-R disc