

Utjecaj mase baterije na vozna svojstva električnog vozila

Pliško, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:531764>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Pliško

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mihael Cipek, dipl. Ing

Student:

Ivan Pliško

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Mihaelu Cipeku na pruženom vremenu, pomoći i savjetima kod pisanja ovog rada. Iskreno cijenim njegovo zalaganje i trud koji je pokazao za mene. Također bih se zahvalio svojim roditeljima, sestri, djevojci i prijateljima koji su mi bili konstantna podrška tokom studiranja, bez njih ne bih bio ovdje gdje jesam. Hvala vam na svemu.

Ivan Pliško



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: **Ivan Pliško** JMBAG: **0069090982**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj mase baterije na vozna svojstva električnog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The impact of battery weight on driving characteristics of an electric vehicle**

Opis zadatka:

Masa baterije ovisi o modelu električnog vozila te uvelike utječe na njegovu ukupnu težinu. U prosjeku baterija teži negdje oko 400 kg, iako kod nekih modela može težiti i do 900 kg. U pravilu, teža baterija odgovara većem kapacitetu pa omogućuje više energije za ostvarivanje većeg dometa vožnje, ali u isto vrijeme dodatna težina također zahtijeva veće snage za ubrzanje vozila. Koristeći dosadašnja saznanja i računalno modeliranje potrebno je odrediti zakonitosti utjecaja mase baterije na vozna svojstva električnog vozila po pitanju dometa i ubrzanja. U zadatku je potrebno:

- iz javno dostupnih podataka napraviti pregled električnih vozila dostupnih na tržištu
- za navedena vozila izdvojiti domet, nosivost, masu praznog vozila te masu baterije
- izraditi jednostavan kvazistatički skalabilni računalni model električnog vozila
- koristeći certificiran vozni ciklus provesti računalne simulacije električnih vozila različitih nosivosti i različitih masa baterija
- na temelju rezultata dati zakonitosti utjecaja mase na vozna svojstva i 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	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Kratka povijest električnih vozila	1
1.2. Vrste električnih vozila	3
1.3. Pogon i struktura električnih vozila	4
1.3.1. Električni motor	5
1.3.2. Baterija.....	6
2. Pregled električnih vozila na tržištu	8
2.1. Kompaktna i gradska vozila.....	8
2.2. Kompaktna sportska terenska vozila.....	9
2.3. Srednje velika sportska terenska vozila	10
2.4. Limuzine	11
2.5. Terenci	11
3. Jednostavan kvazistatički skalabilni računalni model električnog vozila	13
3.1. Uzdužna dinamika vozila.....	13
3.1.1. Sila kotrljanja	13
3.1.2. Sila inercije	14
3.1.3. Sila aerodinamičkog otpora	14
3.1.4. Sila pogona, moment i snaga	14
3.2. WLTP ciklus	15
3.3. Računalni model električnog vozila u Simulink-u.....	16
3.3.1. Podmodel WLTP	18
3.3.2. Podmodel Otpor kotrljanja.....	18
3.3.3. Podmodel Inercija	19
3.3.4. Podmodel Aerodinamički otpor.....	19
3.3.5. Zbrajanje sila, izračun snage i model baterije.....	20
4. Simulacijski rezultati kategorija električnih vozila	21
4.1. Kompaktna i gradska vozila.....	21
4.2. Kompaktna sportska terenska vozila.....	23
4.3. Srednje velika sportska terenska vozila	26
4.4. Limuzine	28
4.5. Terenci	31
5. Utjecaj mase baterije na nosivost električnog vozila.....	34

5.1. Jedinični kapaciteti baterija.....	34
5.2. Simulacijski rezultati vozila sa različitim kapacitetima baterije.....	35
5.2.1. Domet i nosivost kompaktnih i gradskih vozila sa različitim kapacitetima baterije.....	35
5.2.2. Domet i nosivost kompaktnih sportskih terenskih vozila sa različitim kapacitetima baterije	36
5.2.3. Domet i nosivost srednje velikih sportskih terenskih vozila sa različitim kapacitetima baterije	36
5.2.4. Domet i nosivost limuzina sa različitim kapacitetima baterije	37
5.2.5. Domet i nosivost terenaca sa različitim kapacitetima baterije.....	38
6. Diskusija rezultata simulacija	39
7. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1. Prvo električno vozilo [4]	2
Slika 2. Toyota Prius [12]	3
Slika 3. Shematski prikaz pogona EV-a [16]	4
Slika 4. Izgled električnog motora [18].....	5
Slika 5. Građa Audi-a Q4 50 e-tron quattro [20]	6
Slika 6. Prikaz litij-ionske baterije [24]	7
Slika 7. Renault Zoe [26]	8
Slika 8. Hyundai Kona Electric [30]	9
Slika 9. Tesla Model Y [32]	10
Slika 10. Tesla Model 3 [39].....	11
Slika 11. Ford F-150 Lightning [43]	12
Slika 12. Sile koje djeluju na vozilo.....	13
Slika 13. Primjer WLTP ciklusa sa označenim fazama [45].....	15
Slika 14. Računalni model u Simulink-u	17
Slika 15. Podmodel WLTP.....	18
Slika 16. Podmodel Otpor kotrljanja.....	18
Slika 17. Podmodel Inercija	19
Slika 18. Podmodel Aerodinamički otpor	19
Slika 19. Zbrajanje sila, izračun snage i model baterije.....	20
Slika 20. Sile otpora kompaktnih i gradskih vozila	21
Slika 21. Sila pogona kompaktnih i gradskih vozila.....	22
Slika 22. Moment, brzina vrtnje i snaga kompaktnih i gradskih vozila.....	22
Slika 23. Brzina, domet i potrošena energija baterije kompaktnih i gradskih vozila.....	23
Slika 24. Sile otpora kompaktnih SUV-ova	24
Slika 25. Sila pogona kompaktnih SUV-ova	24
Slika 26. Moment, brzina vrtnje i snaga kompaktnih SUV-ova	25
Slika 27. Brzina, domet i potrošena energija baterije kompaktnih SUV-ova	25
Slika 28. Sile otpora srednje velikih SUV-ova	26
Slika 29. Sila pogona srednje velikih SUV-ova.....	27
Slika 30. Moment, brzina vrtnje i snaga srednje velikih SUV-ova.....	27
Slika 31. Brzina, domet i potrošena energija baterije srednje velikih SUV-ova.....	28
Slika 32. Sile otpora limuzine	29
Slika 33. Sila pogona limuzine.....	29
Slika 34. Moment, brzina vrtnje i snaga limuzine.....	30
Slika 35. Brzina, domet i potrošena energija baterije limuzina	30
Slika 36. Sile otpora terenaca	31
Slika 37. Sila pogona terenaca	32
Slika 38. Moment, brzina vrtnje i snaga terenaca	32
Slika 39. Brzina, domet i potrošena energija baterije terenaca	33
Slika 40. Domet i nosivost kompaktnih i gradskih vozila sa različitim kapacitetima baterija	35
Slika 41. Domet i nosivost kompaktnih SUV-ova sa različitim kapacitetima baterije	36
Slika 42. Domet i nosivost srednje velikih SUV-ova sa različitim kapacitetima baterije	37
Slika 43. Domet i nosivost limuzina sa različitim kapacitetima baterije	37
Slika 44. Domet i nosivost terenaca sa različitim kapacitetima baterije	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike određenih tipova baterije [23].....	7
Tablica 2. Specifikacije odabranih električnih vozila	12
Tablica 3. Jedinični kapaciteti baterija zajedno sa novim masama i kapacitetima baterija	34
Tablica 4. Rezultati simulacija	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
a	akceleracija	m/s^2
A_f	Prednja površina vozila	m^2
C_d	Koeficijent aerodinamičkog otpora	-
F_A	Sila aerodinamičkog otpora	N
F_I	Sila inercije	N
F_K	Sila kotrljanja	N
F_P	Sila pogona	N
g	Akceleracija slobodnog pada	m/s^2
m_V	Masa vozila	kg
P_P	Snaga pogona	W
r	Polumjer kotača	m
v/v_v	Brzina/brzina vozila	m/s
s	Put/domet	m
μ_K	Koeficijent trenja kotrljanja	-
ρ_{zrak}	Gustoća zraka	kg/m^3
τ_P	Moment elektromotora	Nm
ω_P	Kutna brzina pogona/kotača	Rad/s

SAŽETAK

Ovaj rad se bavi utjecajem mase baterije na vozna svojstva i nosivost električnog vozila. Odabrano je pet vozila različitih kategorija/klasa električnih vozila. Napravljen je pojednostavljeni kvazistatički skalabilni model električnog vozila u programskom okruženju Matlab Simulink. Pomoću modela su provedene računalne simulacije na certificiranom voznom ciklusu uz promjenjivi kapacitet i promjenjivu masu baterije.

Ključne riječi: električna vozila, vozna svojstva, nosivost, masa baterije, računalna simulacija

SUMMARY

This paper deals with the influence of the mass of the battery on the driving characteristics and load capacity of the electric vehicle. Five vehicles of different categories/classes of electric vehicles were selected. A simplified quasi-static scalable model of an electric vehicle was created in the Matlab Simulink programming environment. With the help of the model, computer simulations were carried out on a certified driving cycle with variable capacity and variable mass of the battery.

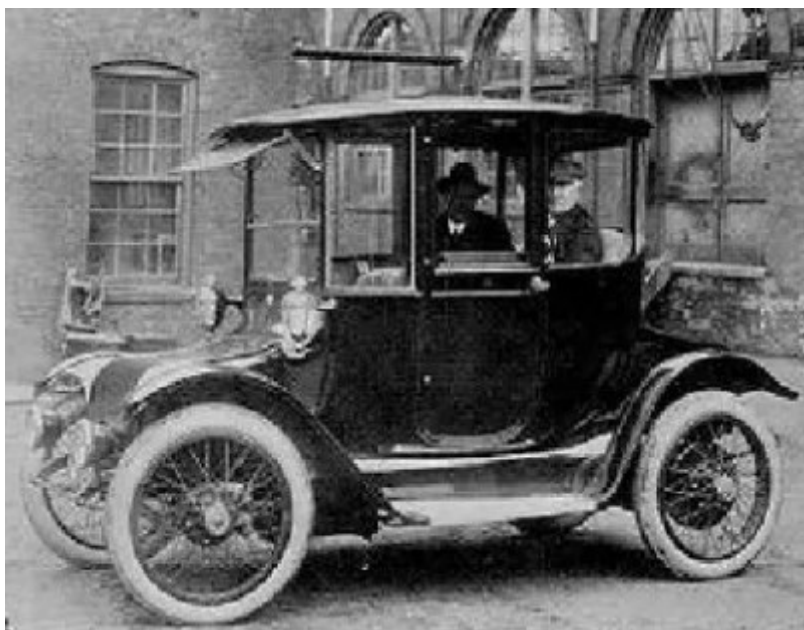
Keywords: electric vehicles, driving characteristics, payload, battery mass, computer simulation

1. UVOD

Električna vozila su u zadnje vrijeme sve popularniji izbor kod većine ljudi, zbog svojih prednosti poput snažnog ubrzanja, veće učinkovitosti pogona te ekološke prihvatljivosti [1]. Električna vozila (EV) sadrže baterije koje su relativno skupe, a što je baterijama kapacitet veći, veći je i njegov domet, ali je također veća i sama masa baterije. Ovaj rad istražuje zakonitost na koji način povećanje mase baterije utječe na domet i nosivost vozila. Domet, nosivost, masa praznog vozila i masa baterije u radu su preuzeti iz javno dostupnih podataka. Radi preglednosti, električna vozila su podijeljena u 5 kategorija: kompaktna i gradska, kompaktni SUV-ovi, srednje veliki SUV-ovi, limuzine i terenci. Za svaku kategoriju su izdvojeni gore navedeni podaci pomoću kojih su provedene računalne simulacije koristeći WLTP ciklus. Simulacije su provođene u Matlab-Simulink okruženju.

1.1. Kratka povijest električnih vozila

Povijest električnih vozila proteže se kroz više od stoljeća, obilježena nizom tehnoloških napredaka, padova i inovacija koje su oblikovale današnji automobilski svijet. Početkom 19. stoljeća, nekoliko pionira radilo je na razvoju prvih električnih vozila. Među njima, Robert Anderson iz Škotske oko 1832. godine konstruirao je prvo rudimentarno električno vozilo. Iako nije bilo praktično za svakodnevnu upotrebu, označilo je početak električne mobilnosti [2]. U drugoj polovici 19. stoljeća, Gaston Planté je 1859. godine izumio punjivu olovno-kiselinsku bateriju [3], čime je električna mobilnost postala praktičnija. Do kraja 19. stoljeća, William Morrison je 1891. godine konstruirao prvo praktično električno vozilo u SAD-u [4].



Slika 1. Prvo električno vozilo [4]

Električna vozila postala su izuzetno popularna krajem 1800-ih i početkom 1900-ih. Bili su jednostavni za upotrebu u usporedbi s parnim i benzinskim vozilima, tihi i nisu emitirali štetne plinove [5]. Henry Fordova masovna proizvodnja Modela T značajno je smanjila cijenu benzinskih automobila, čineći ih dostupnijima širem krugu ljudi [6]. Poboljšanje cestovne infrastrukture i povećana dostupnost benzina dodatno su pogodovali benzinskim vozilima. Tijekom 1960-ih i 1970-ih, rastuća svijest o zaštiti okoliša i naftne krize potaknule su ponovno zanimanje za električna vozila. Tvrtke poput General Motorsa eksperimentirale su s prototipovima električnih vozila, poput GM Electrovair i Electrovette [7], no nisu došli do masovne proizvodnje. 1990-ih godina, Kalifornijski odbor za zračne resurse uveo je regulacije koje su zahtijevale od proizvođača automobila proizvodnju vozila s nultom emisijom, što je dovelo do razvoja automobila poput GM EV1 koji je doveo nove ideje (neke se i danas koriste) u industriju električnih vozila [8]. Toyota Prius, lansirana 1997. godine, postala je prvi masovno proizvedeni hibridni električni automobil, premošćujući jaz između benzinske i električne energije [9]. Od 2000-ih godina, Tesla Motors, osnovan 2003. godine, revolucionizirao je tržište EV-a uvođenjem Roadstera 2008. godine, a kasnije i modela S, 3, X i Y [10]. Tesla je kombinirao dug domet, visoke performanse i atraktivan dizajn. Nissan Leaf, lansiran 2010. godine, postao je jedan od najprodavanijih električnih automobila na svijetu. Razne vlade širom svijeta počele su nuditi poticaje i subvencije za promicanje prihvaćanja EV-a [11]. Tehnološki

napreci, posebno u tehnologiji litij-ionskih baterija, omogućili su duži domet i smanjene troškove proizvodnje.



Slika 2. Toyota Prius [12]

Veliki proizvođači automobila poput General Motorsa, Forda i Volkswagena najavili su značajna ulaganja u razvoj električnih vozila. Mnoge zemlje postavile su ambiciozne ciljeve za postupno ukidanje vozila s unutarnjim izgaranjem u korist električnih vozila. Kontinuirana istraživanja u tehnologiji solid-state baterija, autonomnoj vožnji i infrastrukturi za punjenje obećavaju daljnji napredak.

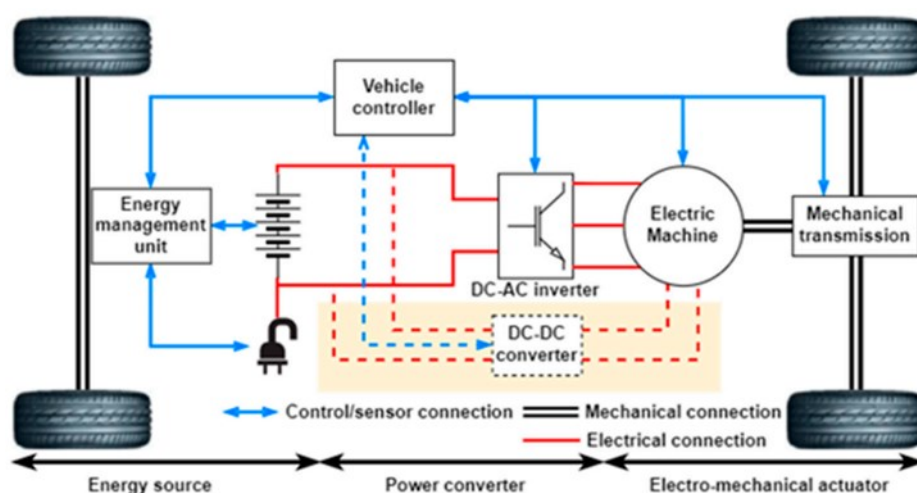
1.2. Vrste električnih vozila

U nastavku rada je dan kratak pregled kategorija električnih vozila. Prva kategorija su baterijska električna vozila (BEV), koja se u potpunosti oslanjaju na električnu energiju pohranjenu u baterijama za pogon. Ova vozila nemaju motor s unutarnjim izgaranjem, što znači da tijekom vožnje ne emitiraju štetne plinove. Popularni primjeri BEV-a uključuju Tesla Model S, Nissan Leaf i Chevrolet Bolt. Ova vozila mogu se jednostavno puniti kod kuće ili na javnim punionicama, a s razvojem tehnologije u pogledu većeg kapaciteta baterije, njihov domet postaje sve veći. Sljedeća kategorija su utična hibridna električna vozila (eng. Plug-in hybrid electric vehicles–PHEV). Ova vozila kombiniraju električni motor s baterijom i motor s unutarnjim izgaranjem. Baterija se može puniti putem vanjskog izvora struje, što omogućuje vožnju na električnu energiju na kraćim udaljenostima. Kada se baterija isprazni, motor s unutarnjim izgaranjem preuzima pogon. Primjeri uključuju Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in Hybrid i Mitsubishi Outlander PHEV. Zatim kategorija hibridnih električnih vozila (HEV) kod kojih se također koristi kombinacija električnog motora s unutarnjim izgaranjem, no

njihova baterija se puni regenerativnim kočenjem i radom motora, a ne putem vanjskog izvora struje. Ova vozila ne mogu voziti isključivo na električnu energiju, ali sustav omogućuje značajne uštede goriva i smanjenje emisija. Toyota Prius i Honda Insight su među najpoznatijim HEV-ovima. Zadnja kategorija su vozila s vodikovim gorivnim ćelijama (FCEV) koja koriste vodik za napajanje gorivnih ćelija koje proizvode električnu energiju za pokretanje električnog motora. Emisija iz ovih vozila je samo vodena para, što ih čini vrlo ekološki prihvatljivima. Toyota Mirai, Hyundai Nexa i Honda Clarity Fuel Cell su primjeri FCEV-ova. Ovaj rad bavi se analizom za BEV vozila kojim se pogon napaja isključivo iz baterije [13,14].

1.3. Pogon i struktura električnih vozila

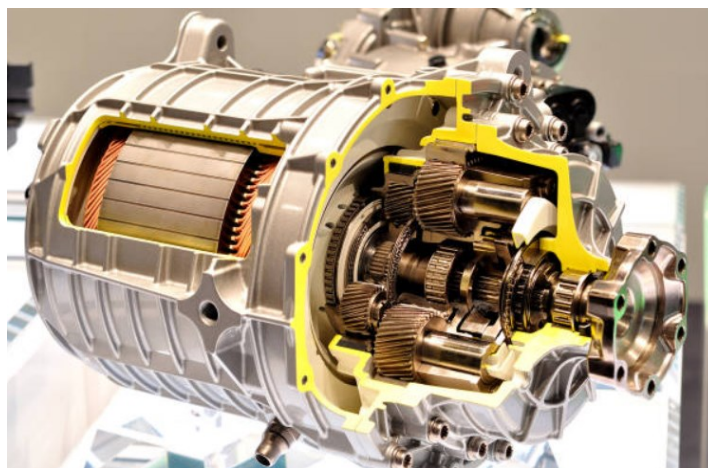
Jedna od glavnih komponenta pogona EV-a je električni motor/generator koji transformira električnu energiju iz baterije u mehaničku energiju potrebnu za pokretanje vozila. Također, pri generatorskom kočenju, ovaj motor pretvara kinetičku energiju kretanja vozila natrag u električnu energiju koja se ponovno pohranjuje u bateriju. Električna baterija ne samo da pohranjuje energiju potrebnu za pogon vozila, već također napaja dodatne sustave poput svjetala ili klime. Naravno osim pogonskog dijela postoje još važnijih elemenata poput priključka za punjenje, DC/DC pretvarača, toplinskog sustava, regulatora energetske elektronike, toplinskog sustava za hlađenje, itd... [15]



Slika 3. Shematski prikaz pogona EV-a [16]

1.3.1. Električni motor

Električni motor je esencijalna komponenta električnih vozila, koja koristi magnetsko polje za izravnu pretvorbu električne energije u mehaničku [17]. Ovaj motor karakterizira visoki okretni moment pri niskim brzinama, što ga čini izuzetno prikladnim za pokretanje vozila u usporedbi s unutarnjim sagorijevanjem iste snage. To omogućuje efikasnije iskorištavanje energije i poboljšane performanse vozila bez emisije štetnih plinova.



Slika 4. Izgled električnog motora [18]

Postoje tri različita tipa elektromotora koji se mogu koristiti za pogon električnih automobila: sinkroni motor s trajnim magnetima, asinkroni motor i vanjski pobuđeni sinkroni motor [19]. Odabir odgovarajućeg elektromotora ili kombinacije motora u vozilu, poput broja motora i njihovih specifičnih karakteristika kao što su doseg, snaga, prostorna zahtjevnost, kapacitet opterećenja, proizvodni dijelovi ili troškovi, temelji se na različitim kriterijima. Primjerice, kako je navedeno na hrvatskoj inačici web stranice Audi-a, Audi Q4 50 e-tron quattro je opremljen s dva elektromotora: jedan sinkroni motor s trajnim magnetima na stražnjoj osovini i jedan asinkroni motor na prednjoj osovini, što omogućava poboljšanu dinamičnost i kontrolu vozila na različitim vrstama terena. Elektromotori u EV koriste trofaznu struju, dok visokonaponska baterija pruža istosmjernu struju. Zbog toga svaki elektromotor u vozilu povezan je s pretvaračem koji pretvara struju iz baterije u odgovarajući oblik potreban za rad motora.



Slika 5. Građa Audi-a Q4 50 e-tron quattro [20]

1.3.2. Baterija

Baterija predstavlja jedini izvor energije u električnom vozilu te igra ključnu ulogu u određivanju doseg vozila. Također, baterija je komponenta s najvišom cijenom i masom. Sastoji se od više električnih ćelija koje su međusobno povezane. Svaka ćelija ima ulogu pretvaranja kemijske energije u električnu energiju. Sastoji se od pozitivne i negativne elektrode koje su spojene elektrolitom. Kemijska reakcija između elektroda i elektrolita stvara istosmjernu struju. Kod punjivih baterija, kemijska reakcija može se obrnuti kako bi se baterija ponovno napunila. Postoji mnogo različitih materijala i elektrolita čijom se kombinacijom može stvoriti baterija. Međutim, relativno mali broj kombinacija razvijen je kao punjive električne baterije pogodne za upotrebu u vozilima. Neke od takvih tehnologija uključuju: olovo-kiselinske baterije, nikal-željezne baterije, nikal-kadmij baterije, nikal-metal, litij-ion, natrij-metal kloridne baterije, aluminijski-zrak baterije, cink-zrak baterije... Najčešće se koristi litij-ionska baterija radi njezine velike specifične snage i energije te radi njenog dugog vijeka trajanja [21,22].

Tablica 1. Karakteristike određenih tipova baterije [23]

Tip baterije	Broj životnih ciklusa	Specifična snaga [W/kg]	Nominalni napon čelije [V]	Specifična energija [Wh/kg]
Litij- ion	>1000	300	3,55	90
Natrij-sumpor	1000	200	2	100
Nikal-kadmij	1200	125	1,2	40-55
Olovo-kiselina	800	250	2	20-35

**Slika 6. Prikaz litij-ionske baterije [24]**

2. Pregled električnih vozila na tržištu

Električna vozila kao i sva druga dolaze u raznim veličinama. Kako bi se vidio jasan utjecaj mase baterije, odnosno veličina baterije, na vozna svojstva trebao bi se pokriti čim veći spektar vozila. Zato su odabrane 5 razne kategorije veličina vozila koja zadovoljavaju različite potrebe i stilove života. Za svaku kategoriju je izabran jedan predstavnik te su svi važniji podaci prikazani u pripadajućoj tablici.

2.1. Kompaktna i gradska vozila

Predstavnik ove kategorije je automobil Zoe od tvrtke Renault. Renault Zoe se ističe kao jedan od najistaknutijih predstavnika pristupačnih i praktičnih električnih automobila. Od svog prvog predstavljanja, Zoe je brzo stekao popularnost zahvaljujući svojoj učinkovitosti, pouzdanosti i dometu. Zoe je opremljen naprednim sinkronim električnim motorom s permanentnim magnetima, dostupan u dvije varijante snage: 100 kW i 80 kW. Ova fleksibilnost omogućava vozačima da odaberu verziju koja najbolje odgovara njihovim potrebama, bilo da traže veće performanse ili veću ekonomičnost. Za simulaciju će se uzeti slabija varijanta. Nosivost ovog automobila varira do modela, a iznosi otprilike 486 kg [25].



Slika 7. Renault Zoe [26]

Jedna od najvažnijih značajki Renault Zoea je njegoa baterija kapaciteta 52 kWh [25]. Ova baterija pruža domet do 300 km, što znači da vozači mogu putovati na veće udaljenosti bez potrebe za čestim punjenjem. Punjenje je također jednostavno i fleksibilno, podržava AC punjenje do 22 kW, što omogućava brzo punjenje na javnim punionicama. Renault Zoe je kompaktan automobil s dimenzijama koje ga čine savršenim za gradske uvjete. Duljina vozila je 4087 mm, širina 1787 mm, a visina 1562 mm. Težina automobila ovisi o specifičnom modelu, najnoviji model je težak 1577 kg [27], dok od te ukupne težine 326 kg [28] zauzima litij-ionska baterija.

2.2. Kompaktna sportska terenska vozila

Predstavnik kategorije kompaktnih sportskih teretnih vozila (SUV-ova) je zauzeo Hyundai Kona Electric. Hyundai Kona Electric opremljen je Permanent Magnet Synchronous Motorom (PMSM) koji pruža snagu od 150 kW i okretni moment od 395 Nm. Maksimalna brzina iznosi 167 km/h, što je više nego dovoljno za svakodnevne potrebe i vožnju na autocesti. Jedna od ključnih prednosti Hyundai Kona Electrica je njegoa baterija. Dostupna je u dvije verzije: 64 kWh i 39,2 kWh. Verzija sa 64 kWh baterijom nudi domet do 484 km [29] te ima masu od otprilike 454 kg, što znači da vozači mogu putovati na veće udaljenosti bez brige o čestom punjenju. Manja baterija od 39,2 kWh također pruža solidan domet, idealan za gradske uvjete vožnje. Za potrebu simulacije će biti uzeta varijanta od 64 kWh.



Slika 8. Hyundai Kona Electric [30]

Vozilo je dugo 4355 mm, široko 1800 mm i visoko 1575 mm, s međuosovinskim razmakom od 2600 mm. Masa praznog automobila iznosi oko 1760 kg za verziju s većom baterijom te mu je nosivost 522 kg [31].

2.3. Srednje velika sportska terenska vozila

Za kategoriju srednje velikih SUV-ova je izabran automobil Tesla Model Y. Tesla Model Y dolazi s dvostrukim električnim motorima koji osiguravaju pogon na sve kotače. Opremljen je baterijom kapaciteta oko 75 kWh [32], koja omogućuje dug domet i brzu mogućnost punjenja. Long Range verzija može prijeći do 515 km prema procjenama, dok Performance verzija nudi domet do 488 km [33]. U simulaciji će se koristiti model sa većim dometom i kapacitetom baterije. Ima dužinu od 4750 mm, širinu od 1921 mm i visinu od 1624 mm. S masom praznog vozila od oko 1900 kg, kod kojeg baterija zauzima 770 kg težine [34]. Tesla Model Y može podnijeti impresivnu nosivost od 539 kg [35].



Slika 9. Tesla Model Y [32]

2.4. Limuzine

Za kategoriju limuzina odabran je Tesla Model 3 koji je jedan od najpopularnijih električnih automobila. Dostupan je u tri glavne verzije: Standard Range Plus, Long Range i Performance. Radi tematike rada obratit će se pozornost samo na Long Range model. Long Range verzija pruža impresivan domet od 547 km te koristi napredne litij-ionske baterije koje osiguravaju dug domet. Long Range model (kao i Performance verzija) koristi bateriju kapaciteta oko 78.1 kWh [36]. Duljina vozila iznosi 4694 mm, širina 1849 mm (bez ogledala), a visina 1443 mm. Nosivost vozila iznosi oko 433 [37] kg te ukupna masa praznog vozila iznosi oko 1760 kg kod kojih 480 kg zauzima masa baterije [38].



Slika 10. Tesla Model 3 [39]

2.5. Terenci

Predstavnik kategorije terenaca je Ford F-150 Lightning. Ovaj automobil dolazi u nekoliko značajka, svaka naravno ima svoje specifikacije. F-150 koristi dva elektromotora koji omogućuju pogon na sve kotače. Za simulaciju se uzeo model Extended Range. Taj model ima veću bateriju od 131 kWh koja teži 820 kg. Domet mu je 515 km, što je vrlo impresivno s obzirom na veličinu vozila [40]. Auto je dug oko 5885 mm, širok oko 2029 mm te visok 2004 mm. Masa praznog vozila iznosi oko 3 tone (3000 kg) [41]. Maksimalna nosivost mu iznosi 1013 kg [42].



Slika 11. Ford F-150 Lightning [43]

Tablica 2. Specifikacije odabranih električnih vozila

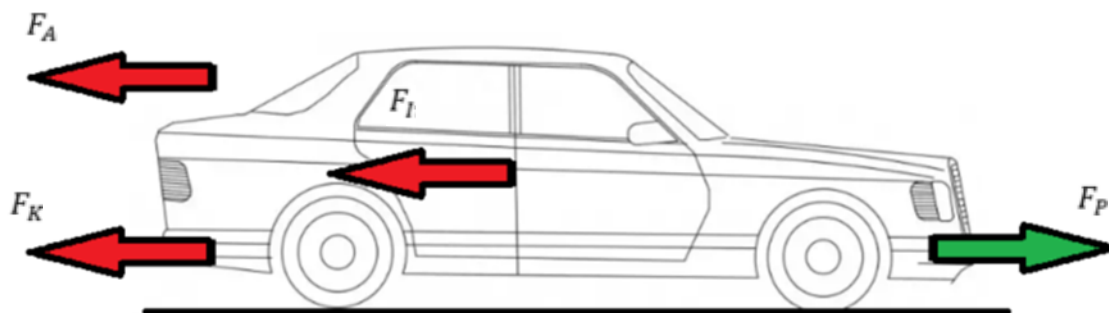
Kategorija	Predstavnik	Domet [m]	Nosivost [kg]	Masa praznog vozila [kg]	Masa baterije [kg]	Kapacitet baterije [kWh]	Prednja površina vozila [m ²]
Kompaktna i gradska vozila	Renault Zoe	300	486	1577	326	52	2,79
Kompaktni SUV-ovi	Hyundai Kona Electric	484	522	1760	454	64	2,84
Srednje veliki SUV-ovi	Tesla Model Y	525	539	1900	770	75	3.12
Limuzine	Tesla Model 3	547	433	1765	480	78,1	2,67
Terenci	Ford F-150 Lightning	515	907	3000	820	131	4,07

3. Jednostavan kvazistatički skalabilni računalni model električnog vozila

U ovom poglavlju je opisan jednostavan kvazistatički skalabilni računalni model električnog vozila. U prvom dijelu je obrađena uzdužna dinamika vozila, a u drugome dijelu se objašnjava modeliranje u programskom paketu Matlab Simulink.

3.1. Uzdužna dinamika vozila

Prvi korak koji je potrebno obaviti pri modeliranju je rastavljanje tijelo veza, odnosno postavljanje jednadžbe gibanja vozila. Na slici 12 se uočava kako sila pogona (F_P) mora prevladati sljedeće otpore: sila inercije (F_I), sila kotrljanja (F_K) i sila aerodinamičkog otpora (F_A).



Slika 12. Sile koje djeluju na vozilo

3.1.1. Sila kotrljanja

Sila kotrljanja nastaje radi trenja između površine i gume vozila. U ovom slučaju je sila kotrljanja konstantne vrijednosti radi pretpostavke da vozilo vozi ravnim putem, tj. da je kut alfa (α) uvijek jednak 0 pa član $\cos(\alpha)$ iznosi 1. Jednadžba za silu kotrljanja glasi [23]:

$$F_K = \mu_k m_V g \cos(\alpha) \quad (1)$$

Koeficijent trenja (μ_k) kotrljanja varira ovisno o tipu gume, njenom tlaku; a vrijednost mu varira od 0,01 do 0,015 [23]. Vrijednost koja je izabrana je 0,012, dok je za vrijednost akceleracije slobodnog pada uzeta vrijednost od $9,81 \text{ m/s}^2$.

3.1.2. Sila inercije

Kako se brzina vozila mijenja u vremenu prema profilu voznog ciklusa, potrebna sila koja može izazvati tu promjenu. Za potrebu ove jednadžbe je uzet drugi Newton-ov zakon koji glasi [23]:

$$F_I = m_V a \quad (2)$$

3.1.3. Sila aerodinamičkog otpora

Sila aerodinamičkog otpora nastaje radi trenja kada se vozilo određenom brzinom giba kroz zrak. Ona ovisi o obliku, tj. ako nekakav objekt „izlazi“ iz osnovnog oblika poput retrovizora, da to negativno utječe na brzinu. Jednadžba sile aerodinamičkog otpora glasi [23]:

$$F_A = 0.5 \rho_{zrak} A_f C_d v_V^2 \quad (3)$$

Koeficijent aerodinamičkog otpora (C_d) se povećava ako je vozilo lošije aerodinamike. Za automobile vrijednost mu iznosi 0,3 [23]. Vrijednost gustoće zraka (ρ_{zrak}) je $1,295 \text{ kg/m}^3$, dok je A_f prednja površina vozila.

3.1.4. Sila pogona, moment i snaga

Sila pogona je sila koja je potrebna da se vozilo pokrene. Jednadžba se dobiva preko uzdužne dinamike (vidi sliku 12.) . Jednadžba glasi [23]:

$$F_P = F_K + F_I + F_A \quad (4)$$

Nakon dobivanja sile pogona, navedena sila se može pomnožiti s polumjerom kotača te se tako dođe do momenta pogona :

$$\tau_P = F_P r \quad (5)$$

Preko brzine i promjera se može dobiti i kutna brzina pogona, odnosno kotača:

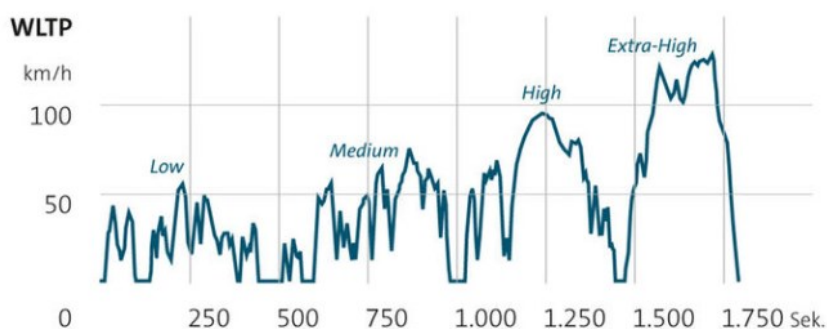
$$\omega_P = \frac{v_V}{r} \quad (6)$$

Te naposljetku se može dobiti snaga iz izraza:

$$P_P = F_P v_V = \tau_P \omega_P \quad (7)$$

3.2. WLTP ciklus

WLTP („Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“) ciklus je ukratko standardizirani ispitni postupak za osobna i laka gospodarska vozila. 1. rujna 2017. je uveden WLTP. za novije vrste vozila. Nakon godinu dana, novi standard postao je obavezan za sve osobne automobile, zamijenivši prethodni Novi europski vozni ciklus (NEDC), koji je bio na snazi od 1992. godine. WLTP je uveden kako bi podaci o potrošnji goriva bili pristupačniji kupcima, odnosno u ovoj priči energije, koji simuliraju ponašanje u stvarnim uvjetima vožnje. U ispitnoj komori, gdje se provode temeljita ispitivanja vozila, temperatura je postavljena na stabilnih 23°C. Ova konstantna temperatura osigurava preciznost rezultata, eliminirajući varijable koje bi mogle utjecati na performanse vozila. Ispitna dionica, pažljivo odabrana i projektirana, duga je točno 23 kilometra. Ova duljina omogućava detaljno testiranje različitih aspekata vožnje.



Slika 13. Primjer WLTP ciklusa sa označenim fazama [45]

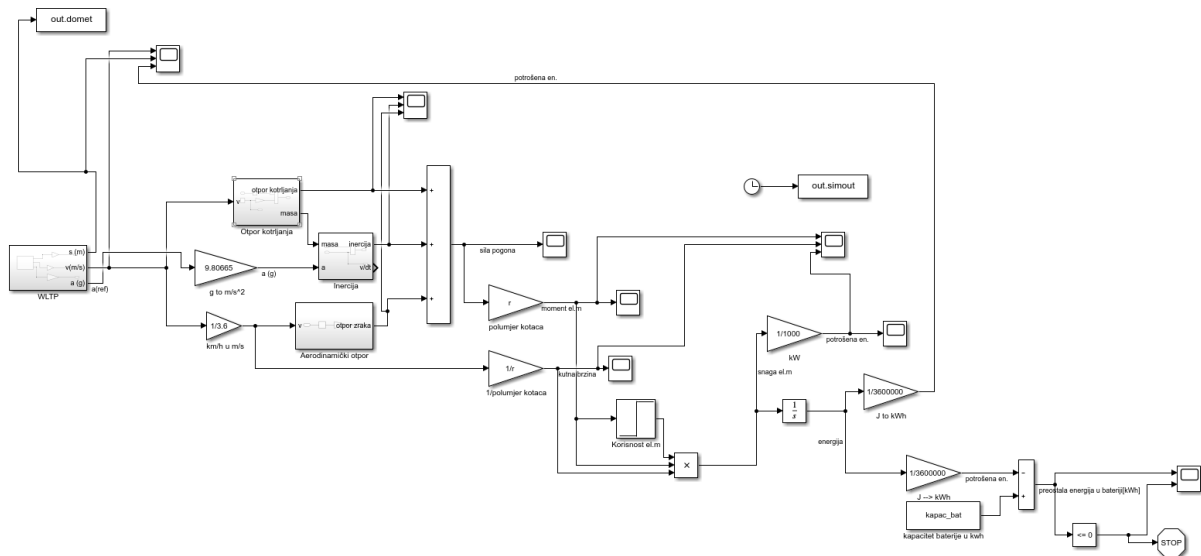
Ciklus ispitivanja traje 30 minuta, dovoljno dugo da se simuliraju razni uvjeti vožnje, ali dovoljno kratko da se testovi mogu ponavljati u različitim scenarijima. Ciklus se sastoji od četiri jasno definirane faze: low, medium, high i extra-high. Svaka faza predstavlja različite uvjete na

cesti, od lagane gradske vožnje do brzih autocesta, pružajući sveobuhvatnu sliku performansi vozila. Prosječna brzina tijekom ciklusa iznosi 47 km/h, što je reprezentativno za mješovite uvjete vožnje koje vozilo može susresti u stvarnom svijetu. Osim toga, udio perioda mirovanja iznosi 13%, simulirajući vrijeme kada je vozilo zaustavljeno, što je često u urbanim sredinama s mnogo semafora i gužvi. Maksimalna brzina koju vozila postižu tijekom ispitivanja prelazi 130 km/h.. Važan aspekt ovih testova je i to da se točke za mijenjanje stupnjeva prijenosa izračunavaju unaprijed i individualno za svako vozilo. Ovi izračuni uzimaju u obzir specifične karakteristike vozila, uključujući njegovu masu i dodatnu opremu, kako bi se osigurala maksimalna učinkovitost i optimalne performanse. Kada se provode testiranja, u obzir se uzimaju sve moguće kombinacije motora i mjenjača. To znači da se ne ispituje samo jedan standardni model, već se provjeravaju sve varijante kako bi se osigurala sveobuhvatna evaluacija performansi. Svaka kombinacija ima svoje specifične karakteristike i izazove, te je važno razumjeti kako se one ponašaju u različitim uvjetima. Ovakav pristup omogućava proizvođačima da precizno procijene pouzdanost i učinkovitost svakog vozila koje izađe iz njihove tvornice. Uz sveobuhvatne testove, kupci mogu biti sigurni da će vozila ispuniti očekivanja, bez obzira na uvjete u kojima se koriste. Detaljna ispitivanja također pomažu u identificiranju i rješavanju potencijalnih problema prije nego što vozilo dođe na tržište, osiguravajući tako visoku razinu kvalitete i sigurnosti [44,45,46].

3.3. Računalni model električnog vozila u Simulink-u

Potrebno je povezati uzdužnu dinamiku vozila, masu baterije i WLTP ciklus. U modelu se koristi Simulink blok preuzet s Mathworks stranice [47] koji može simulirati nekoliko standardiziranih voznih ciklusa. Taj blok ima tri izlaza: akceleraciju, brzinu i prijeđeni put. Na ulazu glavnog računalnog modela se nalazi upravo WLTP ciklus sa varijablom brzine i akceleracije koje su ovisne o vremenu, Zatim se preko izraza za uzdužnu dinamiku vozila izračuna sila koja je potrebna da bi se odvozilo ciklus. Preko polumjera kotača brzina i sila se transformiraju na potreban moment i kutnu brzinu izlaznog vratila te preko elektromotora (kojem efikasnost može biti opisana karakteristikom/mapom ili fiksnim parametrima) postane električna snaga koja prazni (ili puni kod regenerativnog kočenja) model baterije. Pretpostavlja se da je korisnost baterije 0,7. Pozitivno ubrzanje vozila u ciklusu rezultira pozitivnom silom koja uz pozitivne vrijednosti brzine postane potrebna pogonska snaga pozitivnog iznosa koja nakon dijeljenja s faktorom ukupne korisnosti pogona postane snaga pražnjenja baterije. U slučaju kočenja, sila postaje negativna dok je brzina i dalje pozitivna što rezultira negativnim

iznosom potrebne pogonske snage. Ta snaga se sada množi faktorom ukupne efikasnosti pogona te postaje negativna električna snaga kojom se baterija nadopunjuje. Uzet je konstantni polumjer kotača iznosa 0.2032 m. U radu je korišten elektromotor s konstantnom efikasnošću, a model baterije je potpuno lineariziran te je predstavljen jednim integracijskim članom. U modelu su radi potrebe prikaza grafova korišteni Scope i To Workspace iz Simulink Library Browser-a.

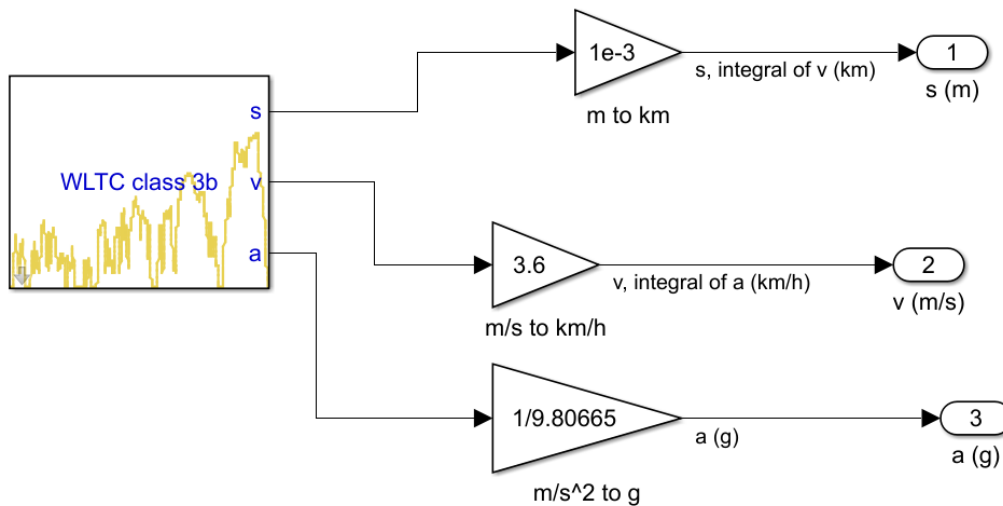


Slika 14. Računalni model u Simulink-u

U nastavku su dani opisi rada pojedinog podmodela.

3.3.1. Podmodel WLTP

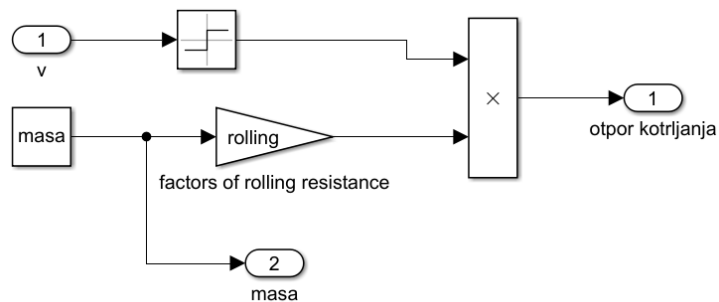
U računalnom modelu na slici 14 nalazi se podmodel WLTP prikazan na slici 15, taj blok ima 3 izlaza: prijeđeni put, brzinu i akceleraciju. WLTC je zapravo dio WLTP-a koji obuhvaća samo vozni ciklus. Blok daje izlaze mjernih jedinica u SI sustavu.



Slika 15. Podmodel WLTP

3.3.2. Podmodel Otpor kotrljanja

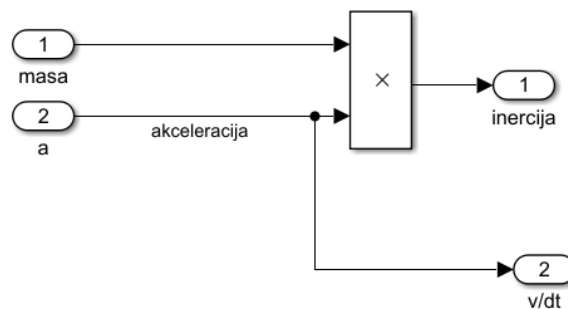
U poglavlju 3.1.1. je navedeno kako je otpor kotrljanja konstantan, odnosno kao što se vidi na slici 16 ovisi o masi i o konstantnim faktorima (faktor trenja i akceleracija slobodnog pada), kako je navedeno u izrazu (1).



Slika 16. Podmodel Otpor kotrljanja

3.3.3. Podmodel Inercija

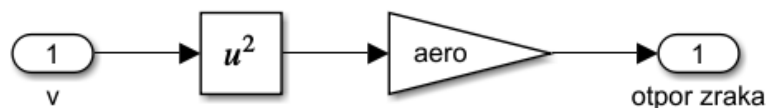
Na slici 17 se nalazi podmodel „Inercija“ gdje su masa i akceleracija ulazne jedinice, a model na izlazu daje silu inercije. Podmodel inercija predstavlja Simulink podmodel koji predstavlja izraz (2).



Slika 17. Podmodel Inercija

3.3.4. Podmodel Aerodinamički otpor

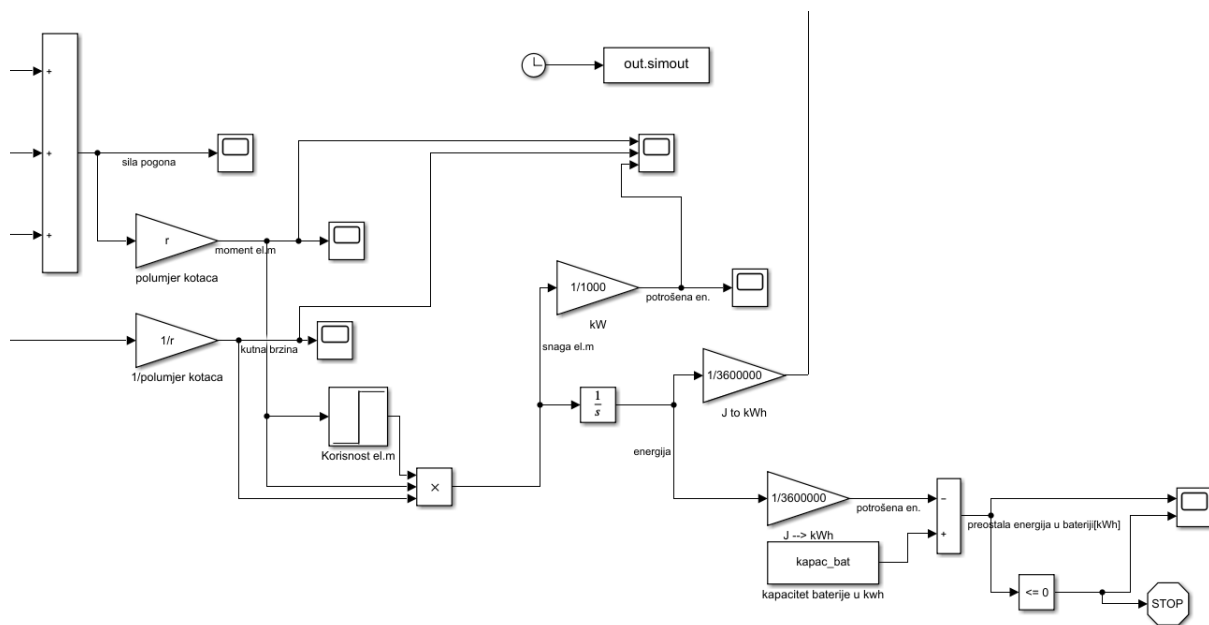
U podmodelu „Aerodinamički otpor“ (vidi sliku 18) je ulaz brzina, koja se zatim kvadrira i množi (prema izrazu (3)) koeficijentima aerodinamičkog otpora: koeficijent aerodinamičkog otpora, prednja površina vozila i gustoća zraka.



Slika 18. Podmodel Aerodinamički otpor

3.3.5. Zbrajanje sile, izračun snage i model baterije

Nakon prethodno spomenutih koraka, dolazi se do dijela gdje se sve sile zbrajaju, kao što je dano u izrazu (4). Njihov zbroj je jednak sili pogona. Zatim se množenjem sile pogona i polumjerom kotača (prema izrazu (5)) dobije moment, te dijeljenjem brzine polumjerom kotača dobijemo kutnu brzinu prema izrazu (6). Zatim se uzme u obzir korisnost motora, što je detaljnije objašnjeno u poglavlju 3.3., i onda se pomnože kutna brzina i moment te se prema izrazu (7) dobije snaga elektromotora. Integriranjem snage se dobije energija elektromotora te pošto je ona pozitivna, moramo je oduzeti od ukupnog kapaciteta baterije. Naposljetku ostaje preostala energija u bateriji.



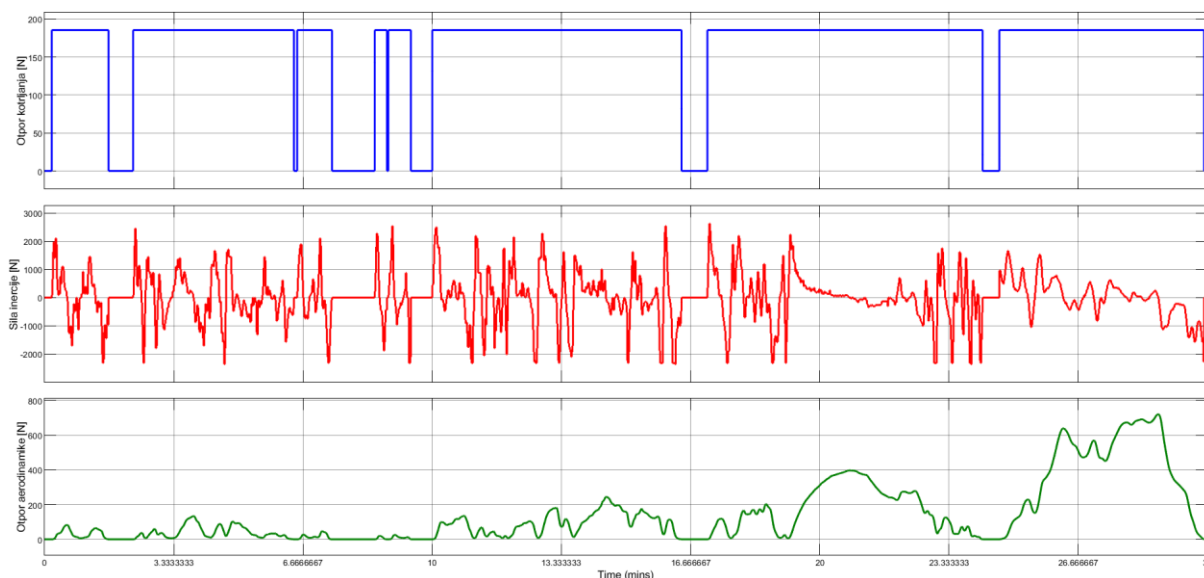
Slika 19. Zbrajanje sile, izračun snage i model baterije

4. Simulacijski rezultati kategorija električnih vozila

U ovom poglavlju su prikazani simulacijski rezultati svih kategorija vozila koja se nalaze u tablici 2. u poglavlju 2. Napravljena je Matlab skripta koja sadrži podatke iz navedene tablice. Za svaki tip vozila izvršeno je ponavljanje WLTP ciklusa sve dok se baterija vozila od punog stanja nije ispraznila. Na temelju toga je određen domet vozila. Radi preglednosti rezultata osnovne varijable su prikazane samo za jedan WLTP ciklus, a kod prikaza energije baterije i dometa su prikazani svi ponavljani ciklusi.

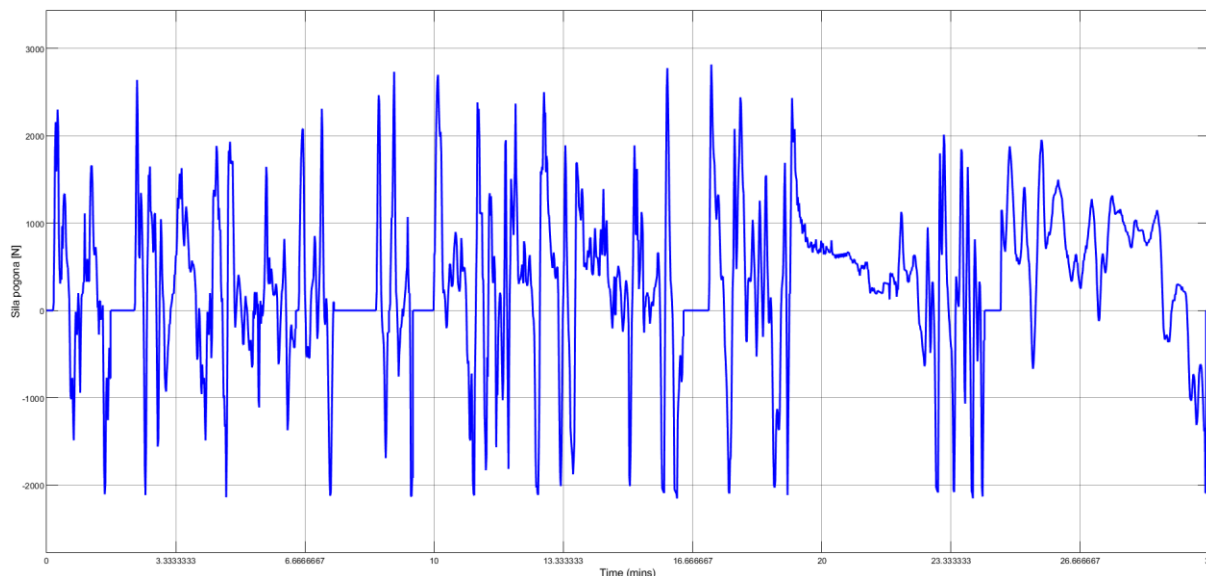
4.1. Kompaktna i gradska vozila

Na slici 20 su prikazane sile otpora kompaktnih i gradskih vozila. Sila otpora kotrljanja (plava linija na slici 20) iznosi konstantnih 175 N te kad je brzina nula, sila otpora kotrljanju je definirana također kao nula. Sila inercije (crvena krivulja na slici 20) varira između -2300 i +2500 N, što ima smisla s obzirom da vozilo ubrzava i usporava. Otpor aerodinamičnosti (zeleno krivulja na slici 20) ima maksimum u vrijednosti do otprilike maksimalnih 700 N, kada je brzina nula i otpor aerodinamičnosti je nula jer ovisi o brzini.



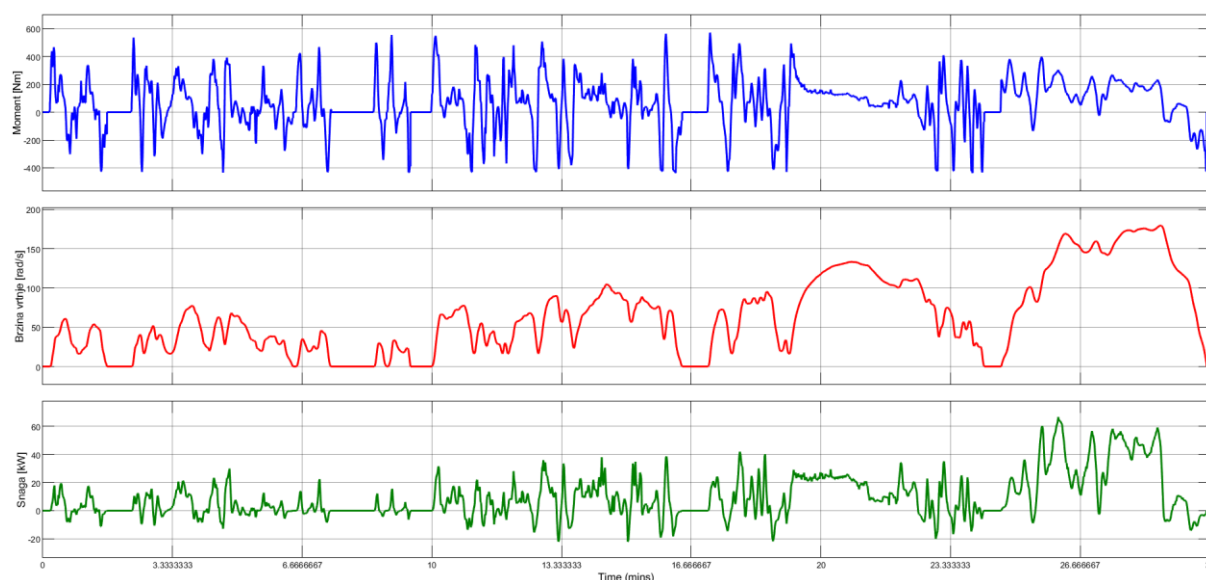
Slika 20. Sile otpora kompaktnih i gradskih vozila

Na slici 21 dana je ukupna sila pogona kompaktnih i gradskih vozila dobivena zbrojem sila prikazanih na slici 20. Ona varira u intervalu od -2100 do +2800 N.



Slika 21. Sila pogona kompaktnih i gradskih vozila

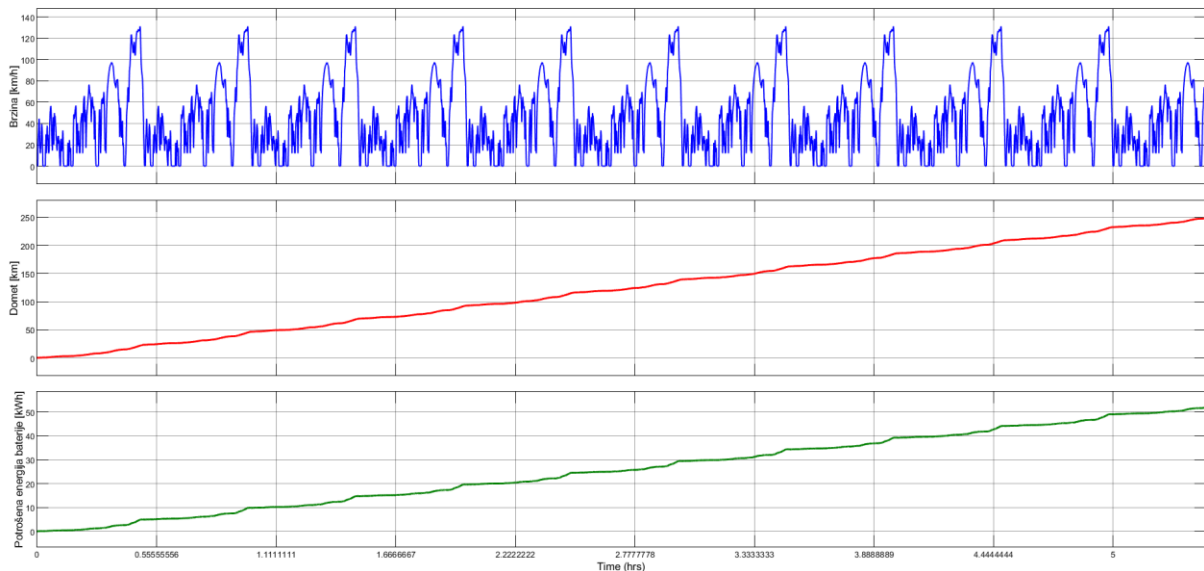
Na slici 22 je prikazan moment, brzina vrtnje i potrebna pogonska snaga kompaktnih i gradskih vozila. Može se vidjeti da se moment (plava krivulja na slici 22) kreće u intervalu od -410 do +575 Nm te kako se brzina (crvena krivulja na slici 22) kreće u intervalu 0 do 175 rad/s. Njihov umnožak daje potrebnu pogonsku snagu koja je prikazana zelenom krivuljom na slici 22. Ona se kreće u intervalu od -22 do 65 kW. Pozitivan iznos snage prazni bateriju dok negativan iznos nadopunjuje.



Slika 22. Moment, brzina vrtnje i snaga kompaktnih i gradskih vozila

Na slici 23. prikazan je domet i potrošena energija baterije za ponavljajući WLTP vozni ciklus za kompaktna i gradska vozila. Brzina ponavljajućeg ciklusa dana je na slici 23 krivuljom plave

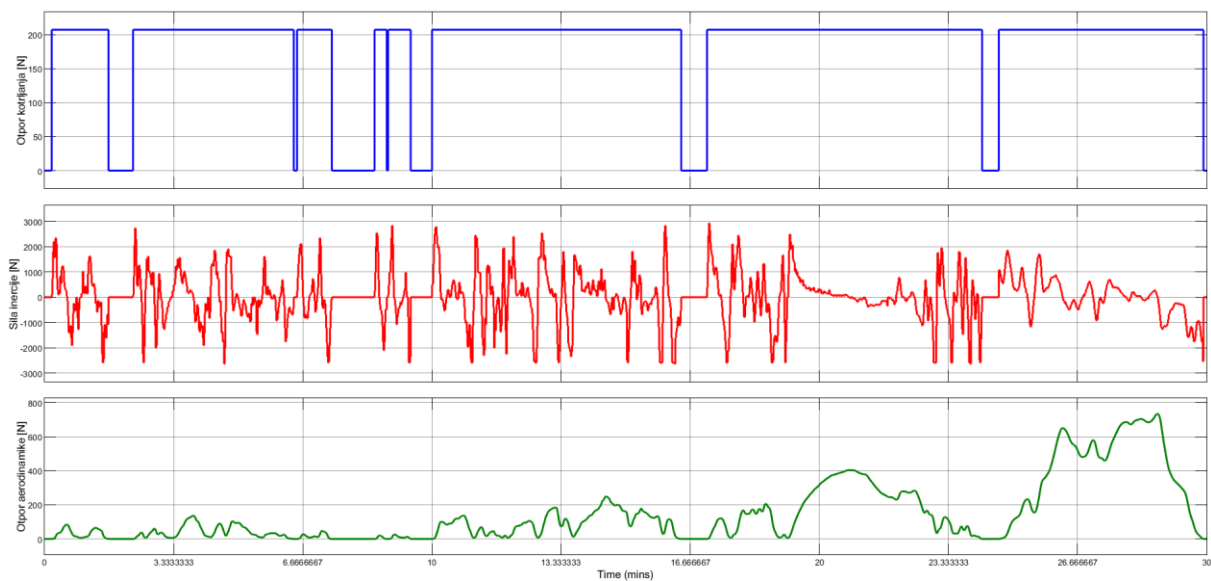
boje. Maksimalna brzina koju vozilo ostvaruje je 130 km/h. Dalje se iz dijagrama može vidjeti da vozilo sa svojim kapacitetom od 52 kWh može voziti nešto više od 5 sati (zeleno krivulja na slici 23) te može ostvariti domet od 248,8 km (crvena krivulja na slici 23).



Slika 23. Brzina, domet i potrošena energija baterije kompaktnih i gradskih vozila

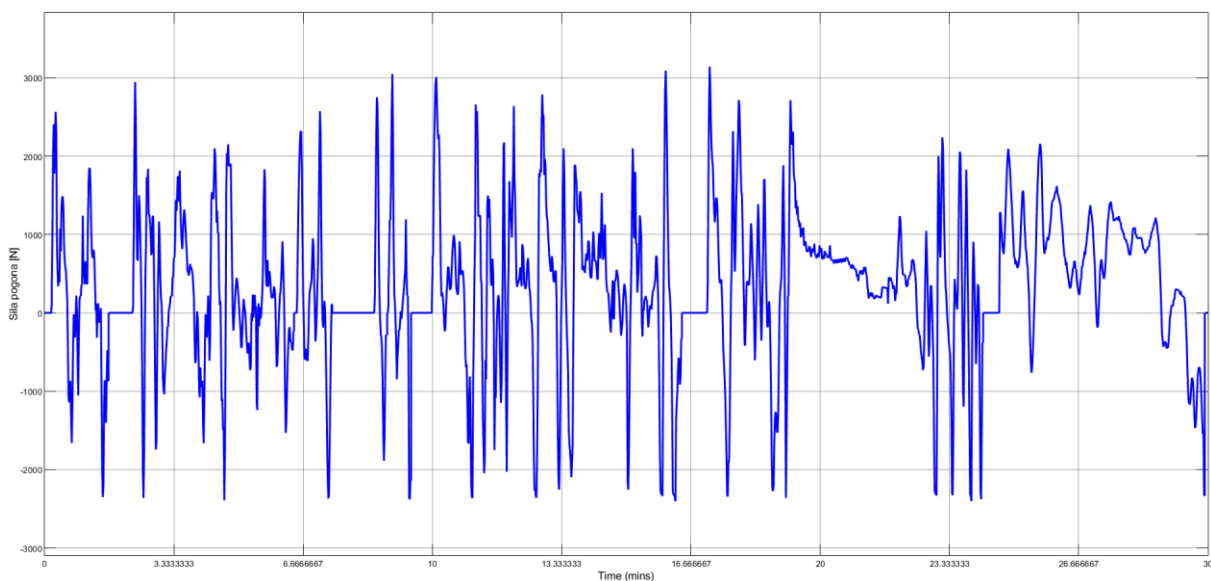
4.2. Kompaktna sportska terenska vozila

Na slici 24 su prikazane sile otpora kompaktnih SUV-ova. Sila otpora kotrljanja (plava linija na slici 24) iznosi konstantnih 210 N te kad je brzina nula, sila otpora kotrljanju je definirana također kao nula. Sila inercije (crvena krivulja na slici 24) varira između -2800 i +3000 N, što ima smisla s obzirom da vozilo ubrzava i usporava. Otpor aerodinamičnosti (zeleno krivulja na slici 24) ima maksimum u vrijednosti do otprilike maksimalnih 775 N, kada je brzina nula i otpor aerodinamičnosti je nula jer ovisi o brzini.



Slika 24. Sile otpora kompaktnih SUV-ova

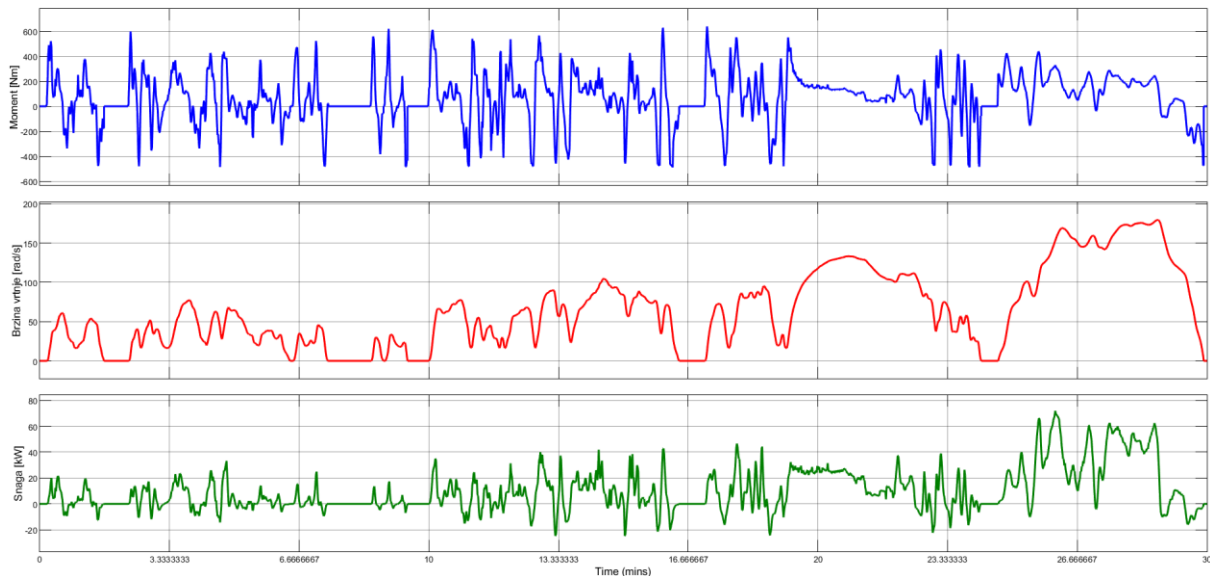
Na slici 25 dana je ukupna sila pogona kompaktnih SUV-ova dobivena zbrojem sila prikazanih na slici 24. Ona varira u intervalu od -2300 do +3200 N.



Slika 25. Sila pogona kompaktnih SUV-ova

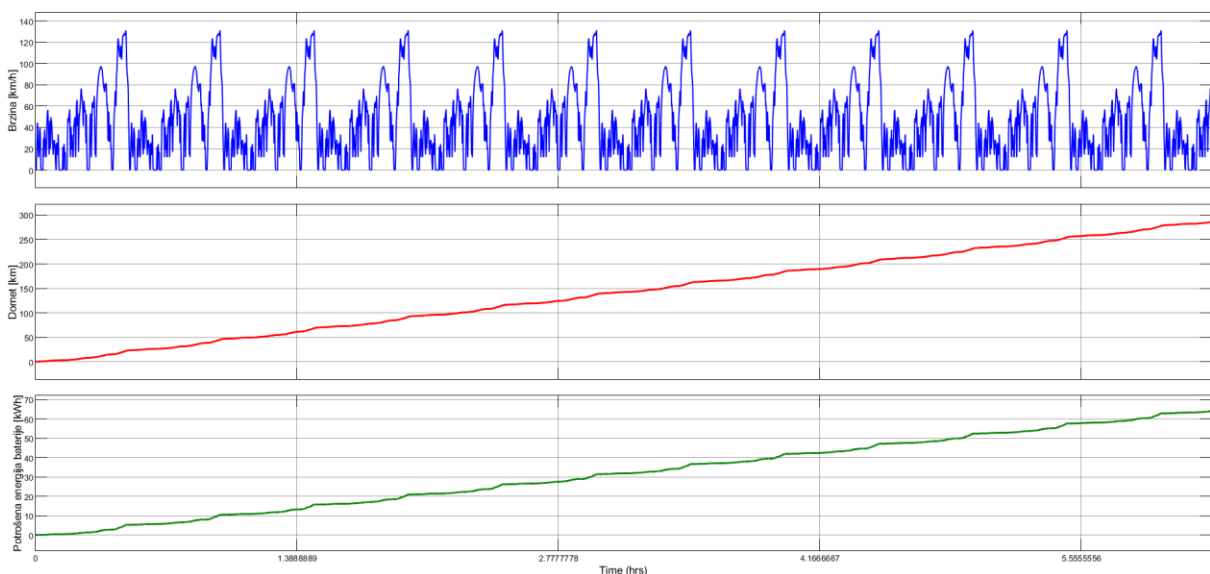
Na slici 26 je prikazan moment, brzina vrtnje i potrebna pogonska snaga kompaktnih SUV-ova. Može se vidjeti da se moment (plava krivulja na slici 26) kreće u intervalu od -480 do +610 Nm te kako se brzina (crvena krivulja na slici 26) kreće u intervalu 0 do 175 rad/s. Njihov umnožak daje potrebnu pogonsku snagu koja je prikazana zelenom krivuljom na slici 26. Ona se kreće u

intervalu od -25 do 70 kW. Pozitivan iznos snage prazni bateriju dok negativan iznos nadopunjuje.



Slika 26. Moment, brzina vrtnje i snaga kompaktnih SUV-ova

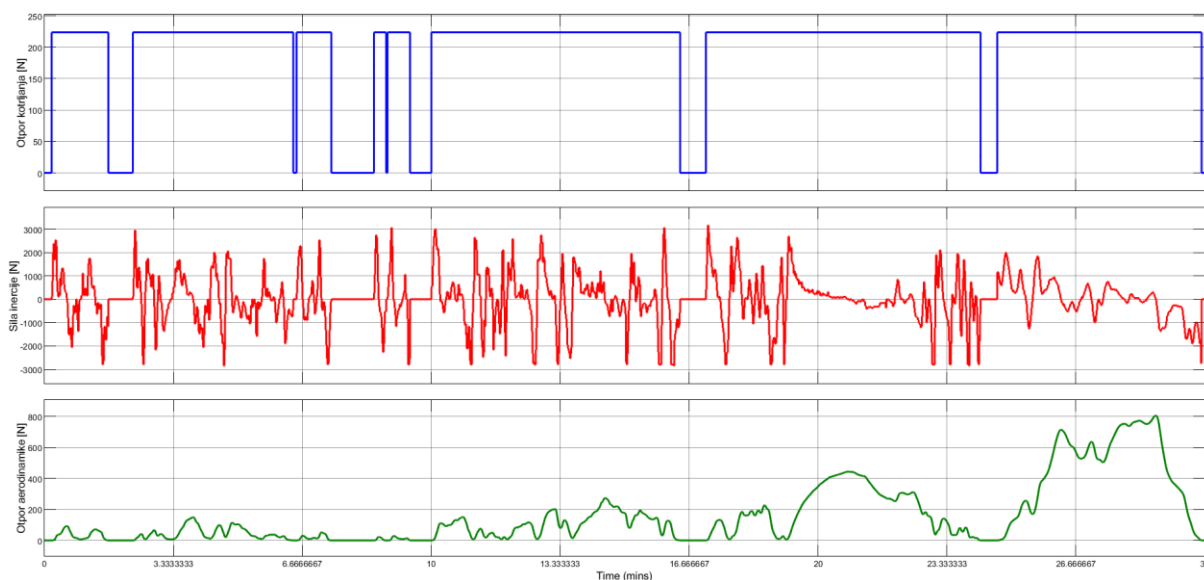
Na slici 27. prikazan je domet i potrošena energija baterije za ponavljajući WLTP vozni ciklus za kompaktne SUV-ove. Brzina ponavljajućeg ciklusa dana je na slici 27 krivuljom plave boje. Maksimalna brzina koju vozilo ostvaruje je 130 km/h. Dalje se iz dijagrama može vidjeti da vozilo sa svojim kapacitetom od 64 kWh može voziti nešto više od 5 sati i 45 minuta (zeleni krivulja na slici 27) te može ostvariti domet od 285,7 km (crvena krivulja na slici 27).



Slika 27. Brzina, domet i potrošena energija baterije kompaktnih SUV-ova

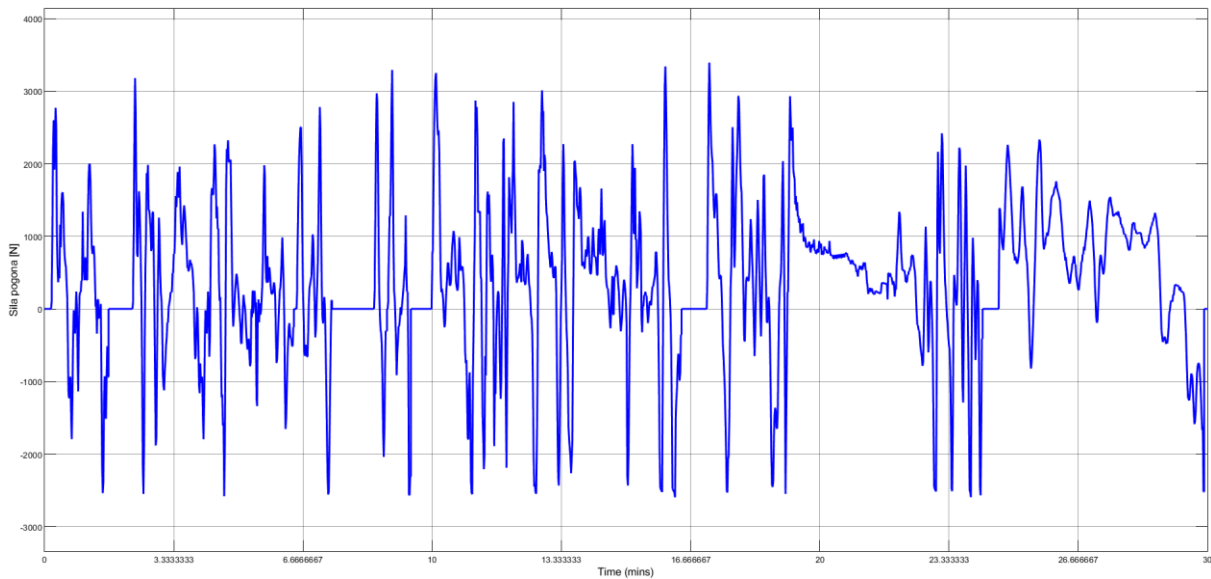
4.3. Srednje velika sportska terenska vozila

Na slici 28 su prikazane sile otpora srednje velikih SUV-ova. Sila otpora kotrljanja (plava linija na slici 28) iznosi konstantnih 225 N te kad je brzina nula, sila otpora kotrljanju je definirana također kao nula. Sila inercije (crvena krivulja na slici 28) varira između -2900 i +3100 N, što ima smisla s obzirom da vozilo ubrzava i usporava. Otpor aerodinamičnosti (zeleno krivulja na slici 28) ima maksimum u vrijednosti do otprilike maksimalnih 800 N, kada je brzina nula i otpor aerodinamičnosti je nula jer ovisi o brzini.



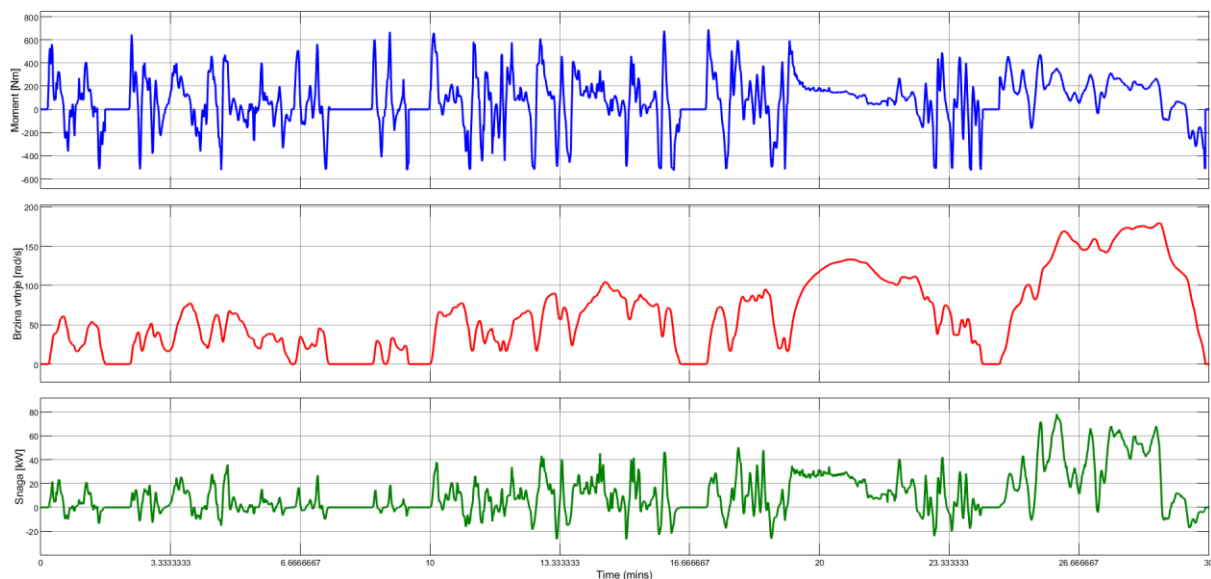
Slika 28. Sile otpora srednje velikih SUV-ova

Na slici 29 dana je ukupna sila pogona srednje velikih SUV-ova dobivena zbrojem sila prikazanih na slici 28. Ona varira u intervalu od -2500 do +3300 N.



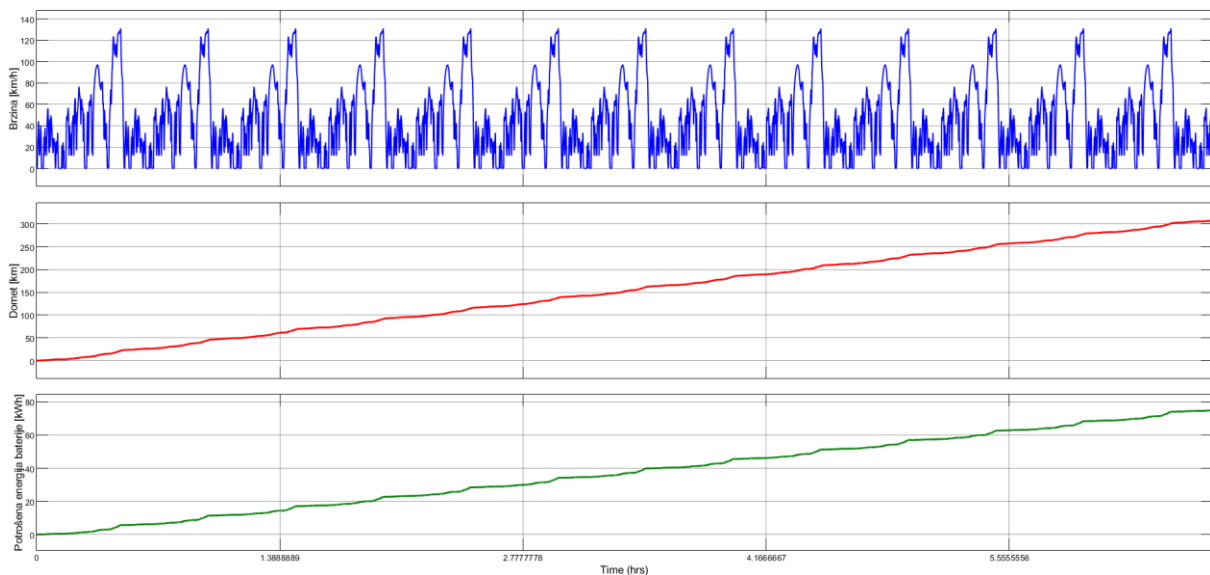
Slika 29. Sila pogona srednje velikih SUV-ova

Na slici 30 je prikazan moment, brzina vrtnje i potrebna pogonska snaga srednje velikih SUV-ova. Može se vidjeti da se moment (plava krivulja na slici 30) kreće u intervalu od -500 do +700 Nm te kako se brzina (crvena krivulja na slici 30) kreće u intervalu 0 do 175 rad/s. Njihov umnožak daje potrebnu pogonsku snagu koja je prikazana zelenom krivuljom na slici 30. Ona se kreće u intervalu od -26 do 80 kW. Pozitivan iznos snage prazni bateriju dok negativan iznos nadopunjuje.



Slika 30. Moment, brzina vrtnje i snaga srednje velikih SUV-ova

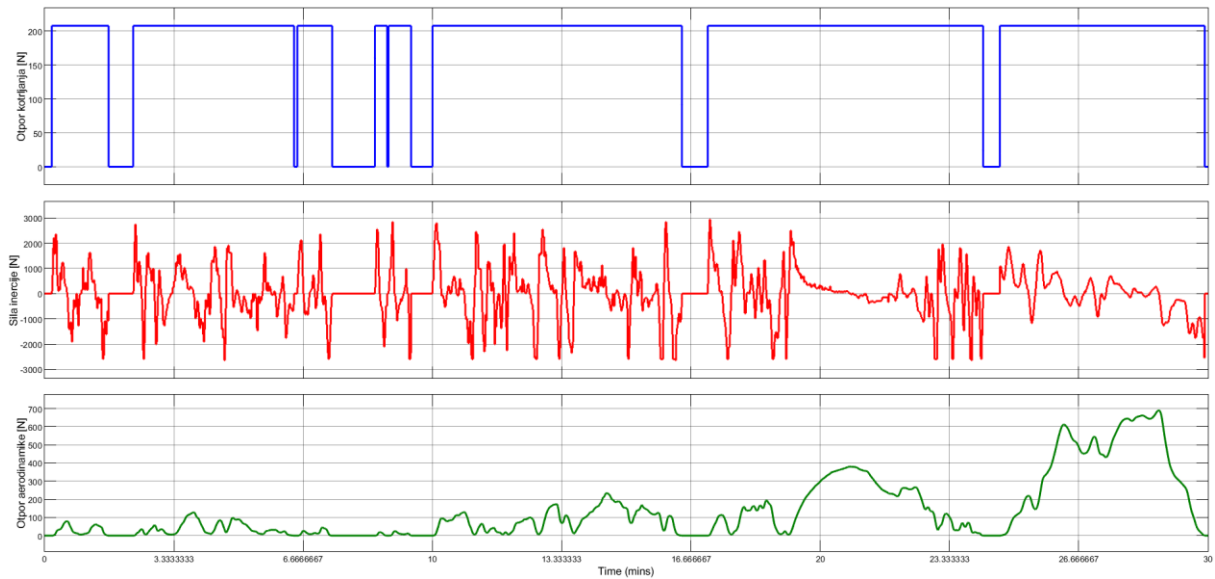
Na slici 31. prikazan je domet i potrošena energija baterije za ponavljajući WLTP vožni ciklus za srednje velike SUV-ove. Brzina ponavljajućeg ciklusa dana je na slici 31 krivuljom plave boje. Maksimalna brzina koju vozilo ostvaruje je 130 km/h. Dalje se iz dijagrama može vidjeti da vozilo sa svojim kapacitetom od 75 kWh može voziti otprilike 6 sati i 30 minuta (zeleno krivulja na slici 31) te može ostvariti domet od 307,3 km (crvena krivulja na slici 31).



Slika 31. Brzina, domet i potrošena energija baterije srednje velikih SUV-ova

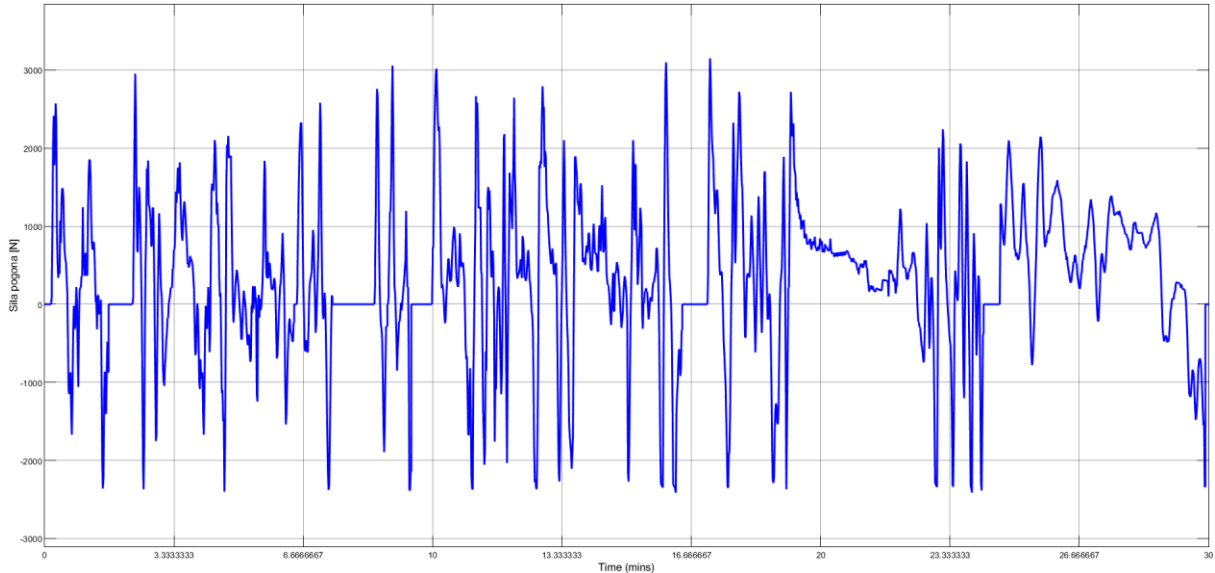
4.4. Limuzine

Na slici 32 su prikazane sile otpora limuzina. Sila otpora kotrljanja (plava linija na slici 32) iznosi konstantnih 210 N te kad je brzina nula, sila otpora kotrljanju je definirana također kao nula. Sila inercije (crvena krivulja na slici 32) varira između -2800 i +3000 N, što ima smisla s obzirom da vozilo ubrzava i usporava. Otpor aerodinamičnosti (zeleno krivulja na slici 32) ima maksimum u vrijednosti do otprilike maksimalnih 700 N, kada je brzina nula i otpor aerodinamičnosti je nula jer ovisi o brzini.



Slika 32. Sile otpora limuzine

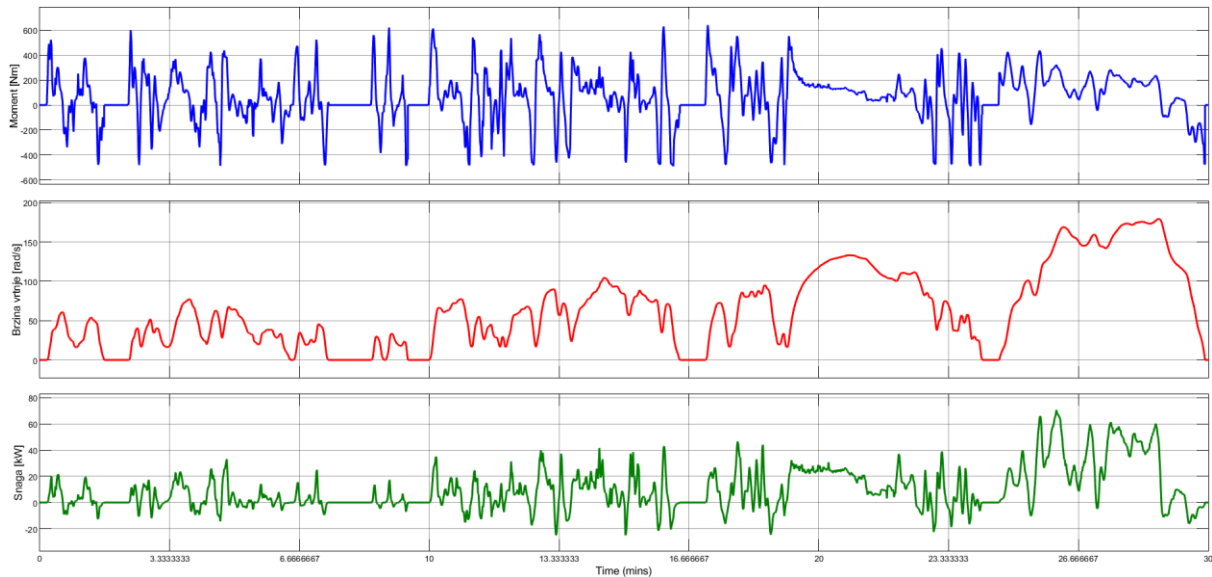
Na slici 33 dana je ukupna sila pogona limuzina dobivena zbrojem sila prikazanih na slici 32. Ona varira u intervalu od -2400 do +3200 N.



Slika 33. Sila pogona limuzine

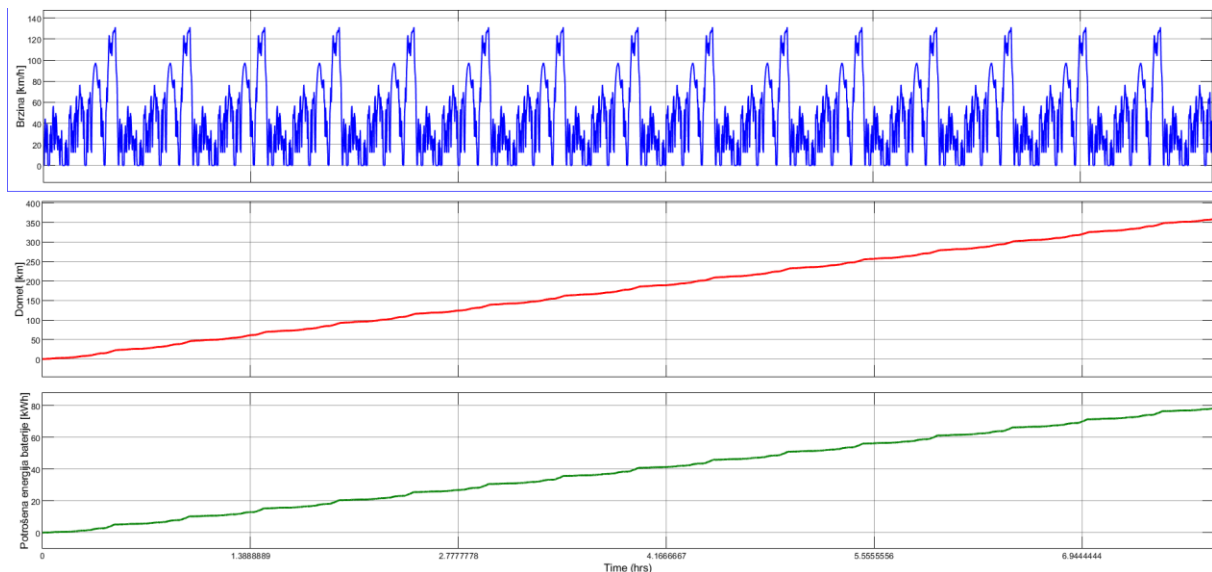
Na slici 34 je prikazan moment, brzina vrtnje i potrebna pogonska snaga limuzina. Može se vidjeti da se moment (plava krivulja na slici 34) kreće u intervalu od -500 do +620 Nm te kako se brzina (crvena krivulja na slici 34) kreće u intervalu 0 do 175 rad/s. Njihov umnožak daje potrebnu pogonsku snagu koja je prikazana zelenom krivuljom na slici 34. Ona se kreće u

intervalu od -25 do 65 kW. Pozitivan iznos snage prazni bateriju dok negativan iznos nadopunjuje.



Slika 34. Moment, brzina vrtnje i snaga limuzine

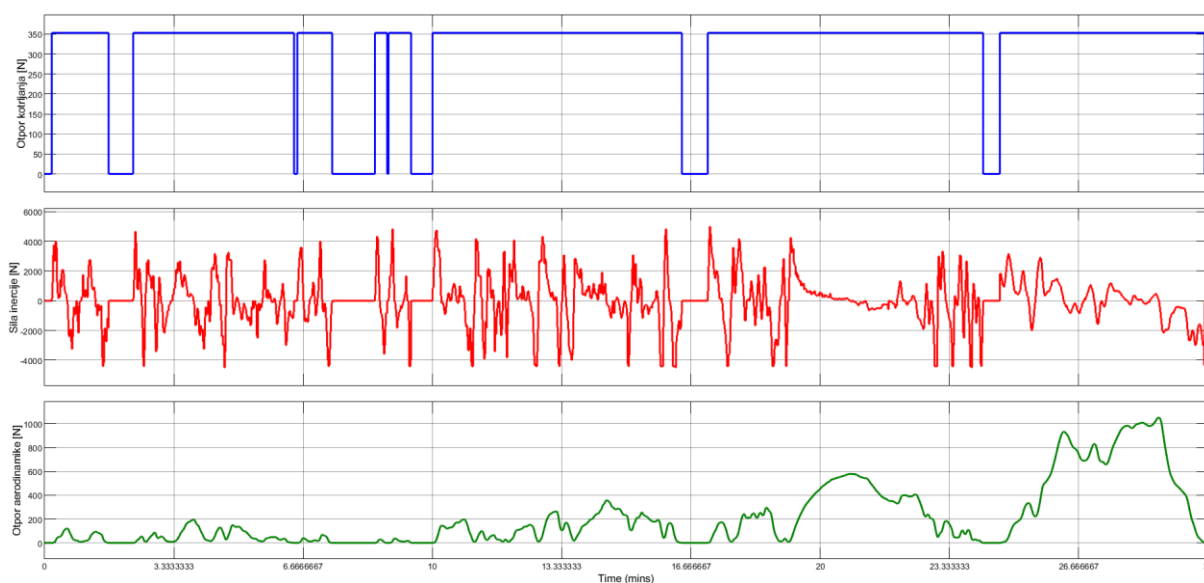
Na slici 35 prikazan je domet i potrošena energija baterije za ponavljajući WLTP vozni ciklus za limuzine. Brzina ponavljajućeg ciklusa dana je na slici 35 krivuljom plave boje. Maksimalna brzina koju vozilo ostvaruje je 130 km/h. Dalje se iz dijagrama može vidjeti da vozilo sa svojim kapacitetom od 78,1 kWh može voziti nešto više od 7 sati (zelena krivulja na slici 35) te može ostvariti domet od 358,5 km (crvena krivulja na slici 35).



Slika 35. Brzina, domet i potrošena energija baterije limuzina

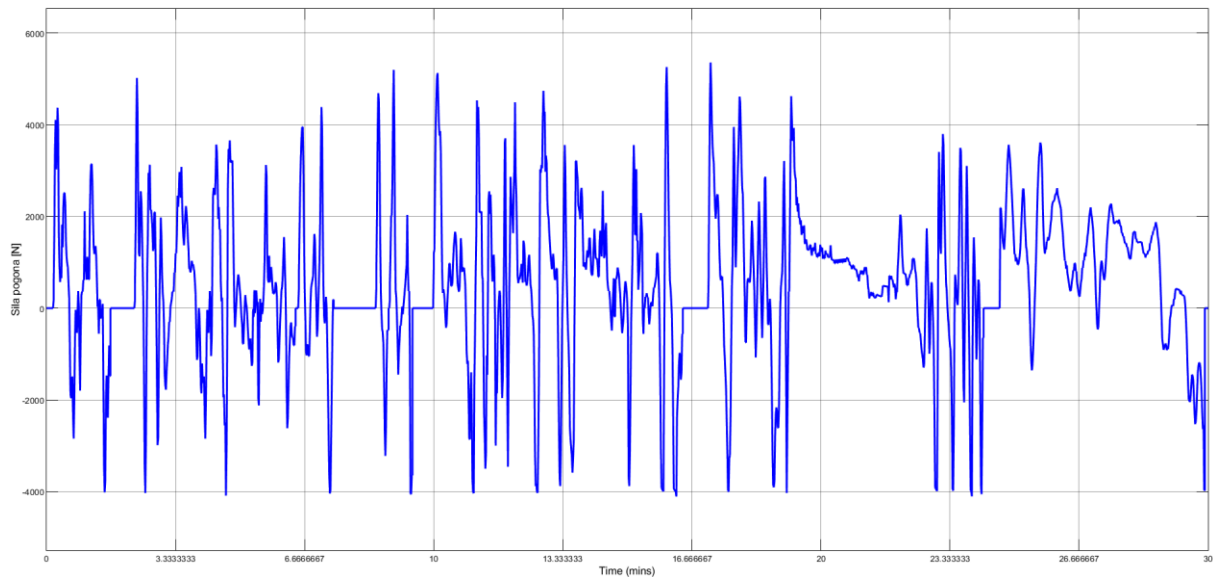
4.5. Terenci

Na slici 36 su prikazane sile otpora terenaca. Sila otpora kotrljanja (plava linija na slici 36) iznosi konstantnih 350 N te kad je brzina nula, sila otpora kotrljanju je definirana također kao nula. Sila inercije (crvena krivulja na slici 36) varira između -4250 i +5000 N, što ima smisla s obzirom da vozilo ubrzava i usporava. Otpor aerodinamičnosti (zelena krivulja na slici 36) ima maksimum u vrijednosti do otprilike maksimalnih 1050 N, kada je brzina nula i otpor aerodinamičnosti je nula jer ovisi o brzini.



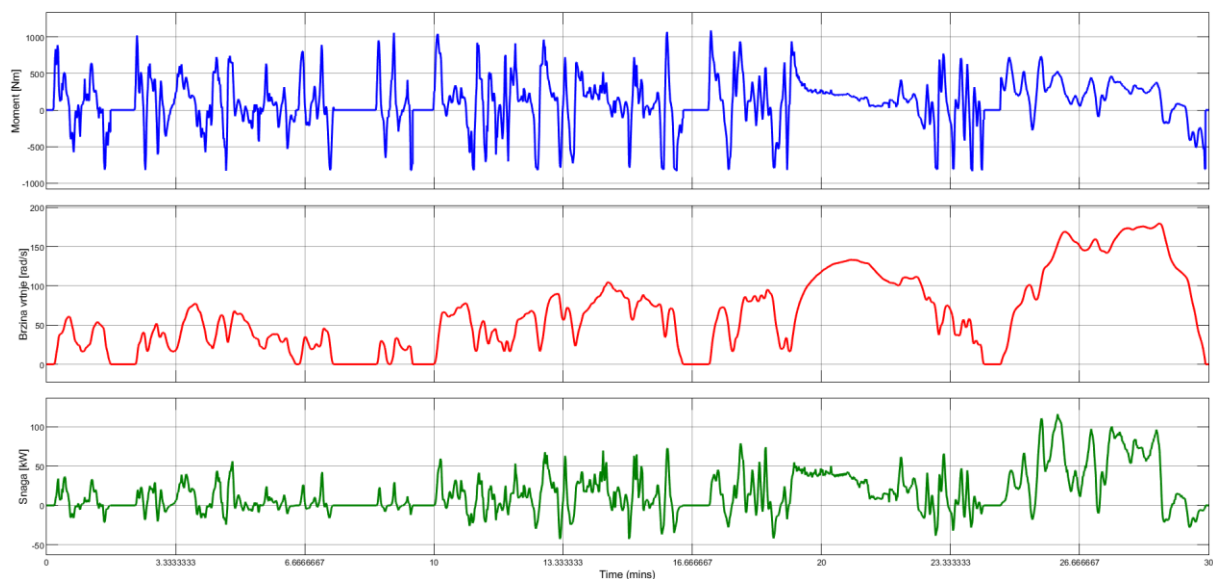
Slika 36. Sile otpora terenaca

Na slici 37 dana je ukupna sila pogona terenaca dobivena zbrojem sila prikazanih na slici 36. Ona varira u intervalu od -4100 do +5600 N.



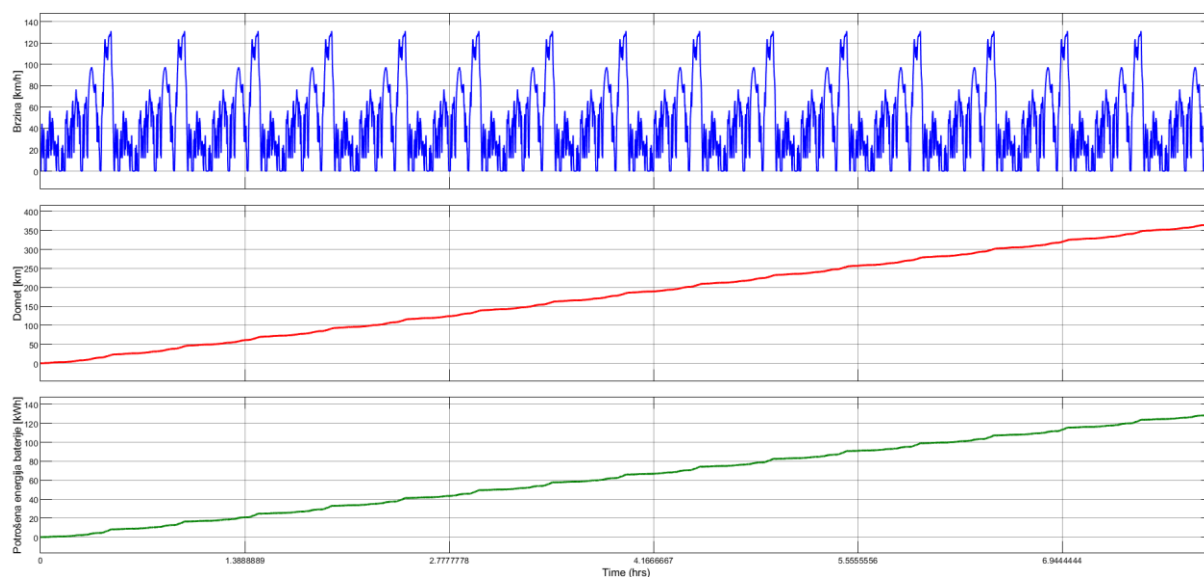
Slika 37. Sila pogona terenaca

Na slici 38 je prikazan moment, brzina vrtnje i potrebna pogonska snaga terenaca. Može se vidjeti da se moment (plava krivulja na slici 38) kreće u intervalu od -800 do +1100 Nm te kako se brzina (crvena krivulja na slici 38) kreće u intervalu 0 do 175 rad/s. Njihov umnožak daje potrebnu pogonsku snagu koja je prikazana zelenom krivuljom na slici 38. Ona se kreće u intervalu od -47 do 125 kW. Pozitivan iznos snage prazni bateriju dok negativan iznos nadopunjuje.



Slika 38. Moment, brzina vrtnje i snaga terenaca

Na slici 39. prikazan je domet i potrošena energija baterije za ponavljajući WLTP vozni ciklus za terence. Brzina ponavljajućeg ciklusa dana je na slici 39 krivuljom plave boje. Maksimalna brzina koju vozilo ostvaruje je 130 km/h. Dalje se iz dijagrama može vidjeti da vozilo sa svojim kapacitetom od 131 kWh može voziti nešto više od 7 sati i 30 minuta (zeleno krivulja na slici 39) te može ostvariti domet od 368,9 km (crvena krivulja na slici 39).



Slika 39. Brzina, domet i potrošena energija baterije terenaca

5. Utjecaj mase baterije na nosivost električnog vozila

U ovom poglavlju se svim razmatranim vozilima inkrementalno povećava masa baterije te se i za isti iznos smanjuje nosivost do nekakve minimalne vrijednosti. Odabrana minimalna vrijednost nosivosti iznosi 200 kg, tj. masa dvije osobe.

5.1. Jedinični kapaciteti baterija

Dobivanje jediničnog kapaciteta baterije je vrlo jednostavno. On je jednak dijeljenju kapaciteta baterije sa masom baterije. Kako minimalna nosivost iznosi 200 kg, bit će različiti intervale izgubljene nosivosti. Npr. nosivost Renault-a ZOE-a je 486 kg, dakle, 286 kg možemo najviše izgubiti kako bi maksimalno povećali masu/kapacitet baterije, odnosno, kada se taj broj podijeli sa 4 dobijemo 71,5 kg. Toliko iznosi povećanje mase baterije 1, dok iznos kapaciteta baterije takve mase iznosi 11,405 kWh. Jedinični kapaciteti zajedno sa iznosima povećanih kapaciteta baterije (4) su prikazani u tablici ispod:

Tablica 3. Jedinični kapaciteti baterija zajedno sa novim masama i kapacitetima baterija

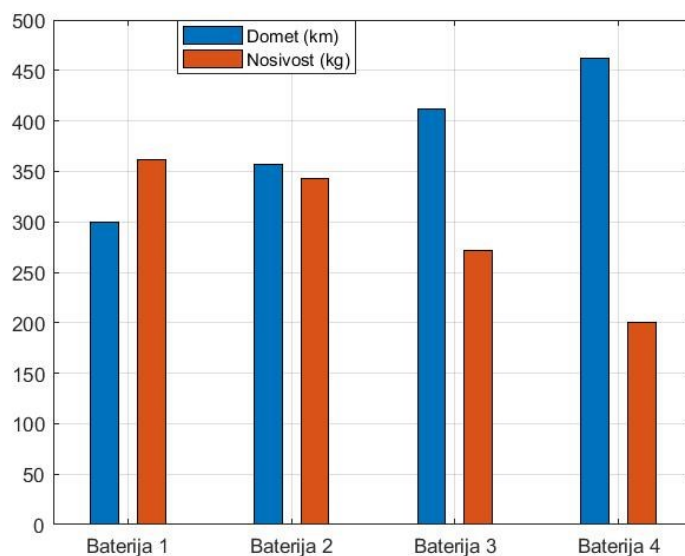
Kategorija	Predstavnik	Jedinični kapacitet baterije [kWh/kg]	Kapacitet /masa baterije 1 [kWh]/[kg]	Kapacitet /masa Baterije 2 [kWh]/[kg]	Kapacitet /masa baterije 3 [kWh]/[kg]	Kapacitet /masa baterije 4 [kWh]/[kg]
Kompaktna i gradska vozila	Renault Zoe	0,1595092	63,41/397,5	74,81/469	86,22/540,5	97,62/612
Kompaktni SUV-ovi	Hyundai Kona Electric	0,1409692	75,35/534,5	86,7/615	98,04/695,5	109,39/776
Srednje veliki SUV-ovi	Tesla Model y	0,0974026	83,26/854,8	91,51/939,5	99,77/1024,3	108,02/1109
Limuzine	Tesla Model 3	0,1627083	87,58/538,3	97,06/596,5	106,53/654,7	116,01/713
Terenci	Ford F-150 Lightning	0,1597561	159,24/996,8	187,47/1173,5	215,71/1350,2	243,95/1527

5.2. Simulacijski rezultati vozila sa različitim kapacitetima baterije

U ovom poglavlju se pregledavaju rezultati simulacije, tj. pokazuje se koliki je zapravo utjecaj smanjivanja nosivosti na domet, odnosno, koliko se domet poveća sa većom masom i većim kapacitetom baterije.

5.2.1. Domet i nosivost kompaktnih i gradskih vozila sa različitim kapacitetima baterije

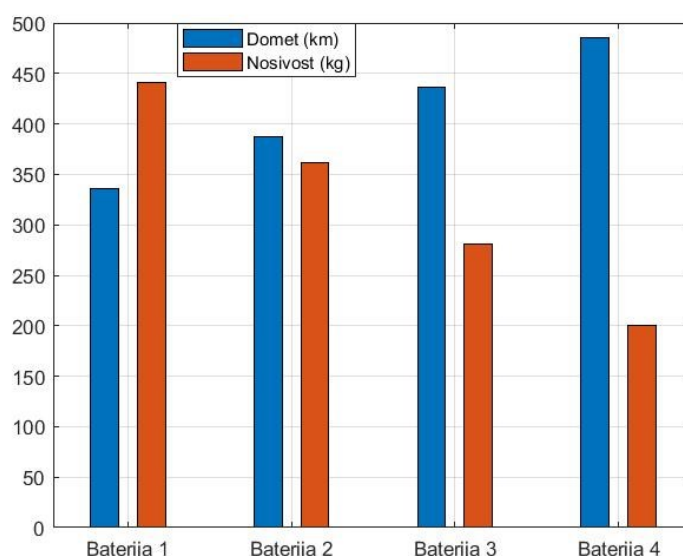
Na slici 40 je prikaz dometa i nosivosti kompaktnih i gradskih vozila s različitim kapacitetima baterija. Baterija 1 je ostvarila domet od 300 km s dostupnom nosivošću od 361,5 kg. Baterija 2 je ostvarila veći domet iznosa 356,9 km pri kojem je iznos dostupne nosivosti iznosio 343 kg. Baterija 3 je ostvarila domet od 411,4 km dok se iznos dostupne nosivosti smanjio na 271,5 kg. Baterija 4 je ostvarila najveći domet iznosa 462,5 km te je imala najmanju dostupnu nosivost od 200 kg.



Slika 40. Domet i nosivost kompaktnih i gradskih vozila sa različitim kapacitetima baterija

5.2.2. *Domet i nosivost kompaktnih sportskih terenskih vozila sa različitim kapacitetima baterije*

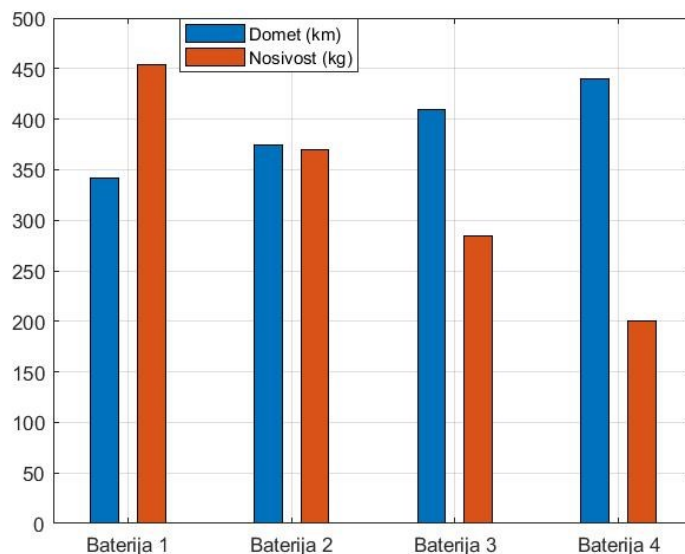
Na slici 41 je prikaz dometa i nosivosti kompaktnih SUV-ova s različitim kapacitetima baterija. Baterija 1 je ostvarila domet od 336,3 km s dostupnom nosivošću od 441,5 kg. Baterija 2 je ostvarila veći domet iznosa 387,6 km pri kojem je iznos dostupne nosivosti iznosio 361 kg. Baterija 3 je ostvarila domet od 436,7 km dok se iznos dostupne nosivosti smanjio na 280,85 kg. Baterija 4 je ostvarila najveći domet iznosa 485,7 km te je imala najmanju dostupnu nosivost od 200 kg.



Slika 41. Domet i nosivost kompaktnih SUV-ova sa različitim kapacitetima baterije

5.2.3. *Domet i nosivost srednje velikih sportskih terenskih vozila sa različitim kapacitetima baterije*

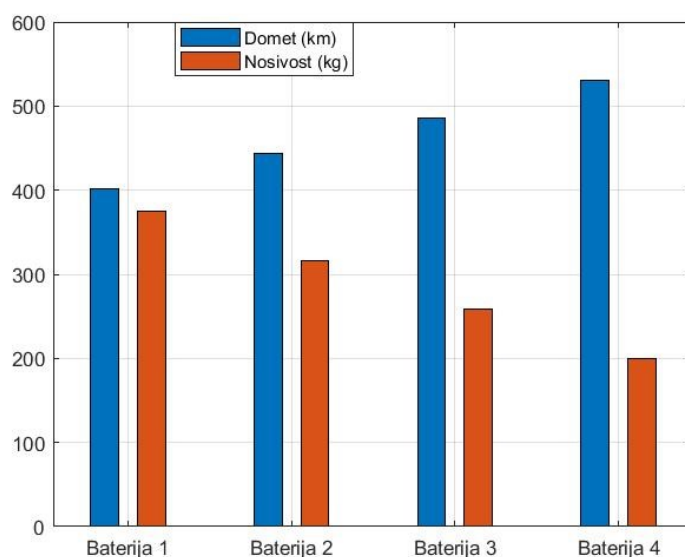
Na slici 42 je prikaz dometa i nosivosti srednje velikih SUV-ova s različitim kapacitetima baterija. Baterija 1 je ostvarila domet od 341,9 km s dostupnom nosivošću od 454,2 kg. Baterija 2 je ostvarila veći domet iznosa 374 km pri kojem je iznos dostupne nosivosti iznosio 369,5 kg. Baterija 3 je ostvarila domet od 409,2 km dok se iznos dostupne nosivosti smanjio na 284,7 kg. Baterija 4 je ostvarila najveći domet iznosa 440 km te je imala najmanju dostupnu nosivost od 200 kg.



Slika 42. Domet i nosivost srednje velikih SUV-ova sa različitim kapacitetima baterije

5.2.4. Domet i nosivost limuzina sa različitim kapacitetima baterije

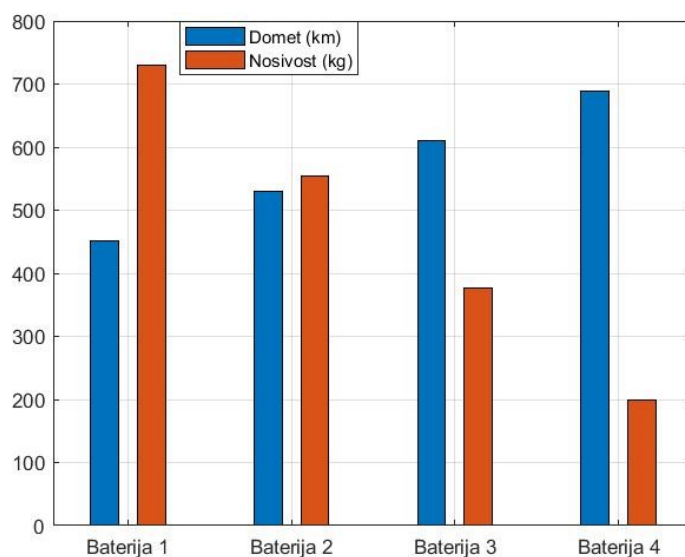
Na slici 43 je prikaz dometa i nosivosti limuzina s različitim kapacitetima baterija. Baterija 1 je ostvarila domet od 401,2 km s dostupnom nosivošću od 374,7 kg. Baterija 2 je ostvarila veći domet iznosa 443,7 km pri kojem je iznos dostupne nosivosti iznosio 316,5 kg. Baterija 3 je ostvarila domet od 485,9 km dok se iznos dostupne nosivosti smanjio na 258,3 kg. Baterija 4 je ostvarila najveći domet iznosa 530,6 km te je imala najmanju dostupnu nosivost od 200 kg.



Slika 43. Domet i nosivost limuzina sa različitim kapacitetima baterije

5.2.5. Domet i nosivost terenaca sa različitim kapacitetima baterije

Na slici 44 je prikaz dometa i nosivosti terenaca s različitim kapacitetima baterija. Baterija 1 je ostvarila domet od 450,6 km s dostupnom nosivošću od 730,2 kg. Baterija 2 je ostvarila veći domet iznosa 529,3 km pri kojem je iznos dostupne nosivosti iznosio 553,5 kg. Baterija 3 je ostvarila domet od 609,4 km dok se iznos dostupne nosivosti smanjio na 376,5 kg. Baterija 4 je ostvarila najveći domet iznosa 688,3 km te je imala najmanju dostupnu nosivost od 200 kg.



Slika 44. Domet i nosivost terenaca sa različitim kapacitetima baterije

6. Diskusija rezultata simulacija

Nakon provedenih simulacija rezultati su bili dosta zanimljivi. Radi preglednosti su rezultati simulacije (domet i nosivost) prikazani u tablici 4 zajedno sa originalnom baterijom te sa baterijama različitih kapaciteta/masa.

Tablica 4. Rezultati simulacija

Kategorija	Domet/nosivost sa originalnom baterijom [km]/[kg]	Domet/nosivost sa baterijom 1 [km]/[kg]	Domet/nosivost sa baterijom 2 [km]/[kg]	Domet/nosivost sa baterijom 3 [km]/[kg]	Domet/nosivost sa baterijom 4 [km]/[kg]
Kompaktna i gradska vozila	248,8/486	300/361,5	356,9/343	411,4/271,5	462,5/200
Kompaktni SUV-ovi	285,7/522	336,3/441,5	387,6/361	436,7/280,85	485,7/200
Srednje veliki SUV-ovi	307,3/539	341,9/454,2	374/369,5	409,2/284,7	440/200
Limuzine	358,5/433	401,2/374,7	443,7/316,5	485,9/258,3	530,6/200
Terenci	368,9/907	450,6/730,2	529,3/553,5	609,4/376,5	688,3/200

Kao što se može zaključiti iz tablice 4., prema simulacijskim rezultatima potvrđeno je da ako se poveća kapacitet, odnosno masa baterije, da će se poboljšati i vozna svojstva po pitanju dometa. Zaista se dobila nekakva linearna ovisnost mase baterije o (u ovom slučaju) dometu, ali objektivno gledajući, ta linearna ovisnost isto dolazi do svoga kraja. U primjeru terenca (u odnosu na kompaktno i gradsko vozilo), gdje se skoro udvostručila masa baterije i njen kapacitet, domet se poboljšao za samo jednu petinu. Dakle, ako bi se udvostučila masa baterije, domet bi ili ostao približno isti ili bi se krenuo smanjivati radi raznih utjecaja, najviše radi težine. Što se tiče novih kapaciteta baterija, vidi se veliki utjecaj na domet i na nosivost. U tablici 4 se jasno vidi veliko povećanje dometa, ali još veće smanjivanje nosivosti. Četvrta baterija u usporedbi s prvom (npr. kod terenaca) je ostvarila 1.5 puta veći domet, ali je imala 4.5 puta manju nosivost. Dakle, veći je gubitak nosivosti od dobitka dometa.

7. ZAKLJUČAK

U radu je odabrano pet različitih kategorija vozila te je prema javno dostupnim podacima napravljen pregled i odabir pet vozila različitih kategorija dostupnih na tržištu. Za navedena vozila izdvojeni su parametri u pogledu dometa, nosivosti, mase vozila i baterije. U programskom okruženju Matlab Simulink izrađen je jednostavan kvazistatički skalabilni računalni model koji je korišten za izračun ostvarenog dometa na certificiranom WLTP ciklusu za različite vrijednosti mase baterije. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako će porastom mase baterije proporcionalno rasti i domet, dok će porastom mase baterije značajno padati iznos nosivosti. Rezultati dodatno prikazuju da postoji ograničenje do kojeg se može povećavati masa baterije koja osigurava domet vozila, a da pri tome nosivost ne bude značajno smanjena uz konstantnu masu vozila.

LITERATURA

- [1] <https://autoportal.hr/vremeplov/do-1908-elektricni-su-automobili-bili-napredniji-i-perspektivniji-od-benzinskih> (25.7.2024.)
- [2] <https://blog.upsbatterycenter.com/robert-anderson-19th-century-scottish-inventor/> (25.7.2024.)
- [3] <https://www.britannica.com/biography/Gaston-Plante> (25.7.2024.)
- [4] <https://iowahistoryjournal.com/an-electrifying-iowan/> (25.7.2024.)
- [5] <https://epunjaci.hr/2021/11/25/povijest-i-buducnost-elektricnih-automobila/> (26.7.2024.)
- [6] <https://corporate.ford.com/articles/history/the-model-t.html> (26.7.2024.)
- [7] <https://www.macsmotorcitygarage.com/yet-another-general-motors-ev-experiment-1979-electrovette/> (26.7.2024.)
- [8] <https://www.caranddriver.com/news/a36887553/gm-ev1-electric-car-technology/> (26.7.2024.)
- [9] <https://mag.toyota.co.uk/history-toyota-prius/> (26.7.2024.)
- [10] <https://www.autoevolution.com/tesla-motors/> (26.7.2024.)
- [11] <https://www.nissan-global.com/EN/STORIES/RELEASES/nissan-leaf-10years/> (26.7.2024.)
- [12] <https://global.toyota/en/prius20th/evolution/> (29.7.2024.)
- [13] <https://www.besen-group.com/hr/what-are-the-different-types-of-evs/> (29.7.2024.)
- [14] <https://www.ev-trgovina.com/elektricna-vozila/vrste-elektricnih-vozila-tipovi-elektro-automobila/> (29.7.2024.)
- [15] <https://epunjaci.hr/2022/01/05/kako-rade-potpuno-elektricni-automobili/> (29.7.2024.)
- [16] Chenyun Wu, Rabia Sehab, Ahmad Akrad, Cristina Morel. Fault Diagnosis Methods and Fault Tolerant Control Strategies for the Electric Vehicle Powertrains, 2022,
- [17] <https://enciklopedija.hr/clanak/elektricni-motor> (29.7.2024.)
- [18] <https://media.istockphoto.com/id/1204683816/photo/integrated-electric-car-drive-module-with-automatic-transmission.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=c0vgG0SQxWbTX6TiXZy3Ffl85g2RzfNg7uvjM8QqLb0=> (29.7.2024.)

- [19] <https://www.audi.hr/e-mobilnost/elektricni-automobil> (15.8.2024.)
- [20] <https://www.audi.hr/q4/q4-e-tron/fascinacija> (15.8.2024.)
- [21] [https://www.oryx-asistencija.hr/savjeti-za-vozace/aktualno/sve-o-baterijama-za-
elektricna-vozila-14555](https://www.oryx-asistencija.hr/savjeti-za-vozace/aktualno/sve-o-baterijama-za-elektricna-vozila-14555) (15.8.2024.)
- [22] [https://rent-a-tesla.hr/2024/04/10/elektricne-baterije-vodic-za-odrzivu-
buducnost/?lang=hr](https://rent-a-tesla.hr/2024/04/10/elektricne-baterije-vodic-za-odrzivu-buducnost/?lang=hr) (18.8.2024.)
- [23] Larminie J.; Lowry J.: Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons LTD, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2003.
- [24] [https://lidermedia.hr/zeleno-i-digitalno/papreno-cijena-nove-litij-ionske-baterije-
moze-iznositi-cak-25-tisuca-dolara-153672](https://lidermedia.hr/zeleno-i-digitalno/papreno-cijena-nove-litij-ionske-baterije-moze-iznositi-cak-25-tisuca-dolara-153672) (18.8.2024.)
- [25] <https://ev-database.org/uk/car/1164/Renault-Zoe-ZE50-R110> (18.8.2024.)
- [26] <https://www.carscoops.com/tag/renault-zoe/> (18.8.2024.)
- [27] <https://www.evspecs.org/technical-data/renault/zoe/weight> (18.8.2024.)
- [28] <https://www.batterydesign.net/renault-zoe/> (18.8.2024.)
- [29] <https://hyundai.hr/modeli/nova-hyundai-kona-ev/znacajke/> (22.8.2024.)
- [30] <https://www.topgear.com/car-reviews/hyundai/kona-electric> (22.8.2024.)
- [31] <https://ev-database.org/car/1830/Hyundai-Kona-Electric-65-kWh> (22.8.2024.)
- [32] <https://www.recurrentauto.com/guides/tesla-model-y> (24.8.2024.)
- [33] <https://www.tesla.com/modely> (24.8.2024.)
- [34] <https://blog.evbox.com/ev-battery-weight> (24.8.2024.)
- [35] <https://ev-database.org/car/1619/Tesla-Model-Y-Long-Range-Dual-Motor>
(24.8.2024.)
- [36] <https://evbox.com/en/electric-cars/tesla/tesla-model-3> (24.8.2024.)
- [37] [https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/GUID-877ACE2D-B62F-4596-
A6AD-A74F7905741C.html](https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/GUID-877ACE2D-B62F-4596-A6AD-A74F7905741C.html) (24.8.2024.)
- [38] <https://getevgas.com/blogs/electric-car-battery-weight/> (24.8.2024.)
- [39] <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3> (24.8.2024.)
- [40] <https://www.caranddriver.com/ford/f-150-lightning> (25.8.2024.)
- [41] <https://www.ford.ca/trucks/f150/f150-lightning/models/f150-xt/> (25.8.2024.)

-
- [42] <https://www.theverge.com/2023/6/6/23749844/ford-f150-lightning-payload-range-loss-aaa> (25.8.2024.)
- [43] <https://www.motortrend.com/reviews/2022-ford-f-150-lightning-lariat-yearlong-review-update-11-road-trip-nightmare/> (25.8.2024.)
- [44] <https://www.volkswagen.hr/wltp> (25.8.2024.)
- [45] <https://www.volkswagen.hr/wltp/pregled-wltp-ciklusa> (25.8.2024.)
- [46] <https://www.tportal.hr/autozona/clanak/znete-li-sto-je-wltp-ovo-je-sve-sto-trebate-znati-o-novom-ispitnom-postupku-za-laka-vozila-foto-20201210> (25.8.2024.)
- [47] <https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle-simulink-block> (10.7.2024.)