

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Frano Dolić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mihael Cipek

Student:

Frano Dolić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Mihael Cipek na nesebičnoj pomoći i stručnim savjetima prilikom izrade završnog rada.

Frano Dolić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Frano Dolić** JMBAG: **0035232067**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i analiza rada pogona četvrte generacije Toyotine hibridne tehnologije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling and analysis of the powertrain operation of the fourth generation Toyota's hybrid technology**

Opis zadatka:

Sve su veći zahtjevi u smislu smanjenja emisije ispušnih plinova i buke kod cestovnih vozila, što dovodi u pitanje budućnost konvencionalnih rješenja kod kojih se koristi motor s unutarnjim izgaranjem kao jedini pogonski izvor snage. Stoga u posljednja dva desetljeća raste trend uvođenja električnih i hibridnih pogona koja uz smanjenje potrošnje goriva i emisija stakleničkih plinova zadržavaju performanse. Imajući to u vidu, ovaj zadatak analizira hibridni pogon četvrte generacije Toyotine hibridne tehnologije. U radu je potrebno:

- opisati hibridni pogon vozila te njegove inačice
- detaljno opisati četvrtu generaciju Toyotine hibridne tehnologije
- na temelju dostupnih podataka izraditi kvazistatički model navedenog pogonskog sklopa
- provesti simulaciju rada sustava za jedan odabran certificirani vozni ciklus
- na temelju dobivenih rezultata dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Mihael Cipek

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Damir Godec



SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. HIBRIDNI POGON	4
2.1. Podjela hibridnih pogona prema konfiguraciji sustava	4
2.1.1. Serijski hibridni pogon	5
2.1.2. Paralelni hibridni pogon	6
2.1.3. Serijsko-paralelni hibridni pogon	7
2.2. Podjela hibridnih pogona prema vrsti pogona	9
2.2.1. Blagi hibrid (MHEV)	9
2.2.2. Pravi hibrid (FHEV)	9
2.2.3. Plug-in hibrid (PHEV)	10
2.3. Toyotina hibridna tehnologija	10
2.3.1. Četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije	10
3. KVAZISTATIČKI MODEL POGONSKOG SKLOPA	14
3.1. Tehničke karakteristike vozila	14
3.2. Model uzdužne dinamike vozila	15
3.2.1. Jednadžbe uzdužne dinamike	15
3.2.2. Kinematske jednadžbe	17
3.3. Statički modeli strojeva	17
3.3.1. Motor s unutarnjim izgaranjem (ICE)	18
3.3.2. Generator (M/G1)	18
3.3.3. Pogonski elektromotor (M/G2)	19
4. SIMULACIJA MODELA	21
4.1. WLTP vozni ciklus	21
4.2. Logika upravljanja	22
4.3. Rezultati simulacije	24
4.4. Potrošnja goriva	24
4.5. Stanje napunjenosti baterije (SOC)	25
4.6. Korištenje snage baterije i elektromotora	26
4.7. Korištenje snage motora s unutarnjim izgaranjem	27
4.8. Ekonomska isplativost hibridnih vozila	28
5. ZAKLJUČAK	29

POPIS SLIKA

Slika 1 Toyota AA [5]	2
Slika 2 Shematski prikaz serijskog hibridnog pogona [7]	5
Slika 3 Shematski prikaz paralelnog hibridnog pogona [7]	6
Slika 4 Shematski prikaz serijsko-paralelnog hibridnog pogona [7]	7
Slika 5 Toyota Corolla, 12. generacije [8]	8
Slika 6 Jedinica za kontrolu snage	11
Slika 7 Elektronički kontrolirani varijabilni prijenos (e-CVT).....	12
Slika 8 a) Nickel-metal baterija b) Litij-ionska baterija	13
Slika 9 Uzdužna dinamika vozila	15
Slika 10 Brzinski profil vozila tijekom WLTP testnog ciklusa [14]	21
Slika 11 Trenutna i ukupna potrošnja goriva	24
Slika 12 Stanje napunjenosti baterije	25
Slika 13 Korištenje snage baterije	26
Slika 15 Korištenje snage ICE-a	27

POPIS TABLICA

Tablica 1 Tehničke karakteristike vozila [11].....14

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m ³	Gustoća zraka
C_d	-	Koeficijent otpora zraka
A	m ²	Frontalna površina vozila
v	m/s	Brzina vozila
C_r	-	Koeficijent otpora kotrljanja
m	Kg	Masa vozila
g	m/s ²	Ubrzanje gravitacije
a	m/s ²	Akceleracija vozila
θ	°	Kut nagiba ceste
F_{pogon}	N	Pogonska sila
F_{zrak}	N	Otpor zraka
$F_{kotrljanja}$	N	Otpor kotrljanja
$F_{inercija}$	N	Inercijska sila
$F_{uzbrdica}$	N	Sila uslijed nagiba
r_{kotec}	m	Polumjer kotača
η	-	Učinkovitost prijenosnog sustava
$\omega_{vratilo}$	s ⁻¹	Kutna brzina vrtnje vratila
$P_{pogonska}$	W	Pogonska snaga
P_{ICE}	W	Snaga motora s unutarnjim izgaranjem
$T_{vratilo}$	Nm	Okretni moment vratila
η_{ICE}	-	Učinkovitost ICE-a
m_{gorivo}	Kg	Masa potrošenog goriva
Δt	s	Vremenski korak simulacije
H_d	MJ	Donja ogrjevna vrijednost goriva
P_{MG1}	W	Snaga generatora M/G1
η_{MG1}	-	Učinkovitost generatora M/G1
SOC	%	Stanje napunjenosti baterije
P_{MG2}	W	Snaga generatora M/G2
η_{MG2}	-	Učinkovitost generatora M/G2
P_{regen}	W	Snaga generirana regenerativnim kočenjem
η_{regen}	-	Učinkovitost regenerativnog kočenja

SAŽETAK

U ovom završnom radu je analizirana četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije. Napravljen je kvazistatički model te je provedeno simuliranje ključnih komponenti hibridnog pogona, kao što su motor s unutarnjim izgaranjem, elektromotor i baterija, pomoću kojih je analizirana efikasnost i performanse navedenog sustava. Na temelju analize određeni su ključni čimbenici koji doprinose poboljšanim performansama, kao što su povećana snaga elektromotora, optimizirano upravljanje energijom i poboljšana efikasnost baterije. Dobiveni rezultati također potvrđuju potencijal hibridne tehnologije u smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i doprinosu održivom transportu.

Ključne riječi: Hibridni pogon, modeliranje, simulacija, efikasnost, potrošnja goriva

SUMMARY

This thesis analyzes the fourth generation of Toyota's hybrid technology. A quasi-static model was developed, and the simulation of key hybrid powertrain components, such as the internal combustion engine, electric motor, and battery, was conducted to analyze the efficiency and performance of the system. Based on the analysis, key factors contributing to improved performance were identified, such as increased electric motor power, optimized energy management, and improved battery efficiency. The results obtained also confirm the potential of hybrid technology in reducing dependence on fossil fuels and contributing to sustainable transportation.

Keywords: Hybrid powertrain, modeling, simulation, efficiency, fuel consumption

1. UVOD

U posljednjih nekoliko desetljeća svjedoci smo sve većeg interesa za razvojem održivih oblika prijevoza. S obzirom na rastuću svijest o utjecaju motora s unutarnjim izgaranjem na okoliš te iscrpljivanje fosilnih goriva, hibridna vozila su se pozicionirala kao obećavajuća alternativa. Hibridni pogon predstavlja sustav koji koristi kombinaciju dvaju ili više različitih izvora energije za pogon vozila. Najčešće se radi o kombinaciji motora s unutarnjim izgaranjem (ICE) i električnog motora, pri čemu se električna energija pohranjuje u baterijama [1]. Smanjena potrošnja goriva i emisija štetnih plinova čine hibridne pogone privlačnim izborom u kontekstu sve strožih ekoloških propisa. Toyota se kao vodeći proizvođač hibridnih vozila, istaknula svojim radom i kontinuiranim unapređenjem hibridne tehnologije. Predstavila je svoj prvi Toyota Hybrid System (THS) 1997. godine, čime je pokrenula revoluciju u automobilskoj industriji. Do danas, Toyotina hibridna tehnologija je evoluirala kroz nekoliko generacija, svaka s boljim performansama, višom učinkovitošću i nižim emisijama [2]. Četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije predstavlja vrhunac ove evolucije, s dodatno unaprijeđenim električnim komponentama i optimiziranim sustavom upravljanja energijom.

Ideja o spajanju različitih izvora energije u vozilima nije nova. Prvi pokušaji datiraju još iz 19. stoljeća, kada su se eksperimentiralo s kombinacijom parnih strojeva i električnih motora. Krajem 19. stoljeća, Ferdinand Porsche, tada mladi inženjer, sudjeluje u razvoju Lohner-Porschea, jednog od prvih hibridnih vozila. Automobil je nazvan Mixte te je koristio benzinski motor za pogon generatora koji je služio za punjenje grupe akumulatora. Ovaj automobil je pokazao potencijal hibridne tehnologije, ali tehnička ograničenja tog doba spriječila su širu primjenu [3]. H.Piper je 1905. godine izdao patent za hibridno vozilo. Elektromotor je koristio kao pomagalo motoru s unutarnjim izgaranjem u ubrzavanju. Ideja nije doživjela uspjeh jer su par godina nakon motori s unutarnjim izgaranjem samostalno imali i bolje performanse. Kroz prvu polovicu 20. stoljeća, zbog jeftine cijene goriva, ideja o hibridnim vozilima ostala je uglavnom u fazi eksperimentiranja. Veliki preokret u razvoju hibridnih vozila dogodio se tijekom energetske krize 1973. godine, kada su naftni embargo i porast cijena nafte potaknuli potrebu za energetsom učinkovitošću i istraživanjem alternativnih izvora energije. U tom periodu, automobilske kompanije počele su ozbiljno istraživati potencijal hibridnih pogona.

Toyota Motor Corporation osnovana je 1937. godine u Japanu, a njezin osnivač, Kiichiro Toyoda, započeo je posao s ambicijom da stvori pouzdane i pristupačne automobile. Tvrtka je nastala iz tvrke Toyoda Automatic Loom Works koja se bavila proizvodnjom tkalačkih strojeva, što je već u početku postavilo temelje za Toyotinu filozofiju fokusiranu na kvalitetu i inovaciju [4]. Prvi automobil pod Toyotinim imenom bio je Model AA (**Slika 1**), proizveden 1936. godine, što je označilo početak Toyotinog puta u automobilskoj industriji. Tijekom 1940-ih i 1950-ih, Toyota se fokusirala na širenje proizvodnih kapaciteta i poboljšanje tehnologije u uvjetima nakon Drugog svjetskog rata, kada je Japan prolazio kroz period obnove. Tokom tog vremena, Toyota je razvila svoju prvu proizvodnu liniju koristeći "just-in-time" proizvodnu filozofiju koja je kasnije postala poznata kao Toyota Production System (TPS). TPS je revolucionirao automobilsku industriju, smanjujući troškove i vrijeme proizvodnje te povećavajući kvalitetu proizvoda.



Slika 1 Toyota AA [5]

Jedan od najvažnijih trenutaka u povijesti Toyote dogodio se krajem 1990-ih, kada je tvrtka lansirala već spomenuti prvi serijski hibridni automobil, Toyota Prius. Koristio je Toyotin Hybrid Synergy Drive (HSD) sustav, koji je kombinirao benzinski motor s elektromotorom i naprednim sustavom upravljanja energijom. Ovaj sustav omogućio je značajno smanjenje emisija CO₂ i potrošnje goriva, te je postao osnova za razvoj budućih generacija hibridnih i električnih vozila.

Toyota je u novu eru hibridne tehnologije ušla 2003. godine lansiranjem druge generacije Toyota Priusa. Ovaj model je uveo značajno poboljšan Hybrid Synergy Drive (HSD), sustav koji je kombinirao motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) i elektromotor koristeći paralelnu konfiguraciju [2]. Ovaj sustav omogućio je potpuno električnu vožnju pri nižim brzinama i poboljšao učinkovitost regenerativnog kočenja.

Kroz sljedeće godine, HSD je prošao kroz nekoliko generacija poboljšanja:

- **2009.:** Treća generacija Priusa donijela je dodatne optimizacije, uključujući smanjenje unutarnjeg trenja u motoru s unutarnjim izgaranjem, povećanje gustoće snage baterija i uvođenje sustava recirkulacije ispušnih plinova (EGR) za poboljšanje učinkovitosti sagorijevanja. Novi inverter i DC-DC pretvarač smanjili su gubitke energije, omogućujući bolje performanse s manje potrošnje goriva.
- **2015.:** Četvrta generacija HSD sustava, lansirana s četvrtom generacijom Priusa, koristila je još kompaktnije elektromotore i litij-ionske baterije s višom energetsom gustoćom, što je dodatno smanjilo težinu i povećalo učinkovitost. Nova transmisija s planetarnim zupčanicima omogućila je glatkiji prijelaz između električnog i hibridnog načina rada.

Cilj ovog rada je modeliranje i analiza pogonskog sustava četvrte generacije Toyotine hibridne tehnologije kako bi se utvrdila učinkovitost u smanjenju potrošnje goriva i emisija ispušnih plinova. U drugom poglavlju je dan opis hibridnog električnog pogona zatim je u trećem poglavlju napravljen kvazistatički model na temelju kojeg je izrađen računalni model u programskom paketu Matlab. U četvrtom poglavlju su provedene simulacije za WLTP ciklus te je dana diskusija rezultata s naglaskom na učinkovitost takvog pogona. Na kraju je dan zaključak u petom poglavlju.

2. HIBRIDNI POGON

Hibridni pogonski sustavi predstavljaju ključnu tehnologiju u prijelazu prema održivijem prometu, kombinirajući motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor kako bi se smanjila potrošnja goriva i emisija štetnih plinova. U ovome poglavlju pružit će se detaljan pregled osnovnih koncepata, komponenti i evolucije hibridnih pogona, s posebnim naglaskom na Toyotinu tehnologiju.

2.1. Podjela hibridnih pogona prema konfiguraciji sustava

Temeljni princip hibridnog pogona leži u kombinaciji dva pogonska sklopa – obično motora s unutarnjim izgaranjem (ICE) i elektromotora – koji zajednički rade na pokretanju vozila, svaki u optimalnim uvjetima za svoju vrstu energije. Ova kombinacija omogućuje korištenje prednosti oba izvora energije, pri čemu se nadoknađuju njihove slabosti, kao što su niska učinkovitost motora s unutarnjim izgaranjem pri niskim brzinama ili ograničeni domet električnih vozila. Efikasnost hibridnih automobila postiže se korištenjem regenerativnog kočenja, gdje se kinetička energija pretvara u električnu energiju i pohranjuje u bateriju za kasniju upotrebu, poput pokretanja ili ubrzavanja vozila. Uz to, motor s unutarnjim izgaranjem automatski se isključuje kada je vozilo u mirovanju, dok se višak energije generiran tijekom rada motora pretvara u električnu energiju kako bi se smanjila potrošnja goriva i povećala ukupna učinkovitost sustava [5].

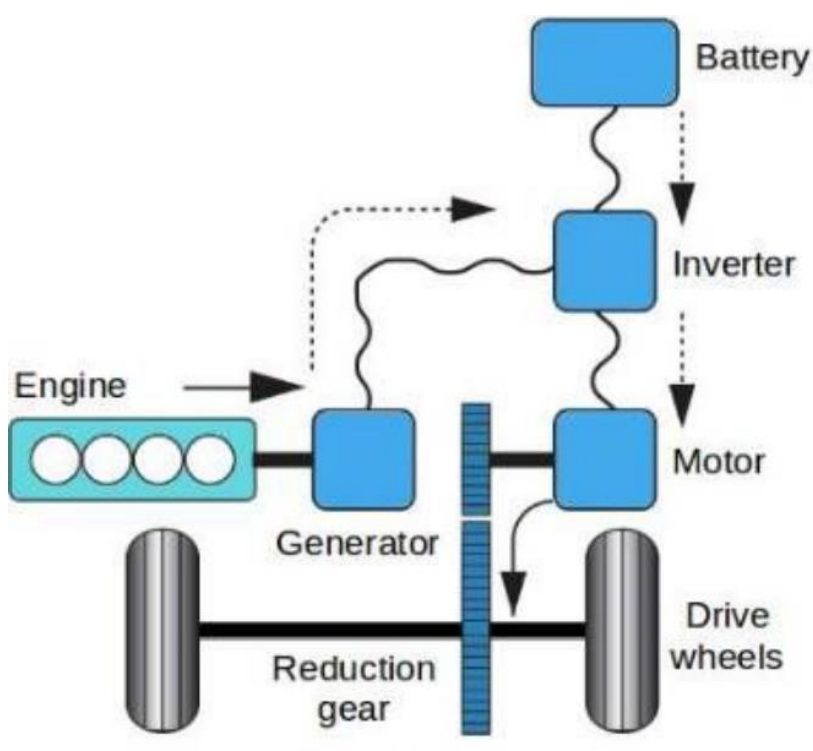
Hibridni pogonski sustavi se obično dijele u tri glavne konfiguracije:

- Serijski
- Paralelni
- Kombinirani (serijsko-paralelni) sustavi

Svaka od ovih konfiguracija ima jedinstvene karakteristike koje određuju način na koji su motori povezani i kako se upravlja prijenosom snage.

2.1.1. Serijski hibridni pogon

Serijska konfiguracija jedna je od najstarijih i najjednostavnijih konfiguracija hibridnog pogona. U ovom sustavu pogonske kotače pokreće isključivo elektromotor dok motor s unutarnjim izgaranjem nikako nije povezan s kotačima. To omogućuje motoru s unutarnjim izgaranjem rad u najoptimalnijem području gdje postiže najveću učinkovitost, generirajući maksimalnu snagu uz minimalnu potrošnju goriva. Regulacija brzine vozila vrlo je jednostavna jer se temelji na kontroli brzine elektromotora, koji je izuzetno prilagodljiv [5].

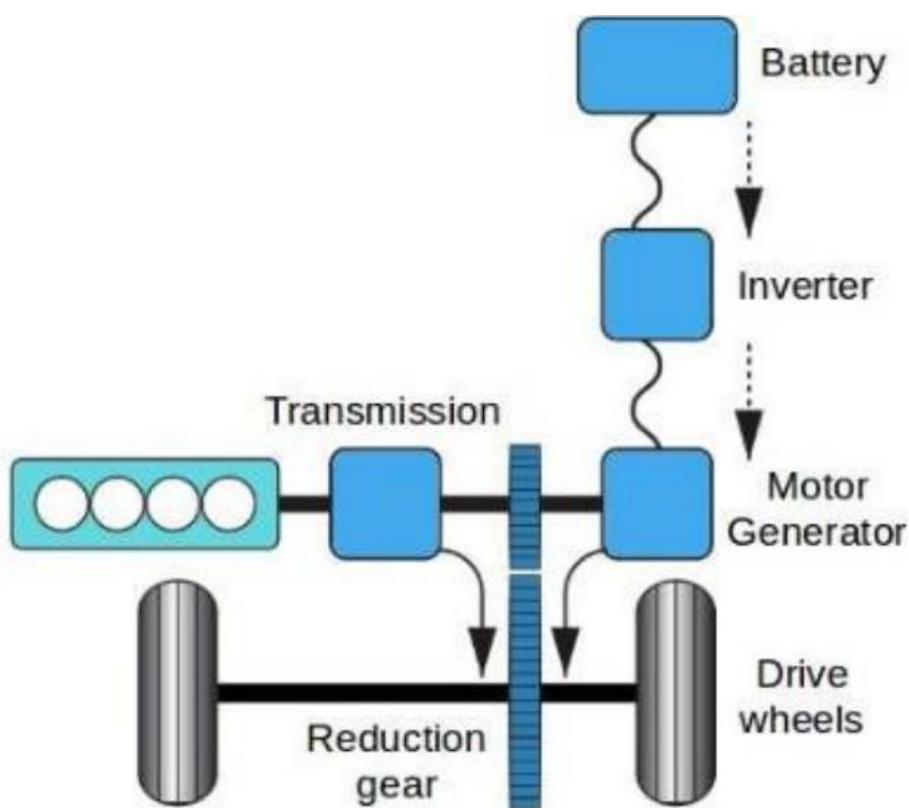


Slika 2 Shematski prikaz serijskog hibridnog pogona [7]

Povećanje energetske učinkovitosti postiže se korištenjem regenerativnog kočenja, pri čemu elektromotor u načinu rada generatora pretvara kinetičku energiju kočenja u električnu energiju koja se pohranjuje u bateriji. Međutim, iako serijska konfiguracija smanjuje potrošnju goriva, ta prednost je djelomično ograničena jer mehanička energija motora s unutarnjim izgaranjem prolazi kroz električni sustav, uz gubitke energije na svakom prijenosnom koraku. Motor je obično manji kako bi udovoljio određenim zahtjevima snage, baterija je veća od one koju koriste paralelni hibridi kako bi se ostvarili potrebni energijski zahtjevi. To sve čini ovakve hibride dosta skupljim u usporedbi s paralelnim hibridima.

2.1.2. Paralelni hibridni pogon

U ovakvim vozilima, motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor zajedno stvaraju snagu potrebnu za pokretanje kotača. Ovakvi hibridi nerijetko koriste manju bateriju u usporedbi sa serijskim hibridima, oslanjajući se na regenerativno kočenje za punjenje baterije. U slučaju manjeg opterećenja, paralelni hibridi mogu koristiti motor s unutarnjim izgaranjem kao generator za dodatno punjenje baterije, slično alternatoru u konvencionalnim automobilima [5].

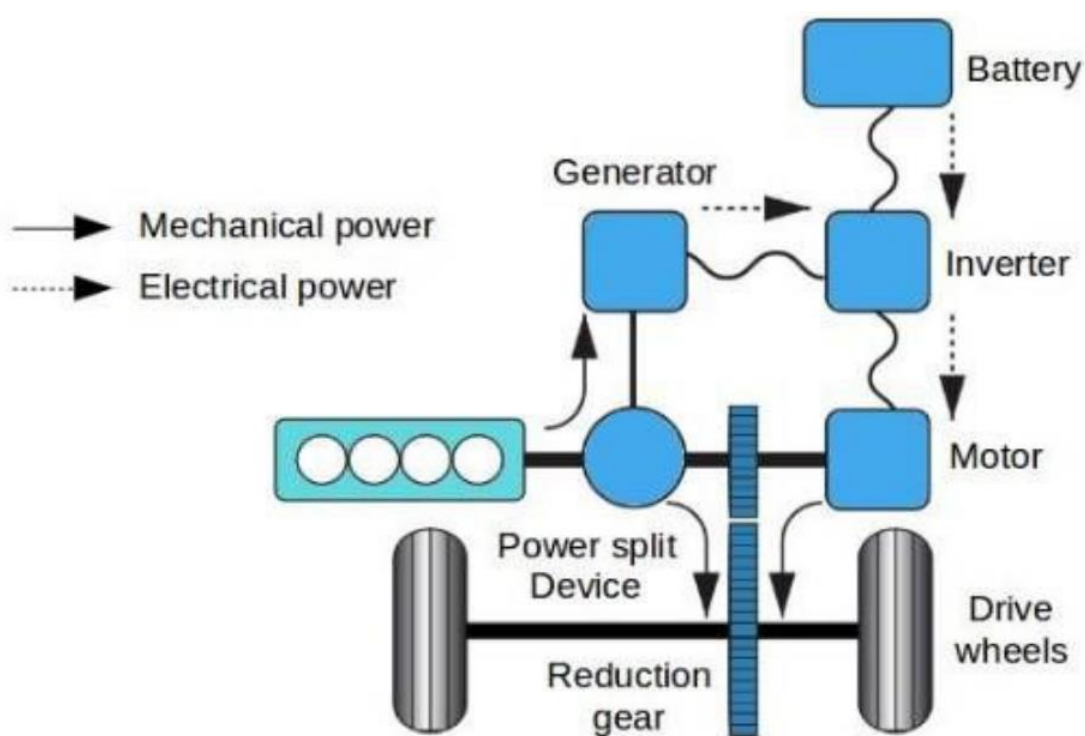


Slika 3 Shematski prikaz paralelnog hibridnog pogona [7]

Budući da je motor s unutarnjim izgaranjem izravno povezan s kotačima, paralelni pogonski sklopovi izbjegavaju neučinkovitost pretvaranja mehaničke snage u električnu i obrnuto, što povećava njihovu učinkovitost tijekom vožnje na autocesti. Smanjenje potrošnje goriva može se postići isključivanjem motora s unutarnjim izgaranjem u situacijama kao što su zastoji i promet i sl.

2.1.3. Serijsko-paralelni hibridni pogon

Ovakav pogon objedinjuje prednosti serijskog i paralelnog pogona. U skladu s uvjetima, u nekim situacijama dominira motor s unutarnjim izgaranjem, a drugim elektromotor. Raspodjela snage između motora s unutarnjim izgaranjem i električnog motora može biti izvedena električki ili mehanički, pri čemu omjer rada može varirati od 0% do 100% u korist bilo elektromotora ili motora s unutarnjim izgaranjem, ovisno o trenutnim uvjetima vožnje i potrebi za snagom.



Slika 4 Shematski prikaz serijsko-paralelnog hibridnog pogona [7]

Ključna prednost serijsko-paralelne konfiguracije je u mogućnosti automatskog prilagođavanja režima rada u stvarnom vremenu, ovisno o uvjetima vožnje, stanju napunjenosti baterije, i zahtjevima vozača [5]. Na primjer, pri vožnji u gradu, sustav može koristiti serijski način rada kako bi maksimizirao korištenje električne energije i smanjio emisije, dok pri vožnji na autocesti može prebaciti na paralelni način rada kako bi se iskoristila snaga motora s unutarnjim izgaranjem.

Toyota Corolla je jedan od poznatijih primjera vozila koje koristi serijsko-paralelnu konfiguraciju, pružajući izuzetnu kombinaciju učinkovitosti i performansi. Ovaj sustav kombinira 1.8-litreni motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor, pružajući ukupnu snagu od oko 121 konjskih snaga. Hibridni sustav omogućuje tihu i glatku vožnju, s iznimno niskom potrošnjom goriva.



Slika 5 Toyota Corolla, 12. generacije [8]

2.2. Podjela hibridnih pogona prema vrsti pogona

Jedan od ključnih aspekata hibridnih automobila je vrsta pogona koju koriste, a koja se može podijeliti u nekoliko glavnih kategorija: blagi hibridi (Mild Hybrid; MHEV), pravi hibridi (Full Hybrid Electric; FHEV) te plug-in hibridi (Plug-In Hybrid; PHEV) [9]. Svaka od ovih vrsta ima svoje specifične karakteristike i prednosti.

2.2.1. Blagi hibrid (MHEV)

Blagi hibridi su najosnovniji oblik hibridnog pogona. Ovi automobili koriste mali električni motor koji pomaže glavnom benzinskom motoru. Električni motor u blagim hibridnim vozilima omogućuje dodatnu snagu pri ubrzanju, poboljšava učinkovitost goriva i smanjuje emisiju štetnih plinova [9]. Velika prednost u odnosu na vozila bez hibridnog sustava je u regenerativnom kočenju s kojim se energija kočenja koja bi bila izgubljena pohranjuje u baterije za naknadno korištenje. Ovisno o modelu, može se očekivati 10 - 15 % manja potrošnja goriva u odnosu na vozila bez hibridnog pogona. Blagi hibridi su često cjenovno povoljniji i tehnološki jednostavniji u usporedbi s drugim vrstama hibrida, što ih čini privlačnim izborom za mnoge kupce.

2.2.2. Pravi hibrid (FHEV)

Pravi hibridi predstavljaju napredniji oblik hibridne tehnologije. To su hibridna vozila na koja mislimo kada ih spominjemo u svakodnevnom razgovoru, a ujedno su i najzastupljenija vrsta hibridnih vozila trenutno na tržištu. Potpuni hibridi imaju baterije većeg kapaciteta i znatno jače elektromotore u odnosu na blage hibridne. Električni motor u pravim hibridima može samostalno pokretati vozilo u određenim uvjetima, kao što su niske brzine ili kratke udaljenosti. Ova fleksibilnost omogućava vozačima da koriste prednosti oba pogonska sustava i prilagode način vožnje prema svojim potrebama. Kako imaju veću bateriju, mogu koristiti napredne sustave regenerativnog kočenja i tako pohraniti više energije za naknadno korištenje. Ta regenerirana energija kočenja koristi se efikasnije nego je to slučaj kod blagih hibrida jer na malim brzinama (do 40 km/h), na kojima je benzinski motor najmanje efikasan, vozilo pogoni isključivo elektromotor. Takav način rada osigurava značajne uštede u potrošnji goriva koji su kod automobila s motorima s unutarnjim izgaranjem nezamislivi [9].

2.2.3. *Plug-in hibrid (PHEV)*

Plug-in hibridi se od prethodno navedenih vrsta razlikuju po tome što imaju baterije višestruko većeg kapaciteta koje mogu nadopunjavati električnom energijom iz vanjskog izvora, preko punjača za električna vozila. Najveća učinkovitost postiže se na kraćim udaljenostima, gdje se može gotovo potpuno izbjeći upotreba motora s unutarnjim izgaranjem, čime se znatno smanjuju emisije štetnih plinova. Punjenje preko noći na kućnom punjaču osigurat će dovoljan doseg za svakodnevne potrebe gradske vožnje, a benzinski motor se može koristiti na autocesti kod dužih putovanja ili u nuždi kad se baterija isprazni. Plug-in hibrid može biti izveden i sa serijskim i sa paralelnim pogonskim sustavom [9].

2.3. **Toyotina hibridna tehnologija**

Toyota je bila jedna od prvih tvrtki koja je prepoznala i iskoristila prednosti hibridnog pogona, razvijajući inovativne tehnologije koje su značajno pridonijele popularizaciji i masovnom prihvaćanju hibridnih vozila širom svijeta. Svoje prvo hibridno vozilo model Prius predstavila je 1997. godine i pokrenula svojevrsnu revoluciju. Više od 9.000.000 hibrida prodano je u svijetu od 1997. do danas, a impresivnih 7 milijuna od toga otpada na Toyotine modele.

2.3.1. *Četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije*

Toyota je krajem 2015. godine počela proizvoditi vozila pogonjena četvrtom generacijom hibridne tehnologije. Napravila je značajna poboljšanja u svojoj novoj generaciji hibridnog pogonskog sistema, smanjujući gubitke, redizajnirajući i premještajući ključne komponente, te smanjujući ukupnu težinu. Rezultat je poboljšana učinkovitost, postignuta detaljnim promjenama na mjenjačkoj kutiji, motoru i kombiniranom hibridnom sustavu [10].

Prvi Toyotin model pogonjen četvrtom generacijom bio je **Prius** predstavljen 2015. godine.

Nadalje će se analizirati glavna poboljšanja u odnosu na prošlu generaciju.

2.3.1.1. Hlađenje motora

Ključna poboljšanja uključuju prvi Toyotin dvostruki sustav hlađenja. Ovaj sustav omogućuje niži profil haube i snižavanje težišta vozila, što doprinosi boljoj aerodinamici i stabilnosti na cesti. Uveden je novi sustav kanala za zrak s četiri odvojena kanala koji usmjeravaju zrak prema kondenzatoru klimatizacije i radiatoru, osiguravajući optimalno hlađenje motora.

Aktivni rešetkasti zatvarač, smješten iza rešetke radijatora, dodatno smanjuje otpor zraka, a zatvara se kada nije potrebna dodatna ventilacija radijatora, čime se smanjuje vrijeme zagrijavanja motora i poboljšava ekonomičnost potrošnje goriva. Također, novi vodeni pumpni sustav za hibridni sustav ima maksimalnu brzinu od 6000 okretaja u minuti, što doprinosi učinkovitijem hlađenju.

2.3.1.2. Jedinica za kontrolu snage (PCU)

Drugi važan element novog hibridnog sustava je jedinica za kontrolu snage (PCU), koja koristi učinkovitije komponente i napredniji sustav hlađenja. To omogućuje smanjenje energetske gubitaka za 20%, što direktno doprinosi većoj ekonomičnosti potrošnje goriva.

PCU je sada smještena izravno iznad mjenjača, što je omogućeno smanjenjem veličine i težine, čime se poboljšava raspodjela mase i opća efikasnost vozila. Također, novi PCU radi tiše u usporedbi s prethodnim verzijama, što doprinosi boljoj udobnosti vožnje.



Slika 6 Jedinica za kontrolu snage

2.3.1.3. Mjenjač i motor

U središtu sustava nalazi se elektronički kontrolirani varijabilni prijenos (ECVT) koji koristi raspored s više osovina. Ovaj raspored omogućuje širi raspon brzine motora zahvaljujući redukcijском zupčaniku i glavnom električnom motoru (MG2), koji su sada postavljeni na paralelnu osovinu. Ovakav dizajn smanjuje veličinu kućišta prijenosa i smanjuje trenje, što rezultira manjim operativnim otporom.

Manja veličina kućišta prijenosa omogućuje optimalniju poziciju invertera ispod haube, što dodatno smanjuje trenje za 20% , povećavajući performanse i ekonomičnost potrošnje goriva. Motor generator (MG1) i planetarni zupčanik ostaju u koaksijalnom odnosu s radilicom motora, čime se osigurava optimalna sinkronizacija pogonskog sustava.

Osim toga, veličina motora je smanjena, a akumulator je sada smještena u motornom prostoru, što doprinosi kompaktnijem dizajnu. Sustav je fino podešen kako bi se omogućila veća snaga električnog motora i bolja primjena okretnog momenta, posebno pri niskim brzinama, što osigurava bolju ubrzanja pri malim brzinama.



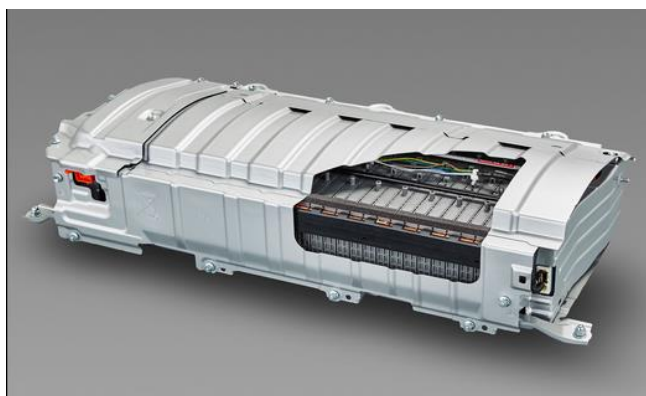
Slika 7 Elektronički kontrolirani varijabilni prijenos (e-CVT)

2.3.1.4. Baterija

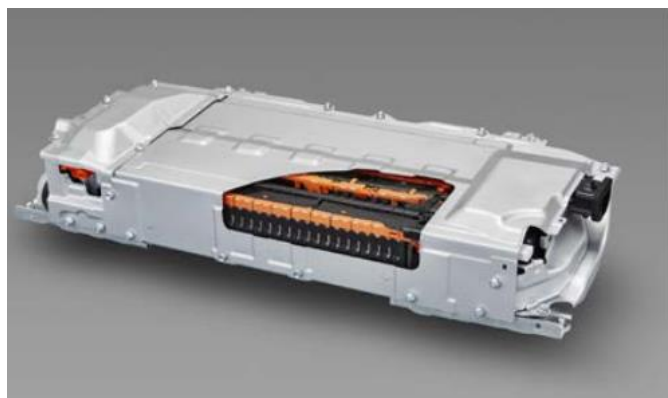
Novi model hibridnog vozila prvi put nudi dvije različite vrste baterija, ovisno o modelu. Baterije su preseljene ispod stražnjih sjedala, što je doprinijelo većem prtljažnom prostoru i snižavanju težišta vozila, što poboljšava dinamiku vožnje.

Nikal-metal hibridna baterija (NiMH) doživjela je smanjenje težine i veličine zahvaljujući optimiziranom unutarnjem rasporedu. Težina je smanjena za 2,5%, dok je veličina smanjena za 13,7%, a napon baterije iznosi 201,6V. Novi dizajn također uključuje zračni filter na otvoru za hlađenje baterije, što doprinosi boljem hlađenju.

Litij-ionska baterija donosi dodatne prednosti u vidu manje težine i veće energetske gustoće u usporedbi s NiMh baterijama. Ova baterija može pohraniti više energije u odnosu na svoju veličinu, što je postignuto optimizacijom unutarnjeg rasporeda. Težina je smanjena za 40%, dok je veličina smanjena za 38,5%, čime je dodatno poboljšana efikasnost sustava.



a)



b)

Slika 8 a) Nickel-metal baterija b) Litij-ionska baterija

3. KVAZISTATIČKI MODEL POGONSKOG SKLOPA

U ovom poglavlju detaljno će se obraditi izrada kvazistatičkog modela pogonskog sklopa četvrte generacije Toyotine hibridne tehnologije. Kvazistatički model opisuje ponašanje sustava u stanju ravnoteže pri različitim režimima rada, odnosno u trenutku kada su svi vremenski ovisni procesi dovoljno spori da se mogu smatrati konstantnim u određenim vremenskim intervalima. Cilj je simulirati rad pogonskog sustava kako bi se mogla procijeniti potrošnja energije u stvarnim uvjetima vožnje. Za model simulacije, koji je pokretan četvrtom Toyotinom generacijom, izabran je model Toyota Corolla (**Slika 5**).

3.1. Tehničke karakteristike vozila

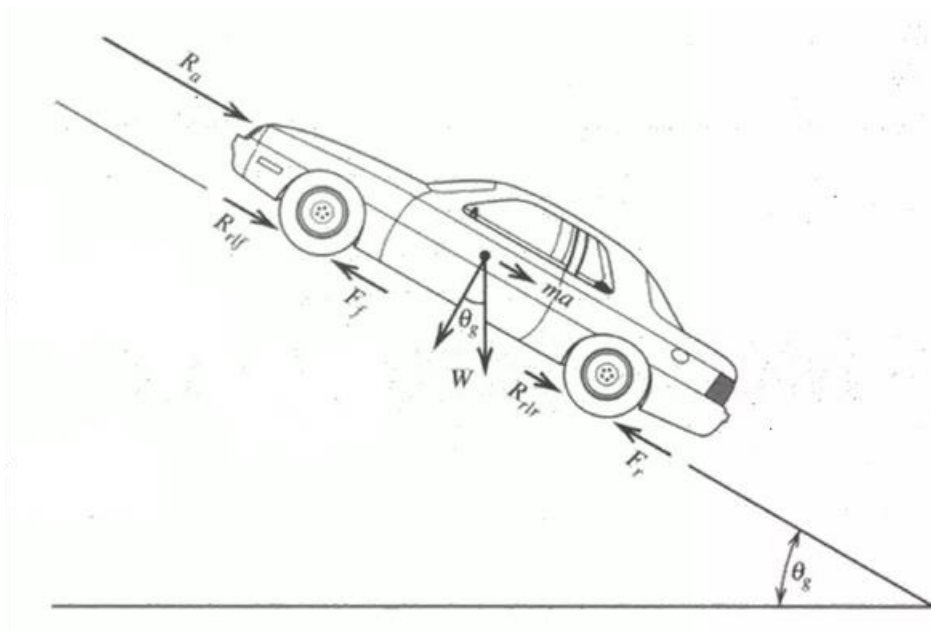
U **tablici 1** su dane tehničke specifikacije Toyote Corolle očitane su iz Toyotine službene dokumentacije [11].

Tablica 1 Tehničke karakteristike vozila [11]

Naziv motora	2ZR-FXE
Tip motora	Četverocilindrični u liniji
Sustav goriva	Elektronsko ubrizgavanje goriva
Max. Okretni moment (Nm @ rpm)	142 @ 3,600 - 4,000
Ukupna snaga hibridnog sustava (bhp/kW)	120 / 90 @ 5200 rpm
Specifikacije elektromotora	
Tip motora	Permanentni magnet, sinkroni
Max. napon (V)	600
Max. snaga (kW)	53
Max. okretni moment (Nm)	163
Specifikacije baterije	
Tip baterije	Litij-ionska
Nominalni napon (V)	600
Kapacitet baterije (Ah)	4.08
Specifikacije prijenosa	
Tip prijenosa	CVT
Transmisijski omjer	2.834

3.2. Model uzdužne dinamike vozila

Kvazistatički model hibridnog pogona koristi brzinu vrtnje izlaznog vratila i pogonski moment kao ulazne varijable, dok su glavni izlazni parametri potrošnja goriva i stanje napunjenosti baterije [12]. Brzina vrtnje vratila i potrebna pogonska sila izračunavaju se korištenjem jednadžbi uzdužne dinamike vozila, gdje se sila preslikava iz brzine vozila na brzinu vratila preko polumjera kotača.



Slika 9 Uzdužna dinamika vozila [13]

3.2.1. Jednadžbe uzdužne dinamike

Potrebna vozna sila koja pokreće vozilo može se odrediti iz uzdužne dinamike gibanja (Slika 9). To je sila koja mora savladati sve otpore koji djeluju na vozilo kako bi se osigurala određena potrebna akceleracija ili zadržavanje postojeće brzine. Prema tome sila se može računati prema:

$$F_{pogon} = F_{zrak} + F_{kotr} + F_{uzbrdica} + F_{inercija} \quad (1)$$

Gdje je F_{zrak} sila otpora zraka, F_{kotr} sila otpora kotrljanja, $F_{uzbrdica}$ sila koja nastaje zbog utjecaja gravitacije kod nagiba te $F_{inercija}$ sila koja nastaje zbog inercije kod akceleracije vozila.

Sila otpora zraka F_{zrak} raste kvadratno s povećanjem brzine vozila i ovisi o aerodinamičkim svojstvima vozila. Sila otpora zraka se računa prema sljedećem izrazu:

$$F_{zrak} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Gdje je ρ gustoća zraka (oko 1,225 kg/m³ pri standardnim uvjetima), C_d koeficijent otpora zraka (karakteristika vozila koja ovisi o njegovom obliku, za ovo vozilo iznosi 0.31), A frontalna površina vozila u m² (za ovaj slučaj iznosi 2,6 m²) te je v brzina vozila u m/s.

Sila otpora kotrljanja F_{kotr} je sila koja djeluje između kotača vozila i ceste zbog deformacija guma i ceste. Ova sila o masi vozila, a izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$F_{kotr} = C_r \cdot m \cdot g \quad (3)$$

Gdje je C_r koeficijent otpora kotrljanja (za asfalt iznosi 0,013), m je masa vozila te g ubrzanje gravitacije (9,81 m/s²). Koeficijent kotrljanja ovisi o karakteristikama guma i ceste, a otpor kotrljanja uglavnom se povećava s težinom vozila.

Inercijska sila $F_{inercija}$ djeluje na vozilo kada mijenja brzinu, tj. ubrzava ili usporava. Ova sila ovisi o masi vozila i njegovom ubrzanju (ili usporavanju):

$$F_{inercija} = m \cdot a \quad (4)$$

Ako vozilo vozi uz nagib (uzbrdica ili nizbrdica), dolazi do dodatne sile $F_{uzbrdica}$ koja može pomoći ili otežati vožnju. Ova sila je posljedica gravitacije i ovisi o kutu nagiba ceste (θ):

$$F_{uzbrdica} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

Za pozitivni nagib (uzbrdicu), ova sila djeluje u suprotnom smjeru od kretanja, a za negativni nagib (nizbrdicu), ona pomaže kretanju vozila.

3.2.2. Kinematske jednadžbe

Nakon izračuna ukupne pogonske sile ona se mora preslikati u potrebni pogonski moment i brzinu na izlaznom vratilu koristeći polumjer kotača i prijenosne omjere. Naime, moment na kotaču (T_{kotac}) i brzina vrtnje vratila ($\omega_{vratilo}$) mogu se dobiti pomoću:

$$T_{vratilo} = \frac{F_{pogon} \cdot r_{kotac}}{\eta} \quad (6)$$

Gdje je $T_{vratilo}$ okretni moment na vratilu, r_{kotac} je polumjer kotača, a η je učinkovitost prijenosnog sustava.

Brzina vrtnje vratila ($\omega_{vratilo}$) povezana je s brzinom vozila (v) prema sljedećoj jednadžbi:

$$\omega_{vratilo} = \frac{v}{r_{kotac}} \quad (7)$$

Ove jednadžbe omogućuju konverziju između translacijskog gibanja vozila (brzina vozila) i rotacijskog gibanja pogonskog sustava (brzina vrtnje vratila).

Ukupnu pogonsku snagu potrebnu za pokretanje vozila računamo kao umnožak brzine vozila i pogonske sile:

$$P_{pogonska} = F_{pogon} \cdot v \quad (8)$$

Ova snaga mora biti osigurana kombinacijom snage elektromotora i motora s unutarnjim izgaranjem, ovisno o logici upravljanja hibridnog sustava.

3.3. Statički modeli strojeva

Ovi modeli omogućuju izračunavanje trenutne snage, potrošnje goriva i stanja napunjenosti baterije (SOC), uzimajući u obzir gubitke u sustavu. Imaju različite funkcije, ali zajedno omogućuju hibridnom sustavu da optimizira potrošnju goriva, performanse i regeneraciju energije.

Ovaj model uključuje pojednostavljene prikaze:

- motora s unutarnjim izgaranjem (ICE)
- generatora (M/G1)
- pogonskog elektromotora (M/G2)
- baterije

3.3.1. Motor s unutarnjim izgaranjem (ICE)

Motor s unutarnjim izgaranjem služi kao primarni izvor mehaničke snage u automobilima. U hibridnom sustavu ICE igra ključnu ulogu, ne samo kao izvor pogonske snage, već i kao izvor energije za punjenje baterije putem generatora (M/G1). On radi kada je potrebna veća snaga, kada je stanje napunjenosti baterije nisko, ili kada elektromotor nije u stanju zadovoljiti energetske zahtjeve vozila. Model ICE-a temelji se na jednostavnom proračunu snage i potrošnje goriva, uzimajući u obzir učinak motora.

- **Učinkovitost motora s unutarnjim izgaranjem (η_{ICE}):** Za simulaciju, pretpostavljamo konstantnu učinkovitost od 40%, što znači da se samo 40% energije iz goriva koristi za proizvodnju korisne mehaničke energije, dok se ostatak gubi u obliku topline i ostalih gubitaka.
- **Snage motora:** Snaga koju isporučuje ICE izračunava se pomoću momenta i brzine vrtnje izlaznog vratila:

$$P_{ICE} = \frac{T_{vratilo} \cdot \omega_{vratilo}}{\eta_{ICE}} \quad (9)$$

- **Potrošnja goriva:** Potrošnja goriva se računa na temelju snage koju motor isporučuje, te je povezana s donjom ogrjevnom vrijednošću goriva (H_d) i masom goriva koje se troši u jedinici vremena. Izračun potrošnje goriva koristi se za praćenje koliko goriva je potrošeno tijekom simulacije:

$$m_{gorivo} = \frac{P_{ICE} \cdot \Delta t}{\eta_{ICE} \cdot H_d} \quad (10)$$

Gdje je m_{gorivo} masa potrošenog goriva, H_d je donja ogrjevna vrijednost goriva (47 MJ/kg), Δt je vremenski korak simulacije.

3.3.2. Generator (M/G1)

Generator (M/G1) je električni stroj koji pretvara mehaničku energiju iz ICE-a u električnu energiju za punjenje baterije i za opskrbu pogonskog elektromotora (M/G2). M/G1 primarno radi kao generator, ali može također povremeno preuzeti ulogu elektromotora u specifičnim situacijama, poput pokretanja motora s unutarnjim izgaranjem [13].

- **Učinkovitost generatora (η_{MG1}):** Pretpostavlja se da učinkovitost generatora iznosi oko 90%. Ovo uključuje gubitke u konverziji mehaničke energije iz ICE-a u električnu energiju.
- **Snaga generatora M/G1:** Kada M/G1 radi kao generator, snaga koju proizvodi određuje se prema mehaničkoj snazi isporučenoj iz ICE-a:

$$P_{MG1} = \eta_{MG1} \cdot P_{ICE} \quad (11)$$

3.3.3. Pogonski elektromotor (M/G2)

Pogonski elektromotor (M/G2) isporučuje snagu kotačima, s pomoći ili bez pomoći motora s unutarnjim izgaranjem (ICE). Koristi energiju iz baterije za pogon vozila, a također može raditi kao generator pri regenerativnom kočenju, vraćajući energiju natrag u bateriju [13].

- **Učinkovitost elektromotora (η_{MG2}):** Učinkovitost M/G2 je oko 90%, što znači da 90% energije iz baterije koristi za stvaranje mehaničke energije, dok se preostalih 10% gubi kao toplina.
- **Snaga pogonskog elektromotora M/G2:** Kada pokreće vozilo, snaga se izračunava na temelju izlaznog momenta i brzine vrtnje vratila:

$$P_{MG2} = \frac{T_{vratilo} \cdot \omega_{vratilo}}{\eta_{MG2}} \quad (12)$$

Ova snaga dolazi iz baterije, a SOC se smanjuje ovisno o energiji koju M/G2 troši:

$$SOC = SOC - \frac{P_{MG2} \cdot \Delta t}{kapacite_bat \cdot 3600} \quad (13)$$

- **Regenerativno kočenje:** Kada vozilo koči, M/G2 preuzima ulogu generatora, pretvarajući kinetičku energiju vozila u električnu energiju koja se pohranjuje u bateriji. Snaga generirana regenerativnim kočenjem P_{regen} računa se isto kao i snaga pogonskog elektromotora P_{MG2} .

Baterija pohranjuje energiju dobivenu iz regenerativnog kočenja i rada generatora (M/G1), a koristi je za napajanje pogonskog elektromotora (M/G2) u električnom režimu rada.

- **Kapacitet baterije:** Baterija ima kapacitet od 4,08 Ah pri nominalnom naponu od 600V, što daje ukupni kapacitet od **2,448 kWh**
- **Stanje napunjenosti (SOC):** Stanje napunjenosti baterije prati se tijekom vožnje. *SOC* se smanjuje kada M/G2 koristi energiju za pogon vozila, a povećava se kada M/G1 ili regenerativno kočenje puni bateriju
- **Model baterije:**

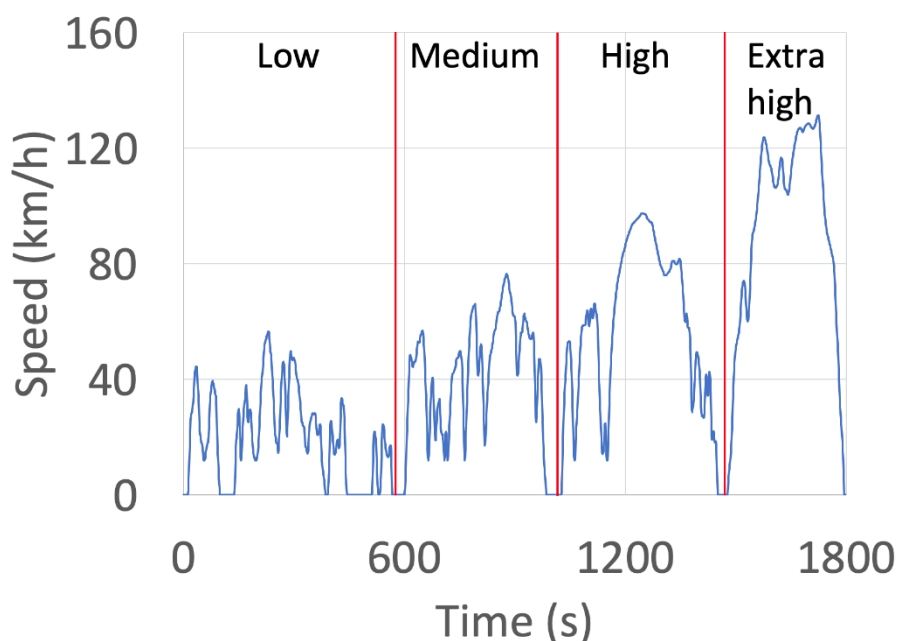
$$SOC = SOC + \frac{(P_{MG1} - P_{MG2}) \cdot \Delta t}{kapacite_bat \cdot 3600} \quad (14)$$

4. SIMULACIJA MODELA

U ovom poglavlju opisuje se simulacija kvazistatičkog modela hibridnog pogonskog sustava pomoću programa MATLAB. Simulacija je provedena korištenjem WLTP voznog ciklusa, pri čemu su analizirani potrošnja goriva, stanje napunjenosti baterije (SOC), te ukupno ponašanje vozila u različitim uvjetima vožnje. Model integrira rad elektromotora, motora s unutarnjim izgaranjem (ICE), baterije i regenerativnog kočenja kako bi se omogućila realistična simulacija hibridnog vozila.

4.1. WLTP vozni ciklus

WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) je globalno standardizirani testni ciklus koji se koristi za procjenu performansi i emisija vozila u uvjetima vožnje koji simuliraju stvarne prometne situacije. WLTP je razvijen kako bi zamijenio prethodni testni ciklus NEDC (New European Driving Cycle) jer pruža preciznije i realističnije rezultate potrošnje goriva i emisija u usporedbi s laboratorijskim uvjetima koji su često daleko od stvarne vožnje. WLTP test obuhvaća različite scenarije vožnje koji se razlikuju po brzinama, akceleracijama, opterećenju vozila, te simulira različite uvjete vožnje (urbana vožnja, vožnja po otvorenoj cesti, autoput) [15].



Slika 10 Brzinski profil vozila tijekom WLTP testnog ciklusa [15]

Ciklus WLTP podijeljen je u četiri faze:

- **Niska brzina (Low):** Simulira vožnju u gradskim uvjetima s čestim zaustavljanjima i niskim ubrzanjem
- **Srednja brzina (Medium):** Simulira vožnju u uvjetima vožnje po otvorenoj cesti s umjerenim ubrzanjem
- **Visoka brzina (High):** Odražava vožnju po otvorenoj cesti s većim brzinama i ubrzanjima
- **Vrlo visoka brzina (Extra-High):** Simulira vožnju na autoputu pri visokim brzinama i zahtjevnim ubrzanjima

Svaka od ovih faza obuhvaća različite aspekte vožnje, uključujući zaustavljanje, kretanje, ubrzanje, usporavanje, a sve u svrhu bolje procjene stvarne potrošnje goriva i emisija vozila.

4.2. Logika upravljanja

Logika upravljanja hibridnog pogonskog sustava ključna je za optimizaciju potrošnje goriva i korištenje električne energije. Upravljački algoritam koristi različite parametre, poput brzine vozila, stanja napunjenosti baterije (SOC) i ubrzanja, kako bi odlučio kada će se koristiti elektromotor (MG2), motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) ili oboje. Cilj je omogućiti maksimalnu učinkovitost pogonskog sustava i smanjiti emisije, uz održavanje željenih performansi vozila.

Uvjeti vožnje i prebacivanje između pogona:

1. Punjenje baterije tijekom mirovanja vozila:

Kada je brzina vozila jednaka 0 km/h i stanje napunjenosti baterije (SOC) je manje od 50%, koristi se motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) za punjenje baterije. Ovo omogućuje vožnju bez emisija i učinkovito korištenje energije iz baterije, što je idealno za gradske uvjete s čestim zaustavljanjima i polascima. Ovaj način rada pomaže u održavanju optimalne razine napunjenosti akumulatora, posebice tijekom stajanja na duljim vremenskim intervalima.

2. **Potpuno električna vožnja:**

Vožnja na električni pogon koristi se pri malim brzinama, obično u gradskim uvjetima kada brzina vozila ne prelazi 46 km/h te kod parkiranja. U ovom režimu, vozilo koristi električnu energiju pohranjenu u bateriji koja se preko pogonskog elektromotora (M/G2) pretvara u mehanički moment za pogon vozila. Ovaj način rada je najefikasniji kada je razina napunjenosti akumulatora visoka i ne zahtijeva potrošnju goriva.

3. **Regenerativno kočenje:**

Aktivira se kada vozilo usporava (negativno ubrzanje). Tijekom kočenja, kinetička energija vozila pretvara se u električnu energiju pomoću pogonskog elektromotora (M/G2), koji tada djeluje kao generator. Ta energija se pohranjuje u akumulator, povećavajući njegovu napunjenost. Ova funkcija je ključna u hibridnim sustavima jer omogućuje vraćanje dijela energije koja bi se inače izgubila u toplinu prilikom kočenja, čime se povećava ukupna energetska učinkovitost sustava.

4. **Nominalna vožnja:**

Ovaj način rada koristi se kada vožnja na električni pogon nije moguća zbog velike brzine vozila ili niske razine napunjenosti baterije. U tom slučaju, motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) pruža dovoljno snage za pogon vozila. Ovaj način rada omogućava kontinuiranu vožnju pri većim brzinama bez prekida.

5. **Pomoć pri velikom ubrzavanju:**

Ovaj način rada aktivira se kada je vozilu potrebna dodatna snaga, primjerice prilikom naglog ubrzanja. Ako motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) ne može samostalno isporučiti dovoljnu snagu, dodatna energija crpi se iz akumulatora. Pogonski elektromotor (M/G2) pruža dodatnu pomoć, omogućavajući vozilu brže ubrzanje i veću snagu u kratkim vremenskim razdobljima [16].

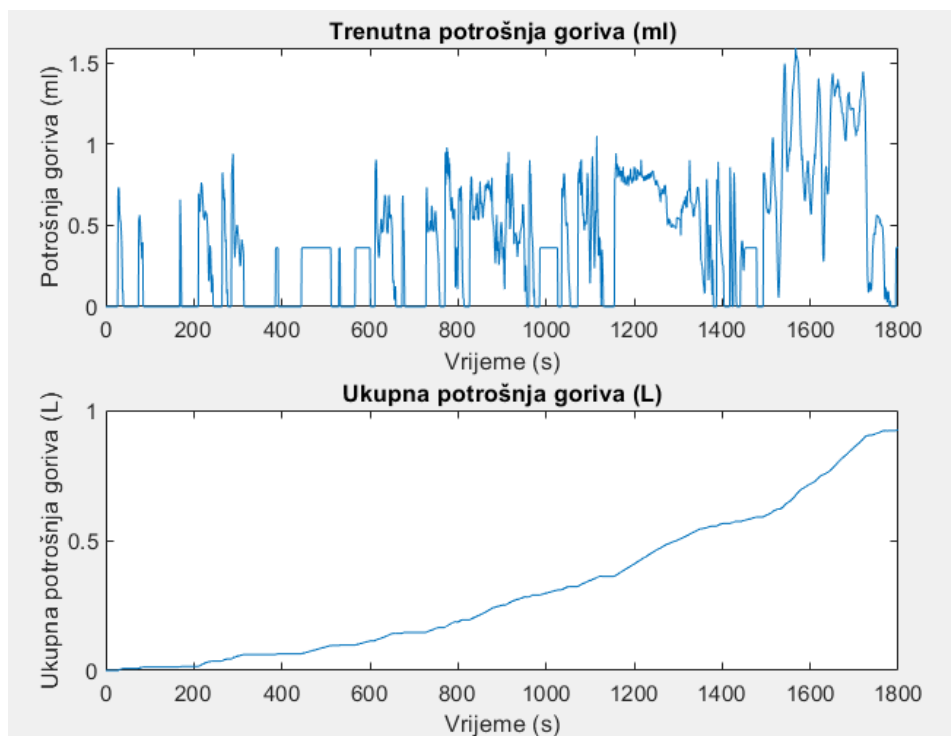
4.3. Rezultati simulacije

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije hibridnog vozila temeljeni na WLTP voznom ciklusu, koja je izvedena pomoću programa MATLAB te koji je korišten za modeliranje i simulaciju dinamike vozila, kao i za crtanje dijagrama ključnih parametara poput brzine vozila, potrošnje goriva i stanja napunjenosti baterije (SOC). U nastavku su detaljno opisani rezultati simulacije, zajedno s grafičkim prikazima ključnih parametara.

4.4. Potrošnja goriva

Na slici 11 dani su grafovi trenutne i ukupne potrošnje goriva u vremenu na 100 prijeđenih kilometara. Prosječna potrošnja goriva iznosila je **3,98 L/100 km**. Ovaj rezultat ukazuje na izuzetno efikasnu potrošnju goriva, što je tipično za hibridne sustave koji kombiniraju rad ICE-a i elektromotora za optimalno upravljanje energijom.

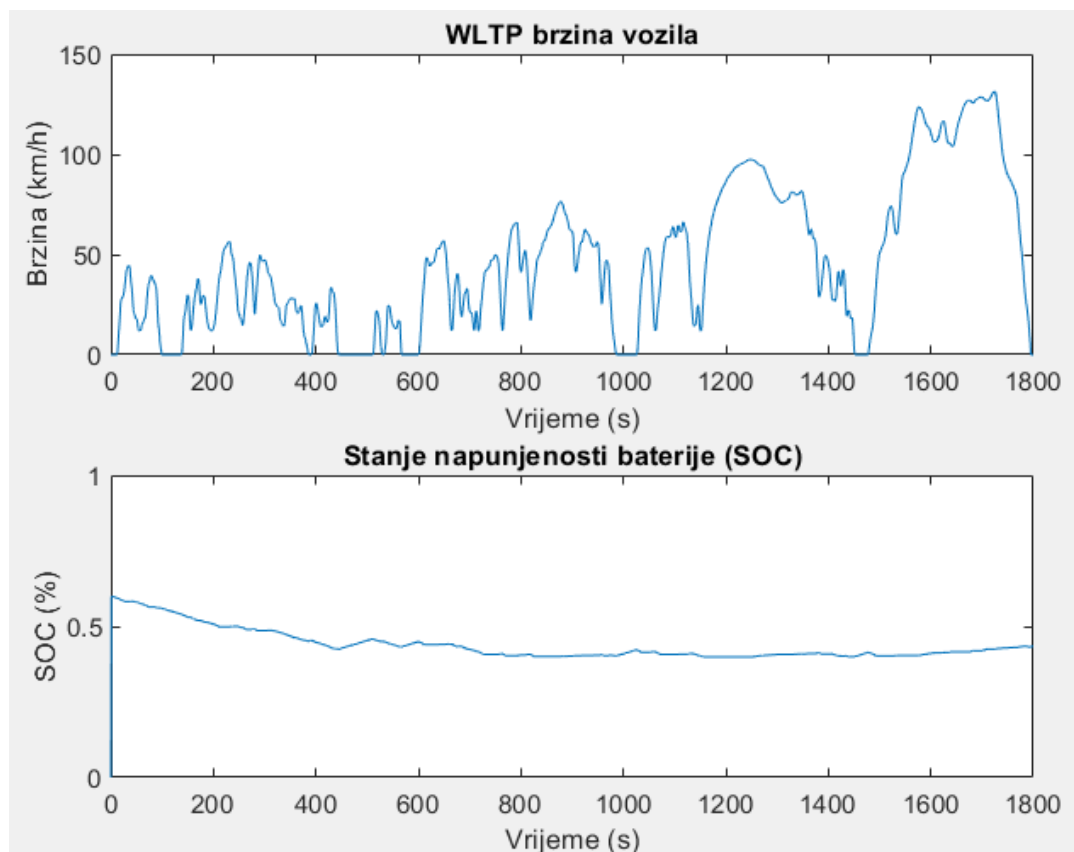
U službenoj Toyotinoj dokumentaciji [11] navedena potrošnja je u intervalu 3,75 – 4,25 L/100 km što se poklapa s rezultatima simulacije.



Slika 11 Trenutna i ukupna potrošnja goriva

4.5. Stanje napunjenosti baterije (SOC)

SOC (State of Charge) je jedan od najvažnijih parametara koji određuje koliko je energije dostupno iz baterije za pokretanje elektromotora. Tokom simulacije, SOC se postepeno smanjivao kako se energija iz baterije koristila za pogon vozila (**Slika 12**). Međutim, regenerativno kočenje omogućilo je vraćanje dijela energije natrag u bateriju, što je omogućilo dulji rad elektromotora.

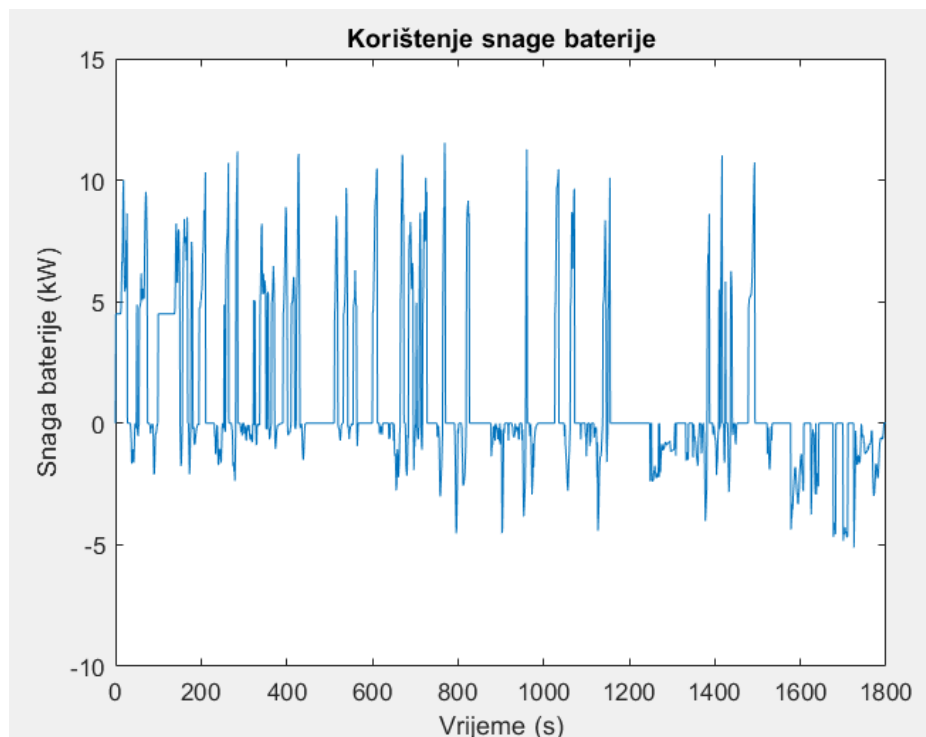


Slika 12 Stanje napunjenosti baterije

Vidljivo je kako SOC opada uz male oscilacije zbog regeneracije tijekom kočenja. Također možemo vidjeti kako više opada na prvoj trećini voznog ciklusa zbog manjih brzina u gradu te učestalijih stajanja.

4.6. Korištenje snage baterije i elektromotora

Na **slici 13** je prikazana snaga baterije koja varira. Pozitivne vrijednosti predstavljaju ubrzanja, a negativne regenerativno kočenje gdje se snaga vraća u bateriju. Jedna od glavnih prednosti hibridnih vozila je mogućnost korištenja električne energije iz baterije, čime se smanjuje potreba za korištenjem motora s unutarnjim izgaranjem (ICE). Tokom simulacije, praćena je snaga pogonskog elektromotora MG2, kao i količina energije koja se troši ili regenerira kroz bateriju.

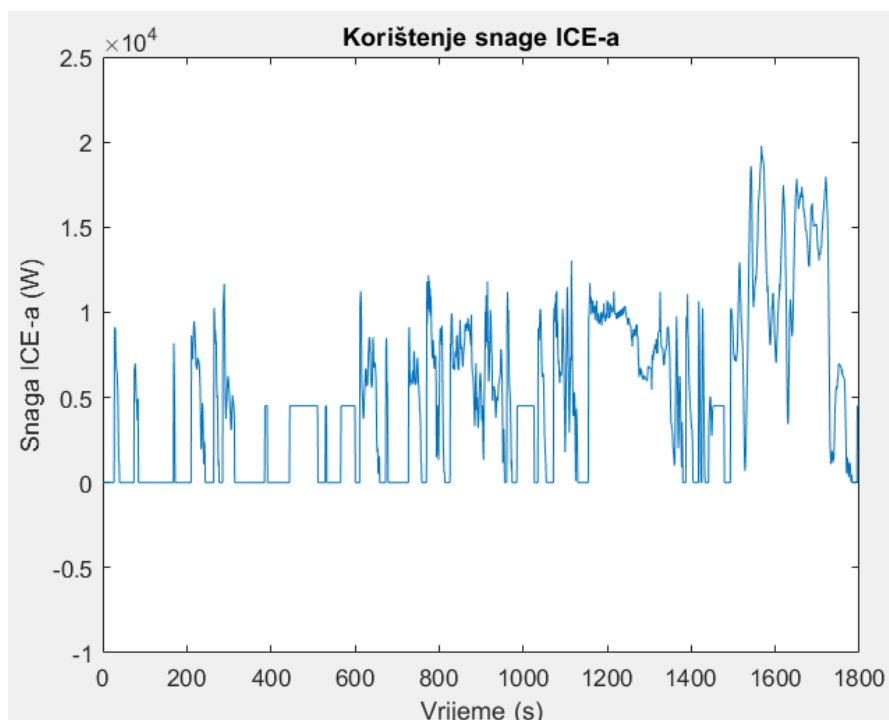


Slika 13 Korištenje snage baterije

Graf jasno pokazuje dinamiku korištenja baterije za pogon vozila, kao i povremeno regenerativno kočenje, koje omogućuje povrat energije natrag u bateriju. Ovaj povrat energije događa se kada vozilo koči ili usporava, omogućujući bateriji da se djelomično napuni.

4.7. Korištenje snage motora s unutarnjim izgaranjem

Na **slici 15** prikazano je kako potrebna snaga ICE motora oscilira varira u vremenu intervala voznog ciklusa. Motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) se aktivira prema potrebi, čime se optimizira potrošnja goriva i smanjuje emisija štetnih plinova. U hibridnom sustavu ICE se uključuje kada je SOC (stanje napunjenosti baterije) nizak ili kada elektromotor ne može zadovoljiti energetske potrebe vozila.



Slika 14 Korištenje snage ICE-a

U simulaciji, snaga ICE-a je varirala ovisno o uvjetima vožnje. Vidljivo je da ICE preuzima veću ulogu pri višim brzinama i opterećenjima, dok se pri nižim brzinama koristi uglavnom elektromotor.

4.8. Ekonomska isplativost hibridnih vozila

Kao početna točka, važno je uzeti u obzir razliku u cijeni kupnje između hibridne i benzinske verzije automobila. Prema tržišnim podacima, cijena hibridne Toyote Corolle u Hrvatskoj je približno **32.000 EUR**, dok cijena benzinske verzije iznosi oko **26.000 EUR** [17]. Razlika u cijeni iznosi **6.000 EUR** u korist benzinske verzije, što predstavlja dodatnu investiciju prilikom kupnje hibrida. Jedna od najvećih prednosti hibridnog vozila je smanjena potrošnja goriva. Kao što je ranije spomenuto, hibridna verzija troši **3,98 L/100 km**, a benzinska verzija troši oko **6,5 L/100 km** [18]. Pretpostavimo da vozač godišnje pređe 15.000 km, što je uobičajena godišnja kilometraža. Na temelju te kilometraže, možemo izračunati godišnju potrošnju goriva i trošak za oba modela.

- Hibridna Toyota Corolla:
 - Godišnja potrošnja goriva = $(15.000 \text{ km} / 100) * 3,98 \text{ L}/100 \text{ km} = \mathbf{598,17 \text{ L}}$
 - Uz prosječnu cijenu goriva od **1,50 EUR/L**, godišnji trošak goriva za hibridnu verziju iznosi: $598,17 \text{ L} * 1,50 \text{ EUR/L} = 897,26 \text{ EUR}$
- Benzinska Toyota Corolla:
 - Godišnja potrošnja goriva = $(15.000 \text{ km} / 100) * 6,5 \text{ L}/100 \text{ km} = \mathbf{975 \text{ L}}$
 - Uz istu cijenu goriva od **1,50 EUR/L**, godišnji trošak goriva za benzinsku verziju iznosi: $975 \text{ L} * 1,50 \text{ EUR/L} = 1.462,50 \text{ EUR}$

Hibridni automobili obično imaju **niže troškove održavanja** u usporedbi s konvencionalnim vozilima s unutarnjim izgaranjem. To je dijelom zbog toga što motor s unutarnjim izgaranjem u hibridnom vozilu radi manje vremena i pod manjim opterećenjem, što smanjuje trošenje i produžuje vijek trajanja ključnih komponenti. Osim toga, regenerativno kočenje smanjuje trošenje kočionih pločica i diskova. Procjenjuje se da hibridna vozila mogu uštedjeti između 10-20% na održavanju u usporedbi s benzinskim vozilima. Ako uzmemo konzervativnu procjenu od **10% nižih troškova održavanja**, dodatna godišnja ušteda može iznositi približno **100-150 EUR**.

Dakle, hibridni model uštedi **565,24 EUR godišnje** na troškovima goriva te **100 EUR** na nižim troškovima održavanja. Da bi vlasnik hibridne verzije uštedio na gorivu onu vrijednost koju je platio više trebao bi auto voziti nešto **više od 9 godina**.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je hibridni pogon vozila te su analizirane njegove inačice, uključujući serijske, paralelne i serijsko-paralelne konfiguracije. Detaljno je opisana četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije, koja donosi niz unapređenja u odnosu na prethodne verzije. Tehnologija uključuje optimizirani e-CVT sustav, poboljšanu upravljačku logiku te smanjenje energetske gubitaka u cijelom sustavu. Unapređenja omogućuju povećanu iskoristivost baterije i poboljšanje u kombinaciji ICE-a i elektromotora, što rezultira nižom potrošnjom goriva i manjom emisijom štetnih plinova. U radu je napravljen kvazistatički model pogona pomoću kojeg su provedene simulacije u računalnom programu Matlab na certificiranom WLTP voznom ciklusu, koji simulira uvjete vožnje u urbanim i izvangradskim područjima, kao i vožnju na autocesti. Rezultati simulacije su pokazali prosječnu potrošnju goriva od 3,98 L/100 km, uz stabilno održavanje stanja napunjenosti baterije (SOC) zahvaljujući regenerativnom kočenju i korištenju elektromotora pri nižim brzinama. Na temelju dobivenih rezultata, može se zaključiti da četvrta generacija Toyotine hibridne tehnologije donosi značajne prednosti u pogledu učinkovitosti i smanjenja potrošnje goriva i smanjuje ukupne troškove vožnje. Ipak, zbog veće početne cijene hibridnog modela, kako bi vlasnik hibridne verzije postigao iste ukupne troškove goriva kao kupac benzinske verzije, potrebno je voziti hibridni model nešto više od 9 godina. Tek tada se početna razlika u cijeni kompenzira kroz uštede na gorivu i održavanju. Zaključno, rezultati potvrđuju da Toyotina hibridna tehnologija, uz dugoročnu isplativost, značajno doprinosi smanjenju potrošnje goriva i emisija, čineći hibridna vozila važnim korakom prema održivijem transportu.

LITERATURA

- [1] „Hibridni pogon“;
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/hibridni-pogon> 19.08.2024.
- [2] „Toyota's hybrid success story“;
<https://media.toyota.co.uk/toyotas-hybrid-success-story/> 20.08.2024.
- [3] „Gamechanger: how Ferdinand Porsche designed the first-ever hybrid car“;
<https://www.porsche.com/stories/innovation/gamechanger-how-ferdinand-porsche-designed-first-hybrid-car/> 21.08.2024.
- [4] Joaquin Kurz: „Hybrid Electric Vehicles: A History of Technological Innovation“;
<https://illumin.usc.edu/hybrid-electric-vehicles-a-history-of-technological-innovation/>
21.08.2024.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_AA
- [6] Chan, C. C. : "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles." Proceedings of the IEEE 2007, 95(4), 704-718.
- [7] „Hybrid electric vehicle HEV“;
<https://x-engineer.org/hybrid-electric-vehicle-hev/> 22.08.2024.
- [8] <https://www.venturatoyota.com/new-toyota-corolla-se-ventura-ca/>
- [9] „Types of Hybrid Cars“;
<https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/types-of-hybrid-cars> 23.08.2024.
- [10] "Toyota introduces advanced technologies for the fourth generation Prius";
<https://newsroom.toyota.eu/2019-toyota-introduces-advanced-technologies-for-the-fourth-generation-prius/>, 24.08.2024.
- [11] <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/230214M-Corolla-Tech-Spec.pdf>
- [12] Alessandro Casavola, Gianfranco Gagliardi, Walter Nesci, Giovanni Prodi: " A quasi-static simulation tool for the design and optimization of hybrid powertrains";
https://www.researchgate.net/publication/258286462_A_quasi-static_simulation_tool_for_the_design_and_optimization_of_hybrid_powertrains
25.08.2024.
- [13] S.M.H.S. Omar, N.M. Arshad, I.M. Yassin, M.H.A.M. Fakharuzi; „Design and optimization of powertrain system for prototype fuel cell electric vehicle“;
https://www.researchgate.net/publication/282709824_Design_and_optimization_of_powertrain_system_for_prototype_fuel_cell_electric_vehicle 25.08.2024.

- [14] Pete Meiner : „Prius synergy“;
<https://www.fenderbender.com/running-a-shop/operations/article/33024885/prius-synergy> 26.08.2024.
- [15] „International: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)“;
<https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-wltp/> 28.08.2024.
- [16] Mihael Cipek: „ Usporedba različitih struktura hibridnih vozila“:
Diplomski rad, 07.02.2009.
- [17] <https://www.toyota.hr/new-cars/pricelists-catalogues> 29.08.2024
- [18] <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/230214M-Corolla-Tech-Spec.pdf> 29.08.2024.

PRILOZI