UNIVERZA V MARIBORU

FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Jan PAVLIČIČ

NUMERIČNA PRIMERJAVA OKOLJSKEGA VPLIVA VOZILA NA ELEKTRIČNI IN KONVENCIONALNI POGON

Diplomsko delo

univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje

Strojništvo

Maribor, maj 2022

Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

NUMERIČNA PRIMERJAVA OKOLJSKEGA VPLIVA VOZILA NA ELEKTRIČNI IN KONVENCIONALNI POGON

Diplomsko delo

Študent:	Jan Pavličič
Študijski program:	univerzitetni študijski program 1. stopnje Strojništvo
Smer:	Energetsko, procesno in okoljsko strojništvo
Mentor:	doc. dr. Luka LEŠNIK
Somentor:	prof. dr. Breda KEGL

Maribor, maj 2022

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Luki Lešniku in somentorici prof. dr. Bredi Kegl za vso potrpežljivost, vztrajnost, pomoč, vložen čas in trud ter vodenje pri opravljanju diplomskega dela.

Posebna zahvala gre tudi prijateljem in družini, ki ste me podpirali, mi omogočali študij in mi stali ob strani kot moralna podpora.

Numerična primerjava okoljskega vpliva vozila na električni in konvencionalni pogon

Ključne besede: električno vozilo, konvencionalno vozilo, numerična primerjava, okoljski vpliv vozil

UDK: 519.876.5:[504.5:629.3-83/84](043.2)

POVZETEK

V tem diplomskem delu se posvetimo numerični analizi okoljskega vpliva dveh namišljenih, na videz enakih vozil; električnega in konvencionalnega. Zanima nas, kateri pogon je okolju bolj prijazen in kolikšna je dejanska razlika med onesnaževanjem teh vozil.

Najprej smo pripravili teoretično podlago za numerično simulacijo, ki smo jo kasneje izvedli. Pripravili smo namišljen vozni cikel, po katerem smo simulirali vožnjo obeh modelov vozil. Rezultate smo primerjali med seboj in ugotovili, da je električno vozilo res čistejše od konvencionalnega, vendar je razlika veliko manjša, kot smo na začetku predpostavili.

Numeric comparison of an electric and internal combustion engine vehicle's environmental impact

Keywords: electric vehicle, combustion engine vehicle, numeric comparison, environmental impact

UDK: 519.876.5:[504.5:629.3-83/84](043.2)

ABSTRACT

In this diploma, we numerically compared the environmental impacts of two theoretical, visually-identical vehicles: one electric and one powered by a conventional engine. The aim was to determine which vehicle would be more environmentally friendly if manufactured and by how much. For this goal, we had to first explain the theory of both drives and set the bases for our numeric simulation. We programmed a random driving cycle in which we simulated the two vehicles driving through. We then compared the results of each simulation and determined that an electric vehicle is more eco-friendly, in this case, but the actual difference was much smaller than anticipated.

Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo
(ime članice UM)

IZJAVA O AVTORSTVU ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študenta/-ke: Jan Pavličič

Študijski program: STROJNIŠTVO

Naslov zaključnega dela: Numerična primerjava okoljskega vpliva vozila na električni in konvencionalni pogon

Mentor/-ica: Luka Lešnik

Somentor/-ica: Breda Kegl

Podpisani/-a študent/-ka Jan Pavličič

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega samostojnega dela, ki sem ga izdelal/-a ob pomoči mentorja/-ice oz. somentorja/-ice;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM; sem seznanjen/-a, da bodo dela, deponirana/objavljena v DKUM, dostopna široki javnosti pod pogoji licence Creative Commons BY-NC-ND, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v zaključnem delu in tej izjavi, skupaj z objavo zaključnega dela.

Uveljavljam permisivnejšo obliko licence Creative Commons: _____
(*navedite obliko*)

Kraj in datum: Maribor, 11.05.2022

Podpis študenta/-ke: _____

Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Številka: 42-196-334/2022
Kraj in datum: MARIBOR, 11.05.2022

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Uradni list RS, št. 41/2021-UPB13) izdajam

SKLEP O ZAKLJUČNEM DELU

JAN PAVLIČIČ, študent/-ka študijskega programa 1. stopnje UN STROJNIŠTVO, smer ENERGETSKO, PROCESNO IN OKOLJSKO STROJNIŠTVO, izpolnjuje predpisane pogoje in se mu/ji dovoljuje izdelati zaključno delo.

Tema zaključnega dela je pretežno s področja katedre/oddelka/inštituta: KATEDRA ZA ENERGETSKO, PROCESNO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO.

Mentorji:

doc. dr. LUKA LEŠNIK, univ. dipl. inž. str., mentor/-ica
red. prof. dr. BREDA KEGL, univ. dipl. inž. str., somentor/-ica

Naslov zaključnega dela:
Numerična primerjava okoljskega vpliva vozila na električni in konvencionalni pogon

Naslov zaključnega dela v angleškem jeziku:
Numeric Comparison of an Electric and Internal Combustion Engined Cars Environmental Impact

Rok za izdelavo in oddajo zaključnega dela je 11.05.2023. Zaključno delo je potrebno izdelati skladno z navodili: *Navodila za pripravo zaključnega dela 1. in 2. stopnje FS*, in ga oddati v pristojnem referatu članice. Število izvodov: 1. Hkrati se odda tudi izjava mentorja/-ice (in morebitne/-ga somentorja/-ice) o ustreznosti zaključnega dela.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat članice v roku 10 delovnih dni od dneva prejema sklepa.

red. prof. dr. Bojan Dolšak, dekan

UNIVERZA V MARIBORU FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO 15

Obvestiti:
- kandidata/-ko,
- mentorja/-ico,
- somentorja/-ico,
- arhiv.

KAZALO VSEBINE

1. UVOD ... 1

1.1. Predstavitev teme ... 1

1.2. Namen, cilji in teze ... 2

1.3. Predpostavke in omejitve ... 2

1.4. Struktura diplomskega dela ... 3

1.5. Razmišljanje o problemu ... 4

2. ZGODOVINA IN PRIMERJAVA POGONOV ... 5

2.1. Zgodovina in razvoj motorja z notranjim zgorevanjem za uporabo v vozilih ... 5

2.2 Zgodovina in razvoj električnega pogona in vozil ... 7

2.3. Primerjava obeh pogonov ... 9

3. EKOLOŠKA PROBLEMATIKA ... 11

3.1. Ekološka problematika motorja z notranjim zgorevanjem ... 12

3.2. Ekološka problematika električnih vozil ... 14

4. SIMULACIJA V AVL CRUISE ... 17

4.1. Vozni cikel ... 19

4.2. Simulacija za vozilo na konvencionalni pogon ... 20

4.3. Simulacija za vozilo na električni pogon ... 24

5. REZULTATI SIMULACIJE ... 30

5.1. Rezultati simulacije za vozilo na bencinski pogon ... 30

5.2. Rezultati simulacije za vozilo na električni pogon ... 31

5.3. Opredelitev in obrazložitev rezultatov ... 33

6. DISKUSIJA ... 34

7. SKLEP ... 35

8. SEZNAM VIROV ... 37

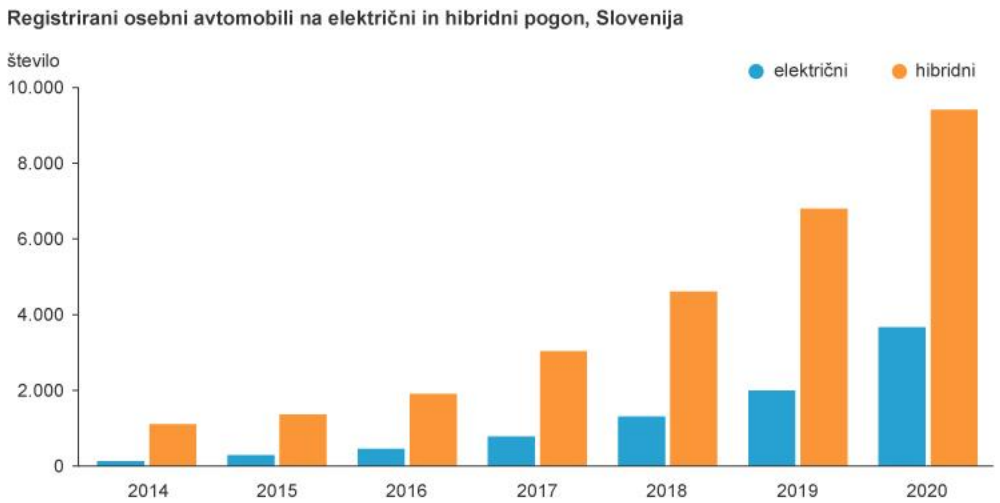
KAZALO SLIK

Slika 1.1 Električna in hibridna osebna vozila v Sloveniji [1] 1
Slika 2.1 Benz Patent-Motorwagen iz leta 1886 [6] 5
Slika 2.2 La Jamais Contente [8] 7
Slika 2.3 Tesla Roadster iz leta 2008 [9] 8
Slika 3.1 Svetovne emisije CO_2 skozi čas 11
Slika 3.2 Delež virov za proizvodnjo elektrike za Energijo Plus d. o. o. v letu 2020 15
Slika 4.1 Parametri (namišljenega) voznega cikla vozil 17
Slika 4.2 Model vozila na bencinski pogon 18
Slika 4.3 Model vozila na električni pogon 18
Slika 4.4 Nadmorska višina in naklonina simulirane poti 19
Slika 4.5 Parametri modela vozila na konvencionalni pogon 20
Slika 4.6 Parametri sklopke 20
Slika 4.7 Parametri menjalnika 21
Slika 4.8 Prestavno razmerje pogonske osi 22
Slika 4.9 Osnovni parametri motorja 22
Slika 4.10 Krivulja moči motorja 23
Slika 4.11 Diagram porabe motorja 24
Slika 4.12 Parametri modela električnega vozila 25
Slika 4.13 Prestavno razmerje pogonske osi 25
Slika 4.14 Osnovni parametri elektromotorja 26
Slika 4.15 Krivulja navora elektromotorja pri U = 200 V 27
Slika 4.16 Krivulja navora elektromotorja pri U = 500 V 27
Slika 4.17 Diagram izkoristka elektromotorja 28
Slika 4.18 Osnovni parametri baterije 28
Slika 4.19 Karakteristika baterije med polnjenjem in praznjenjem 29
Slika 5.1 Rezultati simulacije vozila na bencinski pogon 30
Slika 5.2 Rezultati simulacije za električno vozilo 31

1. UVOD

1.1. Predstavitev teme

V Sloveniji je bilo v letu 2020 registriranih 53.880 novih osebnih avtomobilov. 1.616 oziroma 3 % teh je za pogon uporabljalo električno energijo. Ta številka se ne zdi tako velika, kot bi si mislili, glede na to, koliko sredstev se na svetu vlaga v električno mobilnost. Če pa dodamo še, da se je ta številka, v primerjavi s tisto iz prejšnjega leta, povečala za 147 % [1], vidimo, da se priljubljenost električnih avtomobilov parabolično dviga. Rast števila registracij električnih in hibridnih vozil v Sloveniji lahko vidimo na sliki 1.1. Prvič v zgodovini avtomobilske industrije se je zgodilo, da je konvencionalni pogon na motor z notranjim zgorevanjem (MNZ) dobil vabljivega konkurenta in potrošnik alternativo. In to je vozilo na električni pogon.



Slika 1.1 Električna in hibridna osebna vozila v Sloveniji [1]

Na prvi pogled se zdi, kot da se motorjem z notranjim zgorevanjem, vsaj kot pogonu za osebna motorna vozila, bliža konec. Električni pogon ima večji izkoristek; do 77 % električne energije, ki jo dobi iz omrežja, se v električnem avtomobilu izkoristi za pogon vozila. V vozilih, ki jih žene MNZ, pa se za pogon vozila izkoristi le do 30 % energije, shranjene v gorivu. [2] Električni pogon je tih in »čist«, proizvodnja in vzdrževanje sta preprostejša in cenejša. Voznik lahko instantno dostopa do maksimalne moči elektromotorja, ne glede na to, s kakšno hitrostjo vozi in kakšna je trenutna vrtilna hitrost motorja. Elektromotorji omogočajo veliko večje moči kot MNZ enake velikosti (govorim o fizični velikosti motorja, ne o delovni prostornini), torej je lahko prostor v

osebnem avtomobilu dosti boljše izkoriščen. Zdi se torej, kot da električni pogon, vsaj v ekološkem smislu, lahko pometa s konvencionalnim. Pa je res vse tako črno-belo? Je konvencionalni pogon na motor z notranjim zgorevanjem povozil čas?

Dobro vemo, kako preobremenjen je naš planet. Človeštvo mora, če želi preživeti, spremeniti svoje načine in močno zmanjšati onesnaževanje. V zadnjih letih se ogromno stavi na električni pogon kot potencialno rešitev za zmanjšanje naših emisij, posebej ogljikovih. So električna vozila res toliko čistejša od konvencionalnih? To je vprašanje, na katero bomo skušali odgovoriti skozi diplomsko delo.

1.2. Namen, cilji in teze

Glavni namen diplomskega dela je ugotoviti, ali je električno vozilo res čistejša alternativa konvencionalnemu vozilu. Če je, želimo ugotoviti tudi, kolikšna je dejanska razlika v emisijah med vozili, saj ne verjamemo, da električna vozila ne onesnažujejo okolja.

Sklepamo, da je električni avtomobil res nekoliko čistejši, saj drugače trg električnih avtomobilov ne bi tako hitro rastel. A ne verjamemo, da je dejanska razlika med emisijami električnih in konvencionalnih vozil tako drastična.

Cilji diplomskega dela so:

- raziskati, kako čista je električna energija, s katero polnimo električna vozila;
- izdelati numerična modela za električno in konvencionalno vozilo;
- simulirati oba modela skozi namišljen vozni cikel;
- ugotoviti realno razliko med pogonoma v ekološkem smislu.

1.3. Predpostavke in omejitve

V tem diplomskem delu bomo izhajali iz predpostavke, da se bo električno vozilo izkazalo za čistejše od konvencionalnega. Menimo, da so sodobne elektrarne čistejše od konvencionalnega motorja z notranjim zgorevanjem. Mislimo, da bo tudi, ko bomo upoštevali emisije v proizvodnji elektrike, električno vozilo vseeno za sabo pustilo manjši ogljični odtis.

Se bomo pa v diplomskem delu omejili na emisije, ki so povezane le s pogonom vozila. Ne bomo upoštevali emisij, nastalih med proizvodnjo in razgradnjo vozila, razen emisij CO_2, ki nastanejo pri proizvodnji baterij. Ne bomo upoštevali emisij, ki so posledica gum, zavornih ploščic, proizvodnje motornih olj in drugih tekočin. Ne bomo upoštevali škodljivih kemikalij in z njimi povezanih emisij, s katerimi imamo opravka pri reciklaži/proizvodnji baterije. Omejeni bomo tudi z lokacijo. Vzeli bomo podatke za emisije proizvodnje in dobave elektrike za Slovenijo, saj so za nas aktualni. Morda bi bili rezultati drugačni, če bi se ravnali po neki drugi državi. Omejeni smo tudi na en model vozila, ki je vozil le po enem voznem ciklu. Rezultati simulacije bi bili drugačni za kakšen drug model vozila in posledično bi lahko bila tudi ugotovitev drugačna.

1.4. Struktura diplomskega dela

V uvodnem delu diplomskega dela je najprej predstavljen problem diplomskega dela. Temu sledita kratka zgodovina pogonov in primerjava med pogonoma. Diplomsko delo se v nadaljevanju posveti ekološki problematiki obravnavanih pogonov in postavi temelje za primerjavo pogonov med seboj. Sledi poglavje, v katerem so predstavljeni parametri simulacij, s katerimi je bila simulirana vožnja obeh vozil skozi enak vozni cikel. V petem poglavju so predstavljeni rezultati, do katerih se opredelimo ter določimo, kateri pogon je dejansko čistejši za obravnavan primer. Na koncu pa je dodanih še nekaj lastnih misli, lastnega razmišljanja o ugotovitvah ter poteku diplomskega dela.

1.5. Razmišljanje o problemu

Ko govorimo o problematiki električnih vozil, imamo po navadi dve skupini ljudi:

- tiste, ki električni pogon zelo privrženo in zvesto zagovarjajo in
- tiste, ki mu s skoraj enako strastjo nasprotujejo.

Zanimivo je, da je električni pogon tako polarizacijski. Redko naletimo na koga, ki ima o temi že razvito mnenje in mu strogo ne nasprotuje oziroma ga strogo ne podpira. Sami smo bili bolj v sredini, nagibajoč se konvencionalnemu pogonu. Izkusili smo, kako impresivni so lahko električni avtomobili in kaj zmorejo, vendar še vedno nismo bili navdušeni nad njimi. Motilo nas je tudi, da če smo želeli napolniti baterijo, smo morali čakati vsaj desetkrat toliko časa, kot bi porabili na bencinski postaji. Vendar vidimo potencial. Ko smo začeli razmišljati o temi kot temi diplomskega dela, smo bili bolj na strani motorja z notranjim zgorevanjem. Mislili smo, da električna vozila še niso pripravljena na masovno uporabo in da nas do tja čaka še dolga pot. Potem pa smo se začeli podrobneje izobraževati o električnih vozilih in o pogonu ter ugotovili, da je situacija nekoliko drugačna. Električna vozila so s podporo in težnjo velikih držav v zadnjih parih letih prišla zelo daleč. Na praktično vsaki sodobni bencinski postaji že imamo hitre električne polnilce, kjer vedno stoji (in se tudi polni) kakšen avto. V mestih so parkirni prostori, ki jih lahko električni avtomobili koristijo brezplačno. Tudi ti imajo vedno kakšnega obiskovalca. V večjih mestih po Evropi so cone, kamor lahko vstopamo in vozimo le z električnim vozilom (oziroma hibridnim, če omogoča vožnjo le na električni pogon). Menimo, da je električni pogon neizogiben del naše prihodnosti. Še vedno pa nismo prepričani, ali je električni pogon z ekološkega vidika toliko primernejši za uporabo kot konvencionalni pogon. Večina svetovne elektrike je žal še vedno pridobljena iz fosilnih goriv, proizvodnja baterij oziroma akumulatorjev je še vedno eden najbolj umazanih procesov v sodobni industriji in navsezadnje tudi vzpostavitev primerne infrastrukture ni najčistejši proces. Pričakujemo, da bosta rezultata simulacije in preračuna zelo blizu. Mislimo, da bi, če bi isto simulacijo izvedli čez pet let, rezultat kazal v prid električnega pogona.

2. ZGODOVINA IN PRIMERJAVA POGONOV

2.1. Zgodovina in razvoj motorja z notranjim zgorevanjem za uporabo v vozilih

Prvi motor z notranjim zgorevanjem, ki je bil namenjen za opravljanje mehanskega dela za potrebe črpanja vode iz rudnika, je bil izdelan v 17. stoletju.

Nato je leta 1860 Lenoir zgradil prvi plinski motor. Izkoristek njegovega motorja je bil med 4 in 5 % pri močeh med 1 in 2 kW. Za moč 1,5 kW je potreboval 18 l delovne prostornine. Torej je 1 l prostornine nudil 0,083 kW moči. [3] Če to primerjamo z najboljšim, kar premoremo zdaj – to je verjetno motor dirkalnika F1, ki naj bi premogel kar 649 kW s samo 1,6 l delovne prostornine (405,625 kW na 1 l prostornine) [4] – vidimo, kako daleč smo prišli.
Sedem let kasneje (leta 1867) je Otto s plinskim motorjem s prosto gibljivim batom dosegel bistveno boljši izkoristek; okrog 10 %. Boljši izkoristek je bil neposredna posledica višjega kompresijskega razmerja. [5]

Še devet let kasneje (leta 1876) pa je Otto patentiral prvi motor z notranjim zgorevanjem, sposoben za trajno delo. Niti 10 let za tem pa so leta 1886 pri Benzu in Daimler/Maybachu istočasno, vendar medsebojno neodvisno, izdelali prvi avtomobil, ki ga je gnal bencinski (Ottov) motor. Benzov je viden na sliki 2.1.

Slika 2.1 Benz Patent-Motorwagen iz leta 1886 [6]

Nekoliko kasneje, nekje med letoma 1892 in 1893, pa je Diesel vložil vlogo za patent za motor, kjer se čisti zrak najprej visoko komprimira, gorivo pa se v valj vbrizga naknadno. Tako pride do samovžiga, v primerjavi z Ottovim motorjem, kjer govorimo o prisilnem vžigu. Diesel je dosegel višjo kompresijo in imel posledično tudi višji izkoristek. Dizelski motor še do danes velja za toplotni stroj z najboljšim izkoristkom energije. [5]

Najpriljubljenejša sodobna izvedba motorja s samovžigom je izvedba s tako imenovanim »skupnim vodom« oziroma »Common Rail« sistemom, kjer je gorivo pod visokim tlakom (tudi do 2000 bar) skozi posebne razpršilne šobe vbrizgano neposredno v valj, v fazi kompresije oziroma pomika bata proti zgornji mrtvi legi (ZML).

Podobno se pri motorjih s prisilnim vžigom v zadnjih letih večinoma uporablja sistem neposrednega vbrizga (GDI), za razliko od včasih, ko so skoraj vsi motorji uporabljali izvedbo s predhodnim mešanjem goriva z zrakom. Motorji z neposrednim vbrizgom po navadi sicer dosegajo večje navore, moči in druge primerjalne karakteristike kot tisti s predmešanjem zaradi boljšega nadzora nad homogenostjo mešanice v valju (enakomerno porazdeljeni delci goriva med delci zraka), prinašajo pa tudi veliko več nepopolnega zgorevanja, posledica česar so saje in druge emisije.

2.2 Zgodovina in razvoj električnega pogona in vozil

Prva električna vozila so se začela pojavljati v prvi polovici 19. stoletja, vendar so bila v praksi neuporabna (takrat baterij praktično še niso poznali). Zato, ko govorimo o pojavu električnega avtomobila, po navadi kot izumitelja pravega električnega avtomobila omenimo Andreasa Flockena, ki je leta 1888 proizvedel »Flocken Elektrowagen«. Električni avtomobili so bili na začetku avtomobila veliko bolj priljubljeni kot bencinski/dizelski, saj je bilo upravljanje z njimi preprostejše in udobje večje. Ob prestopu stoletja iz 19. na 20. je bilo na svetu okoli 30.000 električnih vozil (avtomobilov). [7]

Priča priljubljenosti električnih vozil v tem času je tudi to, da je hitrostni rekord po kopnem v letu 1899 postavil električni avtomobil »La Jamais Contente«, ki ga vidimo na sliki 2.2, s hitrostjo 105,88 km/h. [8] Najhitrejši bencinski avtomobil istega časa je bil Stanleyev »Runabout«, ki je dosegel hitrost 56 km/h. [5]

Slika 2.2 La Jamais Contente [8]

Razvoj se je potem usmeril v motorje z notranjim zgorevanjem in električna vozila so nekako počasi tonila v pozabo. Tehnologija, ki je bila takrat na voljo, je bila preprosto bolj naklonjena vozilom z notranjim zgorevanjem. Usodni udarec so električna vozila dobila leta 1912, ko je Cadillac vgradil električni zagon motorja z notranjim zgorevanjem in posledično dvignil javno zanimanje za vozila z notranjim zgorevanjem, ki so jih do takrat večinoma vžigali ročno.

Potem pa se je z razvojem baterijske tehnologije in vedno večjo potrebo po bolj čistem pogonu vozil v začetku 21. stoletja zgodila renesansa v proizvodnji električnih vozil. Tesla je leta 2008 izdala model »Roadster«, prikazan na sliki 2.3, ki je bil prvi legalen električni avtomobil z Li-ion baterijami in hkrati prvi električni avtomobil s praktično uporabnim dosegom preko 300 km. Hitro po tem sta se Tesli pridružila tudi Mitsubishi in Nissan, za njima pa še ostali proizvajalci tradicionalnih avtomobilov. [7]

Slika 2.3 Tesla Roadster iz leta 2008 [9]

2.3. Primerjava obeh pogonov

Največja razlika med električnim pogonom in pogonom na motor z notranjim zgorevanjem (MNZ) izhaja iz dejstva, da elektromotor v električnem vozilu pretvarja električno energijo v kotalno oziroma kinetično in tako poganja vozilo naprej ali nazaj. Pri konvencionalnem pogonu pa se v MNZ kemična energija najprej pretvori v tlačno. Tlačna energija se nato preko linijskega gibanja bata pretvori v rotacijo gredi, ki jo kasneje preko vztrajnika, sklopke in menjalnika izkoristimo za pogon vozila.

Pri vozilu z MNZ torej pride do pretvorbe energije iz vira v kinetično v vozilu. Pri vozilu na električni pogon pa pride do pretvorbe energije iz vira v energijo, ki jo lahko koristimo izven vozila. Največkrat do te pretvorbe pride v elektrarnah. Prednost tega načina je v tem, da četudi govorimo o termoelektrarnah na premog, ki veljajo za najbolj umazane, se proces pretvorbe vseeno izvaja na oddaljeni lokaciji, ne pa v mestnih jedrih blizu večje socializacije.

Ne glede na vse so termodinamični izkoristki najsodobnejših premogovnih termoelektrarn (okoli 42 %) nekoliko nižji od izkoristkov najsodobnejših motorjev z notranjim zgorevanjem (okoli 44 %) [10]. Zakaj torej sploh razmišljamo o električnih vozilih kot alternativi? Zato, ker se konkreten delež globalne elektrike pridobi tudi iz nuklearnih elektrarn in obnovljivih virov (hidroelektrarne, vetrne elektrarne, sončne celice itd.), ki pa so veliko čistejši od vseh toplotnih postrojev.

Hkrati ima elektromotor (EM) veliko višji izkoristek kot MNZ; sodobni elektromotorji imajo izkoristke vse do 96 % [11]. Sodoben EM lahko izkoristi več kot dvakrat toliko energije, kot jo je sposoben izkoristiti sodoben MNZ.

Električna vozila torej »napolnimo« z energijo, ki je vozilo ne rabi več pretvarjati iz vira v uporabno. To je tisti najbolj umazan in potrošen proces, kjer pride do največ izgub in emisij. Ta proces nam v primeru električnih vozil opravijo elektrarne. Mi vozilo napolnimo z že pretvorjeno električno energijo, ki se hrani v baterijskih celicah v vozilu. V primeru vozila na konvencionalni pogon pa pride do pretvorbe energije iz vira v vozilu.

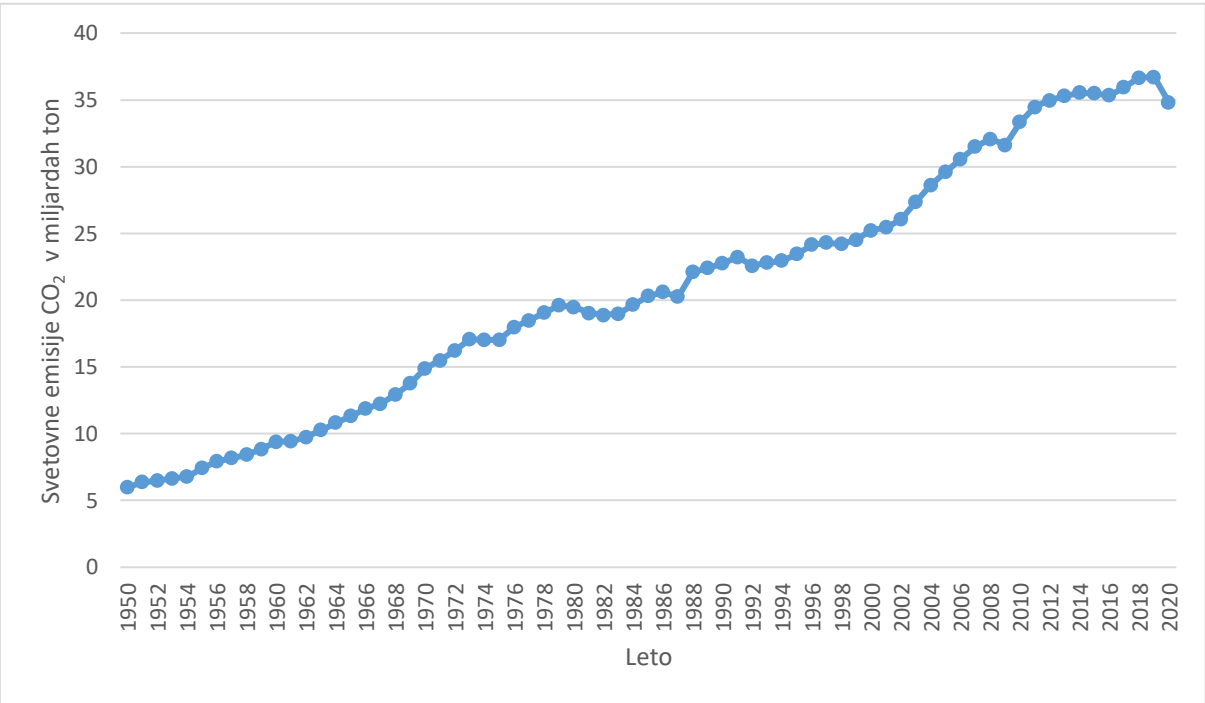
Je pa zaradi zasnove električnega vozila treba upoštevati tudi druge izgube. Izgube, do katerih pride med pretvorbo in prenosom energije iz elektrarne do vtičnice, izgube omrežja ter izgube polnjenja in praznjenja baterije. V Sloveniji so izgube energije v pretvorbi 24 % in v prenosu po omrežju približno 3 % [12]. Električna vozila pa so med polnjenjem baterije z 240 V virom podvržena 13 % izgubam, med praznjenjem (za potrebe pogona vozila) pa izgube zrastejo celo na 30 %. [13]

Skupne izgube električnega vozila od vira energije pa do elektromotorja so torej vsaj 50 %. To pa je že veliko bližje vozilu na pogon z notranjim zgorevanjem.

3. EKOLOŠKA PROBLEMATIKA

V 90. letih prejšnjega stoletja se je z vzponom tehnologije in ozaveščenosti začelo razmišljati o vplivu človeka na planet. Začele so se dogajati okoljske spremembe, planet se je začel segrevati, led v oceanih se je začel taliti. Seveda je vsem Zemljanom v interesu, da se planet čim dlje ohrani v normalnem stanju, da ga lahko v celoti uživamo mi in vse generacije, ki bodo prišle za nami.

Ugotovili so, da imajo največji vpliv na segrevanje ozračja in podnebne spremembe toplogredni plini, kot so ogljikov dioksid CO_2, metan CH_4, dušikovi oksidi NO_x itd. Rast globalnega izpusta CO_2 v preteklih 70 letih je prikazana na sliki 3.1 [14]. O tem, kolikšen delež teh plinov na globalni ravni prispevajo osebna vozila, ki jih elektrificiramo, ne bomo debatirali. Vsaka sprememba na boljše je zaželena in dobrodošla, čeprav bi morda toliko sredstev in truda usmerjenega v katero drugo smer vrnilo boljše izkupičke.



Slika 3.1 Svetovne emisije CO_2 skozi čas

3.1. Ekološka problematika motorja z notranjim zgorevanjem

Ko govorimo o ekološki problematiki motorjev z notranjim zgorevanjem, se največkrat osredotočamo na emisije, ki nastanejo ob zgorevanju goriva. Trenutno se po svetu koristi več različnih vrst goriv za MNZ. Najpogostejša so:

- za motorje s samovžigom: dizelsko gorivo, biodizel;
- za motorje s prisilnim vžigom: bencin, etanol, propan (LPG), zemeljski plin (CNG).

Za potrebe simulacije se bomo v tem in naslednjem poglavju osredotočali na bencin, saj ga za pogon uporablja velika večina vozil z MNZ.

Pri zgorevanju bencina pride do kemijske reakcije:

$$C_8H_{18} + a\,(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow b\,CO_2 + c\,CO + d\,H_2O + (3{,}76*a)\,N_2 \qquad (3.1)$$

Kjer so a, b, c, d spremenljivke, odvisne od kemičnih razmer v zgorevalni komori. [15]

Naj se zdaj vrnemo na emisije. Glavne emisije, ki nastanejo pri zgorevanju v MNZ, so CO_2, CO, C_xH_y, NO_x in trdi delci (ogljika) oziroma saje. Ko nam proizvajalci avtomobilov podajajo emisijske karakteristike avtomobila, vedno pišejo o količini CO_2 spuščenega v zrak. Enota, v kateri je emisija podana, je gram ogljikovega dioksida na kilometer prevožene razdalje (gCO_2/km). Ugotovili so, da so tudi druge emisije sorazmerne s CO_2, vendar jih je neprimerljivo manj, zato podajanje ostalih emisij posebej ni potrebno.

Količina CO_2, ki ga vozilo spusti v zrak, je neposredno odvisna od količine goriva, ki ga vozilo porabi. 1 l bencina tehta 750 g, 652 g česar je teža ogljika. Za zgorevanje teh 652 g ogljika je potrebnih še 1740 g kisika. Na koncu zgorevanja dobimo iz litra goriva torej 2392 g CO_2. Če naše vozilo za pogon koristi bencin in ga porabi recimo 5 l/100 km, lahko preprosto izračunamo, koliko CO_2 bo pri tem spustilo v zrak [16]:

$$5l \times\ 2392\frac{g}{l} \div 100km = 119{,}6\frac{g}{km} \qquad (3.2)$$

Podobno velja tudi za dizelsko gorivo, le da so številke malo drugačne. Liter dizla tehta 835 g, pri čemer je 720 g ogljika, za zgorevanje pa je potrebnih še 1920 g kisika in na koncu proizvedemo 2640 g CO_2. Če vzamemo spet enako porabo goriva 5 l/100 km, je naš izračun potem:

$$5\,l \times\ 2640\frac{g}{l}\ \div 100km = 132\frac{g}{km} \tag{3.3}$$

Zakaj so potem dizelska vozila tako priljubljena in zakaj je bilo toliko sredstev, namenjenih za preprečevanje emisij, vloženih v razvoj bolj »umazane« tehnologije? Zato, ker imajo dizelski motorji preprosto višji izkoristek od bencinskih in dizelsko gorivo višjo kalorično vrednost od bencina, kar omogoča dizelskemu motorju nižjo porabo goriva kot bencinskemu za enako delo.

Ima pa dizelski motor eno težavo, in sicer emisije saj ter NO_x. Že prej smo govorili o tem, da razmere v valju pred trenutkom samovžiga res težko natančno določimo oziroma nadzorujemo. Posledica tega so saje in dušikovi oksidi. Po navadi velja, da če želimo v motorju zmanjšati količino enega od teh, se nam poveča količina drugega in obratno. Do teh dveh emisij pride, ker dizelskemu motorju, zaradi narave motorja, s povečevanjem obratov in obremenitve, začne padati relativni razmernik zraka λ. To je razmerje med količino goriva in količino zraka v valju. Z zniževanjem temperature zgorevanja dosežemo manjše količine proizvedenega NO_x, vendar tako dobimo več saj. Do tega pride, ker imamo zdaj na voljo manj časa za ustvarjanje homogene mešanice. Temperaturo zgorevanja znižamo tako, da gorivo v valj preprosto vbrizgamo kasneje, torej bližje vžigu. [15]

Problem nižanja temperature nastane v zdaj povečani količini proizvedenih saj. Če imamo preveč saj, nam to drastično zniža vzdržljivost in obstojnost motorja, česar pa si ne želimo. Tudi zakoni, ki določajo dovoljeno količino saj v izpuhu motorja, so sami po sebi zelo strogi, zato uporabljamo tudi druge rešitve. Te rešitve normalno temeljijo na obdelavi izpušnih plinov že po prvem zgorevalnem ciklu. Glavna metoda, ki jo poznamo za znižanje saj, je filter trdih delcev. To je filter, montiran za motorjem v izpušni cevi, ki je namenjen lovljenju saj. Ti filtri so rekuperativni; ko se filter napolni s sajami, vklopi obratovalni režim čiščenja, kjer se vanj spusti gorivo, ki skuri trde delce iz filtra. Ti filtri pa imajo žal poleg visoke cene in tega, da dušijo

motor, tudi omejeno življenjsko dobo, ki je odvisna od voznega režima vozila. Seveda pa trdi delci niso edine nezaželene emisije. Ena rešitev za zmanjšanje emisij je recirkulacija izpušnih plinov (EGR). EGR nam v glavnem pomaga zmanjšati količino NO_x. Deluje tako, da se del izpuha odvzame in še enkrat vodi skozi valje. Ideja je, da se del zraka (in posledično kisika v zraku) v valju nadomesti z izpušnimi plini. Manjša je koncentracija kisika v mešanici, manj je NO_x-ov. [17] Kasneje so v izpuhe dizelskih vozil dodali še posebne katalizatorje, ki s pomočjo tekočine (AdBlue) ohladijo izpuh in s pomočjo kemije razbijejo škodljive NO_x na okolju nevtralen dušik in kisik.

3.2. Ekološka problematika električnih vozil

Električna vozila med uporabo oziroma vožnjo zaradi pogona ne emitirajo čisto nič. Emisije na cesti so posledica emisij obrabe gum, zavornih ploščic in drugega potrošnega materiala. Vendar do teh emisij pride tudi pri vseh ostalih vozilih, ne glede na pogon. Ekološka problematika električnih vozil se nanaša na emisije, ki nastanejo pri proizvajanju električne energije in so v bistvu za vsak kraj na svetu drugačne ter na emisije, ki nastanejo pri proizvodnji akumulatorjev za shranjevanje električne energije.

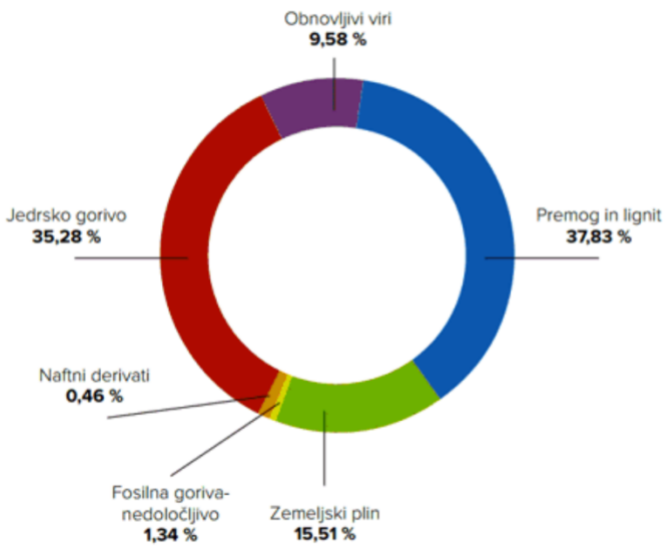
Najprej se torej lotimo emisij, ki nastanejo pri proizvodnji električne energije. Na sliki 3.2 lahko vidimo porazdelitev energentov, ki jih Energija Plus d. o. o. porabi za proizvodnjo elektrike v Sloveniji [18]. Vidimo tudi, da v povprečju za proizvodnjo ene kWh električne energije v zrak spustijo 576 g CO_2. Na portalu evropske agencije za okolje (EEA) je sicer za Slovenijo podano povprečje 217,8 g CO_2/kWh [19]. Želimo, da vsebina diplomskega čim bolj ustreza dotičnemu primeru, zato bomo vzeli številke Energije Plus, ki je naš ponudnik elektrike.

Tabela 1: Delež sestave primarnih virov za proizvodnjo električne energije Energija plus d.o.o. v letu 2020

Fosilna goriva	**55,14 %**
premog in lignit	37,83 %
zemeljski plin	15,51 %
naftni derivati	0,46 %
nedoločljivo	1,34 %
Jedrsko gorivo	**35,28 %**
Obnovljivi viri	**9,58 %**
vodna energija	0,94 %
veter	1,33 %
sončna energija	1,05 %
biomasa	1,95 %
geotermalna energija	0,00 %
nedoločljivo	4,31 %
Skupaj	**100,00 %**

Tabela 2: Izpust ogljikovega dioksida in nastali radioaktivni odpadki v letu 2020

Ogljikov dioksid (kg/kWh)	0,576
Radioaktivni odpadki (µm/kWh)	1058,53



Slika 3.2 Delež virov za proizvodnjo elektrike za Energijo Plus d. o. o. v letu 2020

Postavimo to v prakso. Za primer bomo vzeli tehnološko najnaprednejši električni avtomobil trenutno v proizvodnji; Tesla Model S Plaid. Avtomobil ima baterijo s kapaciteto 99 kWh, uporabniku dostopnih je 95 kWh. Se pravi, če ta avto pri nas doma napolnimo od praznega do polnega, za to količino elektrike v zrak spustimo 54,72 kg CO_2. Doseg tega avtomobila v idealnih pogojih, podan na proizvajalčevi spletni strani, je 637 km [20]. Avto, polnjen v Sloveniji, torej v zrak pri takem voznem režimu za eno polnjenje baterije »spusti« 85,9 g CO_2/km.

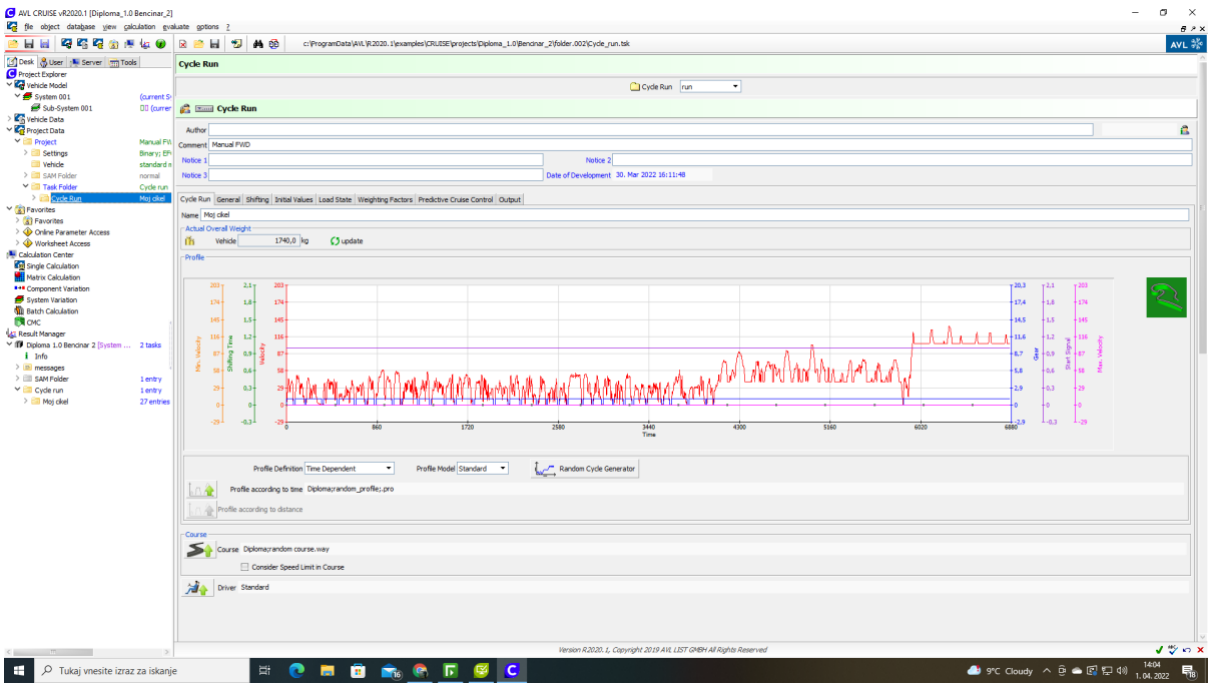
Drugi večji delež emisij pa nastane med proizvodnjo akumulatorskega paketa. Iz študije »Estimation of CO_2 emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA« [21] izvemo, da so emisije, nastale v proizvodnji baterij, odvisne od tipa baterije v vozilu in je 160 kg CO_2 za vsako kWh litijev-nikelj-mangan-kobalt baterije in 161 kg za vsako kWh litijev-železov-fosfat ionske baterije. Za potrebe te analize bomo vzeli čistejšo alternativo, saj želimo biti čim bolj okolju prijazni. Tudi Tesla za večje baterijske pakete uporablja čistejšo alternativo, medtem ko za manjše baterijske pakete (do 70 kWh) uporabljajo Li-Fe-P tehnologijo.

Za proizvodnjo 99 kWh baterije v Tesli torej v zrak spustimo 15,840 kg CO_2. Baterije so žal podvržene časovni degradaciji. Po navadi je baterija pripravljena za menjavo, ko kapaciteta pade pod 80 % začetne. Po pričanjih uporabnikov se to pri sodobnih Teslah zgodi po okoli 480.000 km, kar pomeni, da nam to doda še 33 gCO_2/km. Treba je dodati še, da je te baterije možno reciklirati ali uporabiti še v kakšni drugi aplikaciji. To nam zmanjša prispevek CO_2 zaradi proizvodnje baterije k skupnim emisijam na polovico. Skupaj smo zdaj na skoraj 103 g CO_2/km, kar splošno gledano ni več tako malo, vendar v primerjavi z avtomobilom z MNZ istega cenovnega razreda s primerljivimi pospeševalnimi karakteristikami in voznimi lastnostmi (BMW M8 Gran Coupe; izpust 256 g CO_2/km[22]) še vedno manj kot polovica.

Vsak pogon ima torej z ekološkega vidika svoje slabosti in prednosti, čeprav je trenutno videti, kot da je električni pogon okolju prijaznejši.

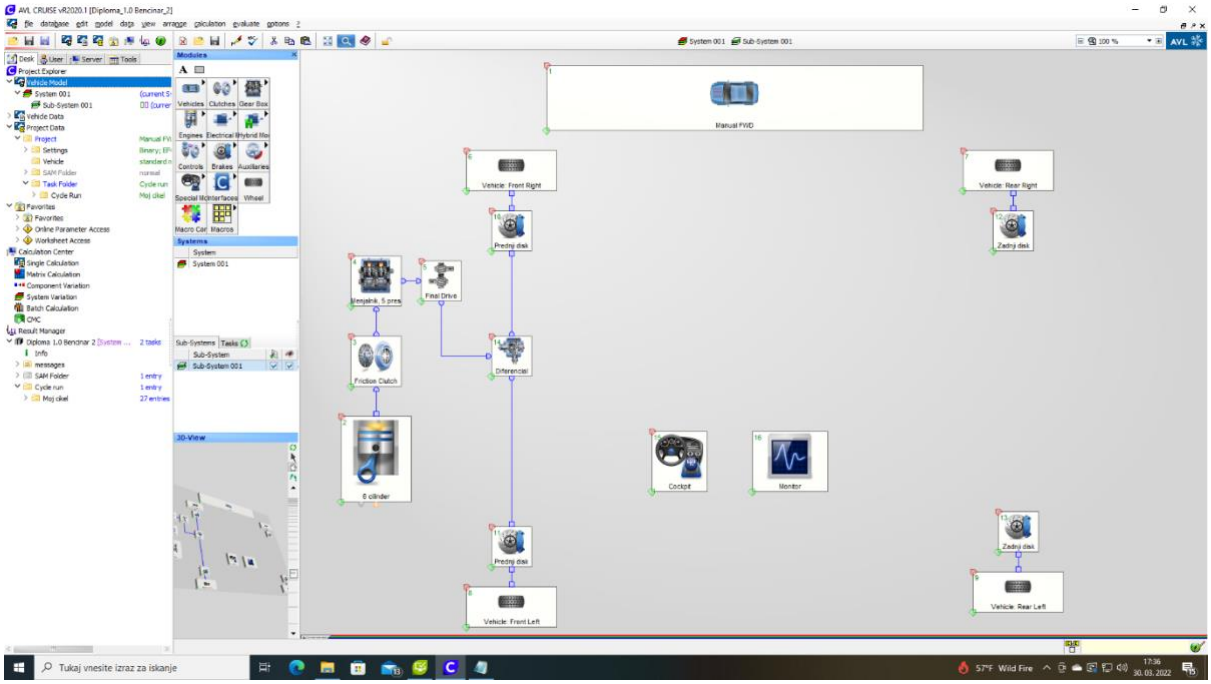
4. SIMULACIJA V AVL CRUISE

Za potrebe izvajanja simulacije smo uporabili program AVL Cruise. Ta program nam omogoča simulacijo vožnje vozila, skozi kakršen koli vozni cikel želimo (naš je viden na sliki 4.1), hkrati pa nam natančno izračuna količino porabljenega goriva, elektrike, izpust emisij, koriščeno moč in navor motorja in še tisoče drugih parametrov. Za izračun emisij in ostalih rezultatov simulacije, ki so predmet diplomskega dela, je bil uporabljen preračunski model »Quasi-stationary S«.

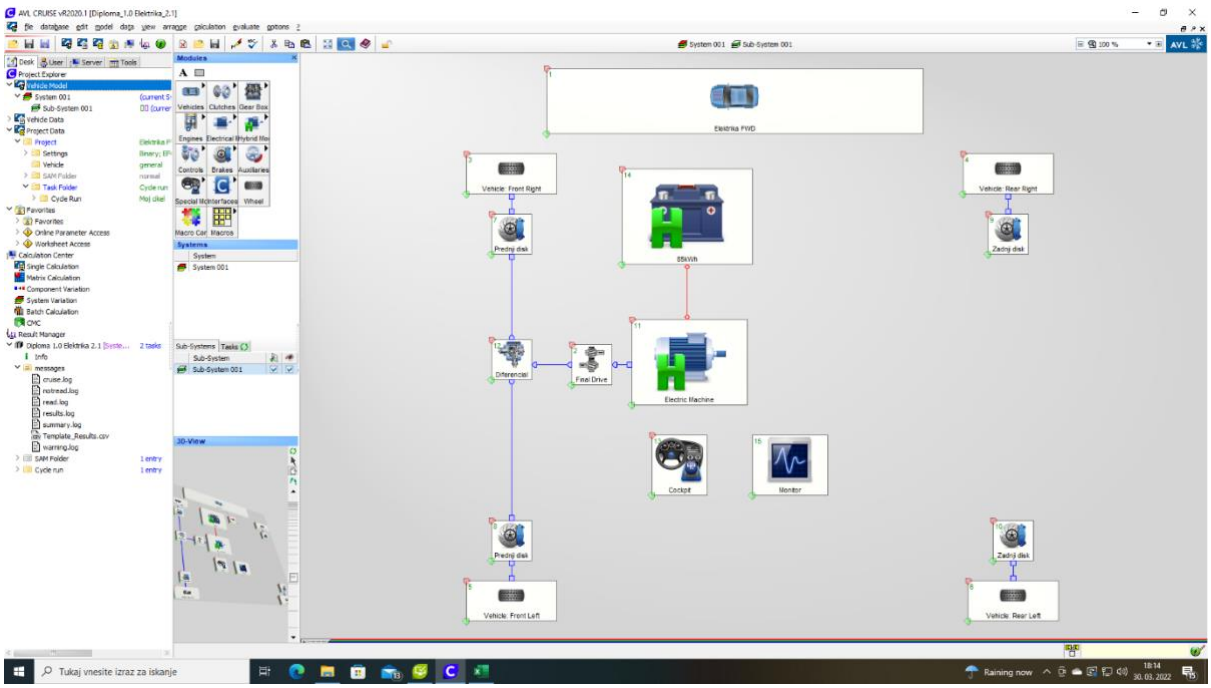


Slika 4.1 Parametri (namišljenega) voznega cikla vozil

V program smo sprogramirali dve na videz enaki vozili. Razlikujeta se le v pogonu (in posledično v teži). Prvo vozilo za pogon uporablja Ottov MNZ, drugo električni motor. Hkrati je vozilo z elektromotorjem težje od vozila z Ottovim motorjem, saj baterijski paketi tehtajo tudi preko 600 kg. Za kompenzacijo ima tudi močnejši motor. Modela vozil v programu sta vidna na slikah 4.2 in 4.3.



Slika 4.2 Model vozila na bencinski pogon

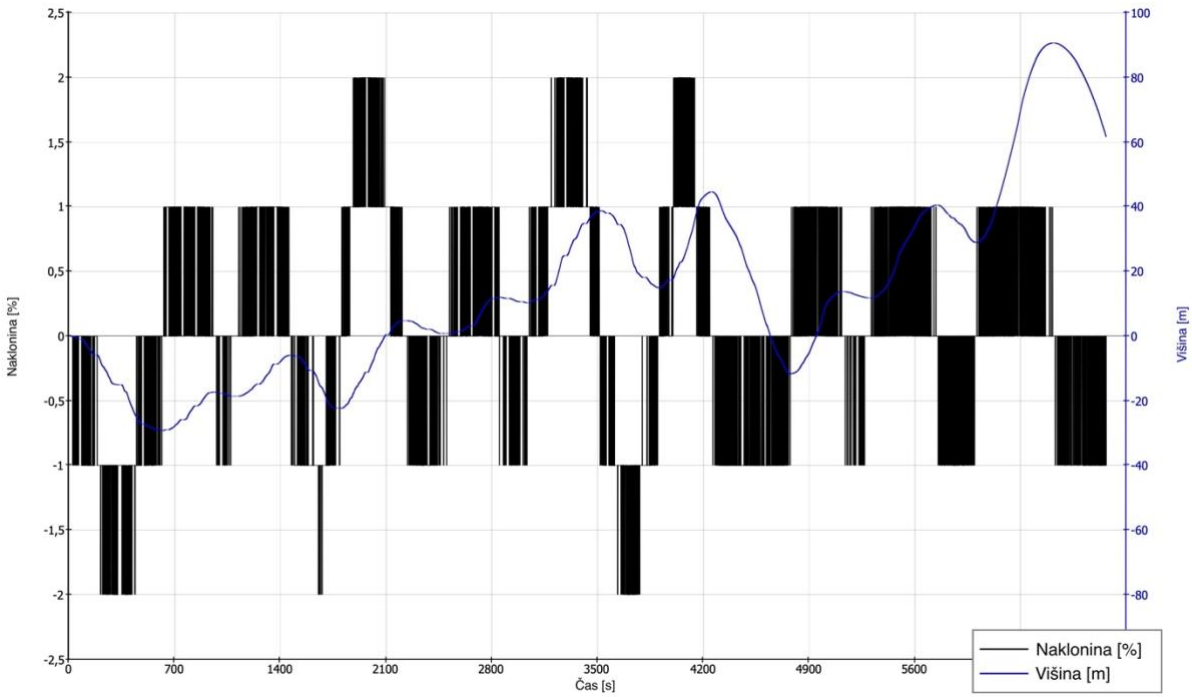


Slika 4.3 Model vozila na električni pogon

4.1. Vozni cikel

Program AVL Cruise nam nudi možnost izvajanja simulacij v standardiziranih voznih ciklih (WLTP, NEDC, UDC itd.) ali pa v voznih ciklih, sprogramiranih »po meri«, za katerega smo se odločili tudi sami.

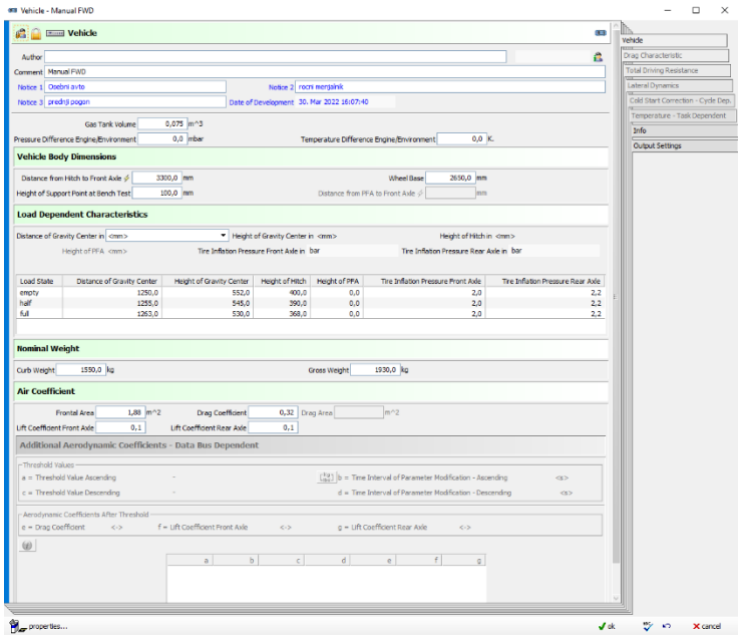
Naš vozni cikel je dolg 83,5 km. Višinska razlika med najvišjo in najnižjo točko cikla je 120 m, spreminjanje višine skozi cikel pa je na sliki 4.4. Približno tretjina cikla je v mestu (omejitev hitrosti 50 km/h, večji promet, veliko ustavljanja in speljevanja), druga tretjina je na izvenmestnih cestiščih (omejitev hitrosti 90 km/h, malo manj prometa, hitrost ne pade pod 45 km/h), zadnja tretjina je pa na avtocesti (omejitev hitrosti 130 km/h, spet manj prometa, hitrost ne pade pod 100 km/h). Vozilo po ciklu vozi približno 6.500 sekund, skoraj 2 uri. Povprečna hitrost vozila skozi cikel je približno 43 km/h.



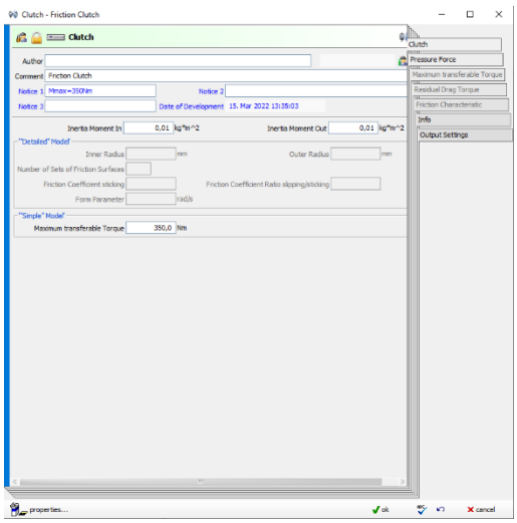
Slika 4.4 Nadmorska višina in naklonina simulirane poti

4.2. Simulacija za vozilo na konvencionalni pogon

Kot smo že omenili, je model vozila namišljen. Teža suhega (praznega) vozila na bencinski pogon je 1550 kg (čeprav za potrebe simulacije vozilo do polovice naložimo; torej tehta 1740 kg), maksimalna moč motorja pri polni obremenitvi pa 137,7 kW. Vozilo ima koeficient upora $C_D = 0{,}32$, frontalno površino pa 1,88 m^2. Za pogon koristi štiritaktni šestvaljnik z delovno prostornino 2.478 cm^3 ter 5-prestavni ročni menjalnik, ki sta povezana preko torne sklopke. Ostali parametri modela vozila so vidni na sliki 4.5.

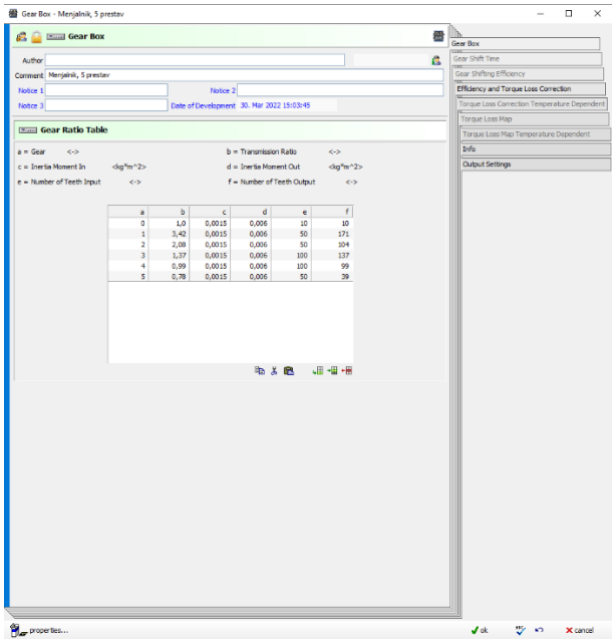


Slika 4.5 Parametri modela vozila na konvencionalni pogon



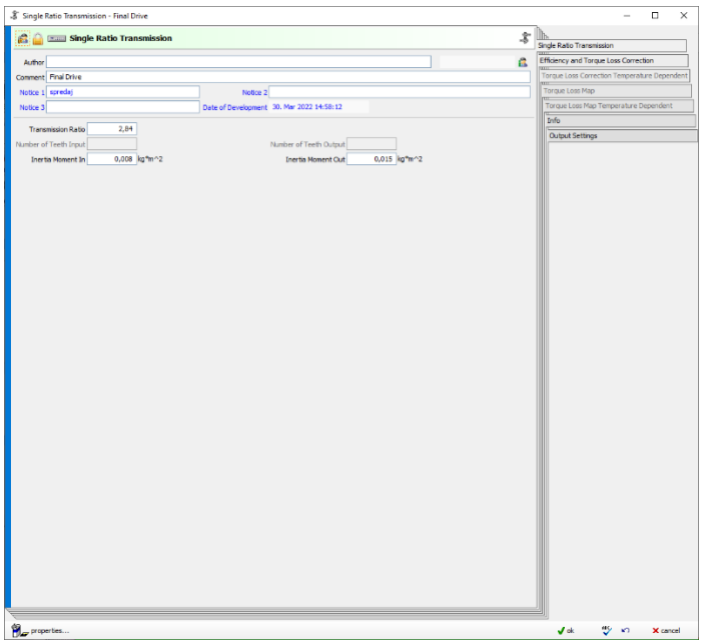
Slika 4.6 Parametri sklopke

Na sliki 4.6 vidimo parametre torne sklopke. Uporabili smo sklopko, ki lahko prenese maksimalno M = 350 Nm navora, malo več kot ga premore naš motor z notranjim zgorevanjem.



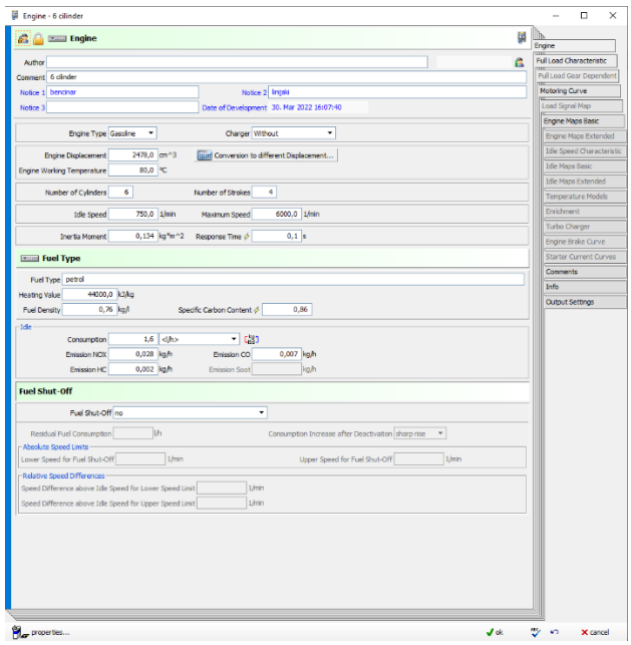
Slika 4.7 Parametri menjalnika

Parametri menjalnika so na sliki 4.7. Menjalnik ima šest prestav; eno nazaj in pet naprej. Prestavno razmerje posameznih prestav je vidno na isti sliki (4.7). Izkoristek menjalnika je 97 %.



Slika 4.8 Prestavno razmerje pogonske osi

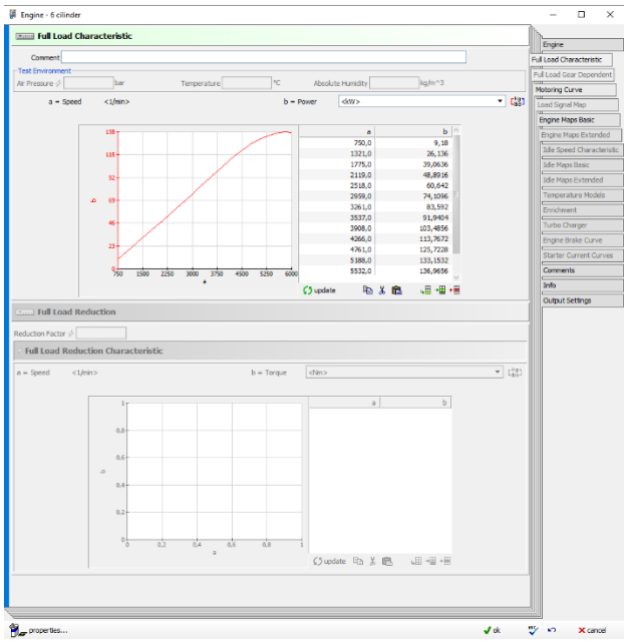
Prestavno razmerje pogonske osi (Final drive) našega vozila je vidno na sliki 4.8 in je 2,84. Izgube so tudi tukaj minimalne; 2 %.



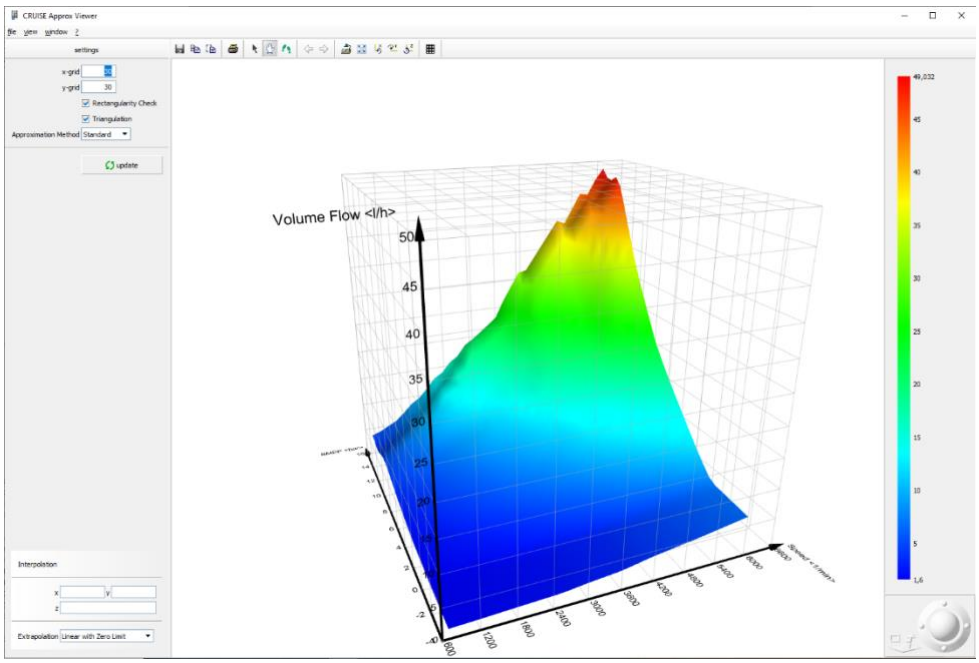
Slika 4.9 Osnovni parametri motorja

Na sliki 4.9 so osnovni parametri motorja. Vidimo, da je motor atmosferskega tipa (brez prisilne polnitve) in da za pogon uporablja bencin. Delovna prostornina je 2.478 cm^3, delovna temperatura je 80 °C. Vidimo tudi emisije, ki jih vozilo spušča v zrak med prostim tekom.

Na sliki 4.10 si lahko ogledamo krivuljo moči motorja pri polni obremenitvi. Vidimo, da moč skozi delovno področje skoraj do konca linearno narašča. Maksimalno moč P_{max} = 137,7kW vozilo doseže pri n = 5600 min^{-1} obratih na minuto, potem pa rahlo pade. Pri predpisu lastnosti motorja ter določanju krivulje moči in diagrama porabe vozila smo si pomagali s knjižnico »Cruise™ Primer«[23], vendar smo parametre prilagodili tako, da ustrezajo dotičnemu modelu vozila.



Slika 4.10 Krivulja moči motorja

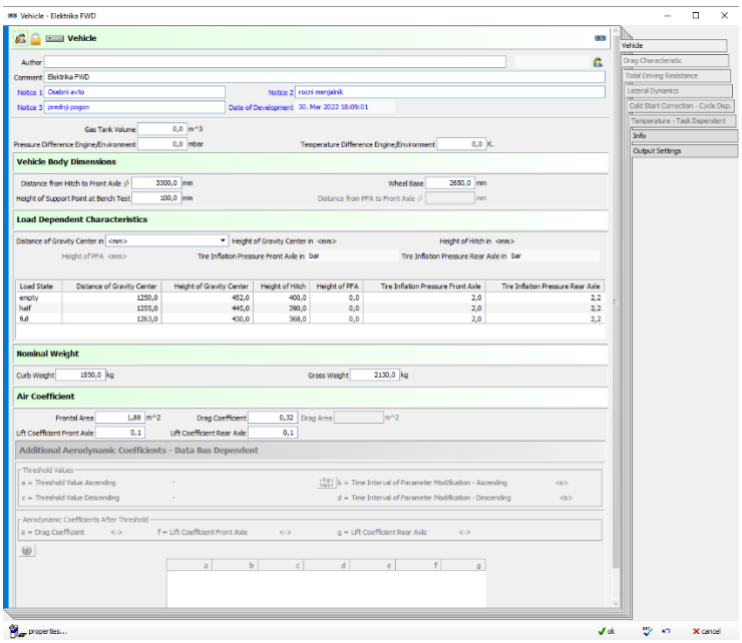


Slika 4.11 Diagram porabe motorja

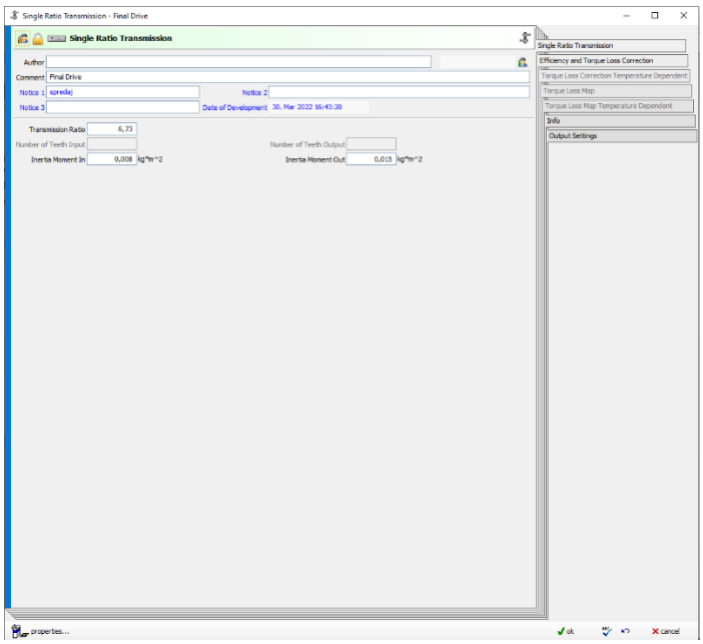
Na sliki 4.11 pa imamo vizualno predstavljeno mapo porabe motorja. Vidimo lahko, kolikšen pretok goriva je potreben za doseganje želenega srednjega efektivnega tlaka (BMEP) pri določenih obratih motorja.

4.3. Simulacija za vozilo na električni pogon

Električno vozilo je na videz popolnoma enako kot vozilo z MNZ. Pod pločevino pa se od prejšnjega razlikuje v pogonskih komponentah in v s tem povezanih karakteristikah. Motor z notranjim zgorevanjem smo zamenjali z BorgWarner HVH250-090 SOM [11] elektromotorjem, za katerega ima proizvajalec podane vse karakteristike na spletu. Osnove baterijskega paketa smo si izposodili pri Tesli, iz 85 kWh izvedbe (dejanska kapaciteta je 86 kWh, uporabniku je na voljo en manj). Elektromotor je zmožen maksimalne moči P_{max} = 175,3 kW. Vozilo zaradi težkega baterijskega paketa prazno tehta 1850 kg, med simulacijo (50 % težnostna obremenitev) pa 1990 kg. Podrobnosti modela so na sliki 4.12.



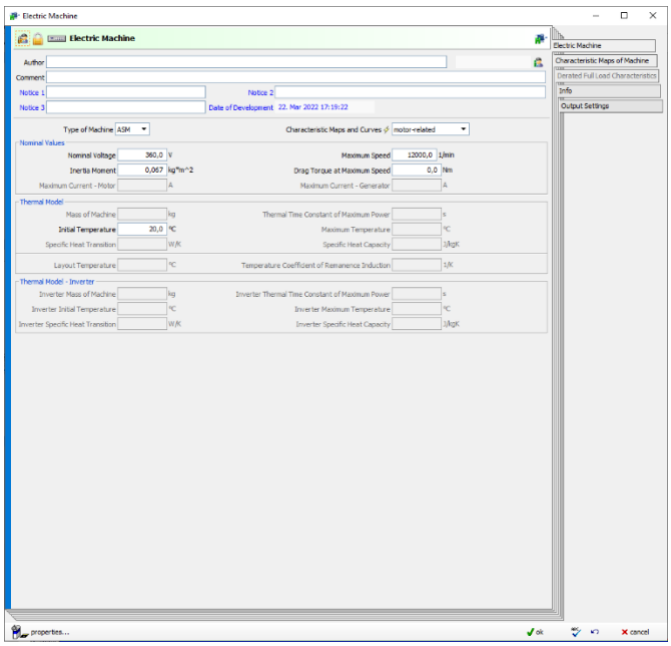
Slika 4.12 Parametri modela električnega vozila



Slika 4.13 Prestavno razmerje pogonske osi

Vozilo na električni pogon nima konvencionalnega menjalnika, saj ga zaradi širokega obratovalnega polja elektromotorja ne potrebuje. Koristi le redukcijsko razmerje pogonske

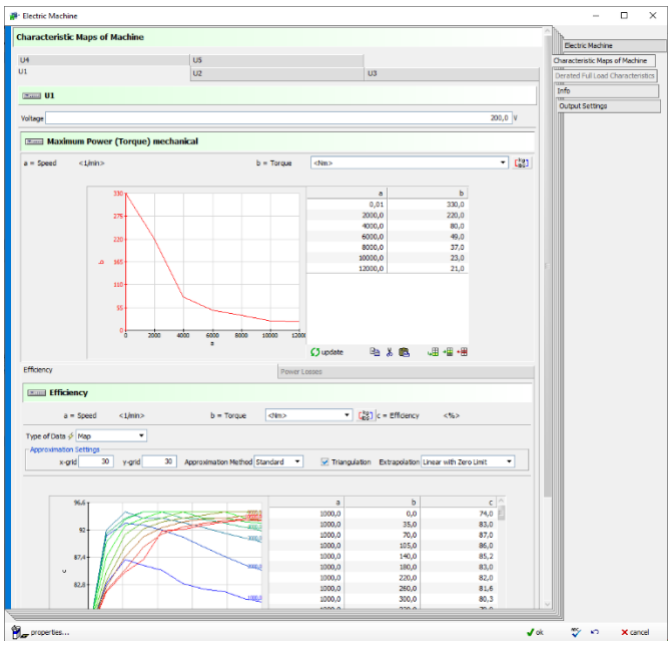
osi, ki je v našem primeru 6,73, vidno na sliki 4.13, saj se kolesa ne morejo vrteti tako hitro kot elektromotor.



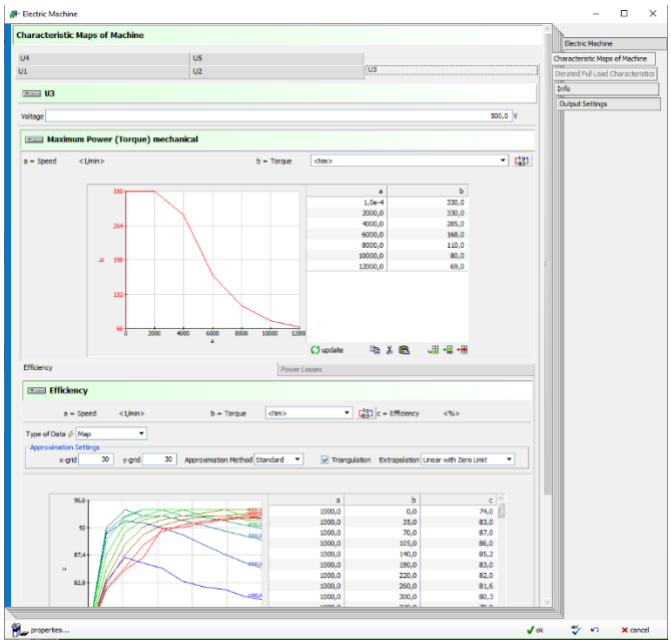
Slika 4.14 Osnovni parametri elektromotorja

Na slikah 4.14, 4.15 in 4.16 vidimo lastnosti elektromotorja. Na sliki 4.15 vidimo graf navora za elektromotor pri napetosti 200 V. Z dvigom napetosti, ki jo nudimo elektromotorju, se skozi celo območje delovanja dviguje tudi količina navora, ki ga je elektromotor zmožen proizvesti.

Zato je navor na poljubni točki v obratovalnem območju na sliki 4.16, kjer imamo napetost 500 V, veliko večji kot na sliki 4.15, kjer je napetost 200 V.

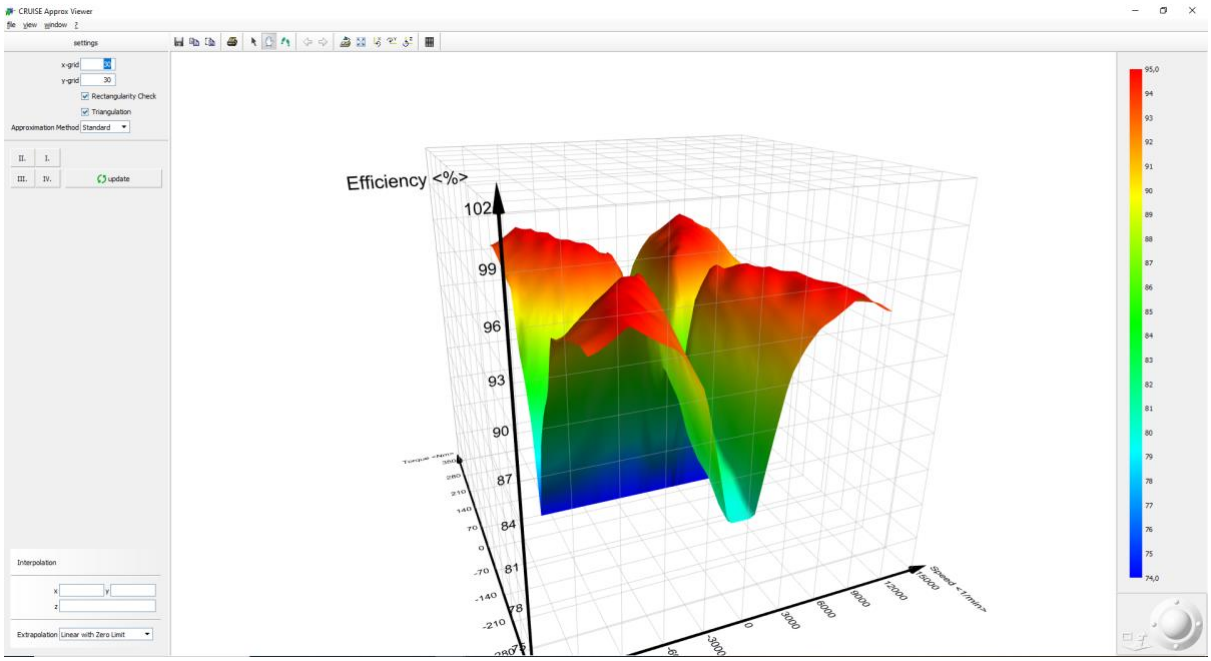


Slika 4.15 Krivulja navora elektromotorja pri U = 200 V

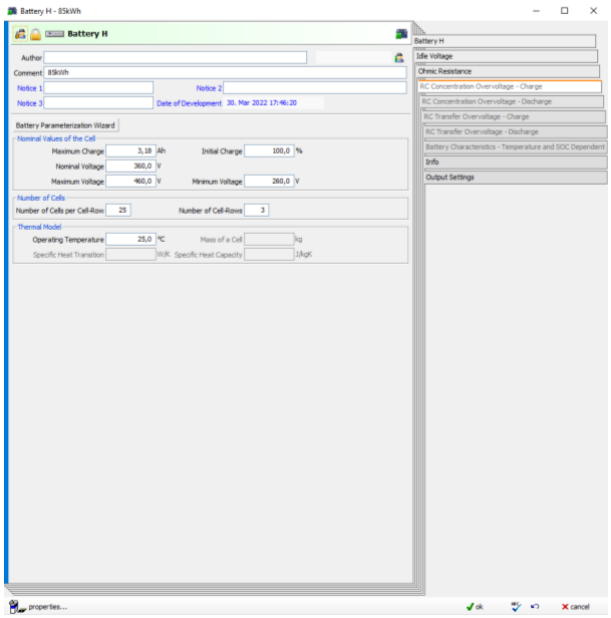


Slika 4.16 Krivulja navora elektromotorja pri U = 500 V

Na sliki 4.17 pa vidimo diagram izkoristka elektromotorja. Razvidno je, da izkoristek elektromotorja nikoli ne pade pod 74 %, kar je približno dvakrat toliko, kot premorejo sodobni motorji z notranjim zgorevanjem.



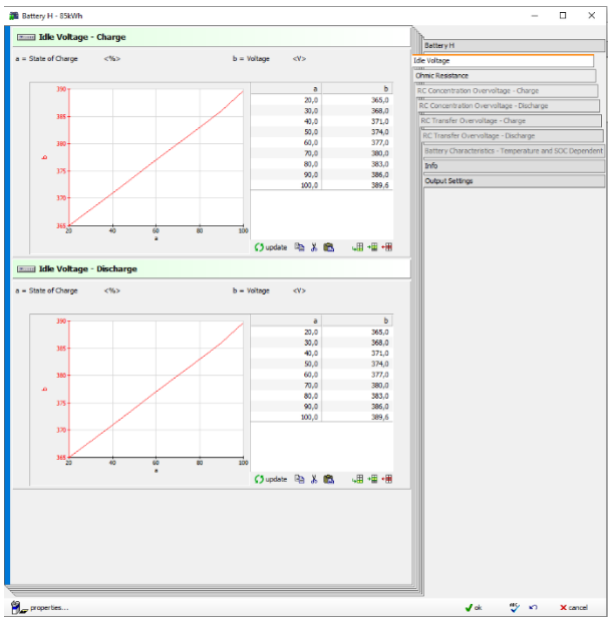
Slika 4.17 Diagram izkoristka elektromotorja



Slika 4.18 Osnovni parametri baterije

Na sliki 4.18 lahko vidimo osnovne parametre baterije. Baterije v električnih vozilih so sestavljene iz več sklopov manjših baterij. Svojo baterijo smo povzeli po Teslinem 85 kWh paketu, ki je sestavljena iz 75 manjših baterij, t. i. celic, ki imajo nazivno napetost 360 V [24] in kapaciteto 3,18 Ah.

Na sliki 4.19 si lahko ogledamo karakteristiko napetosti naše namišljene baterije skozi praznjenje in polnjenje.

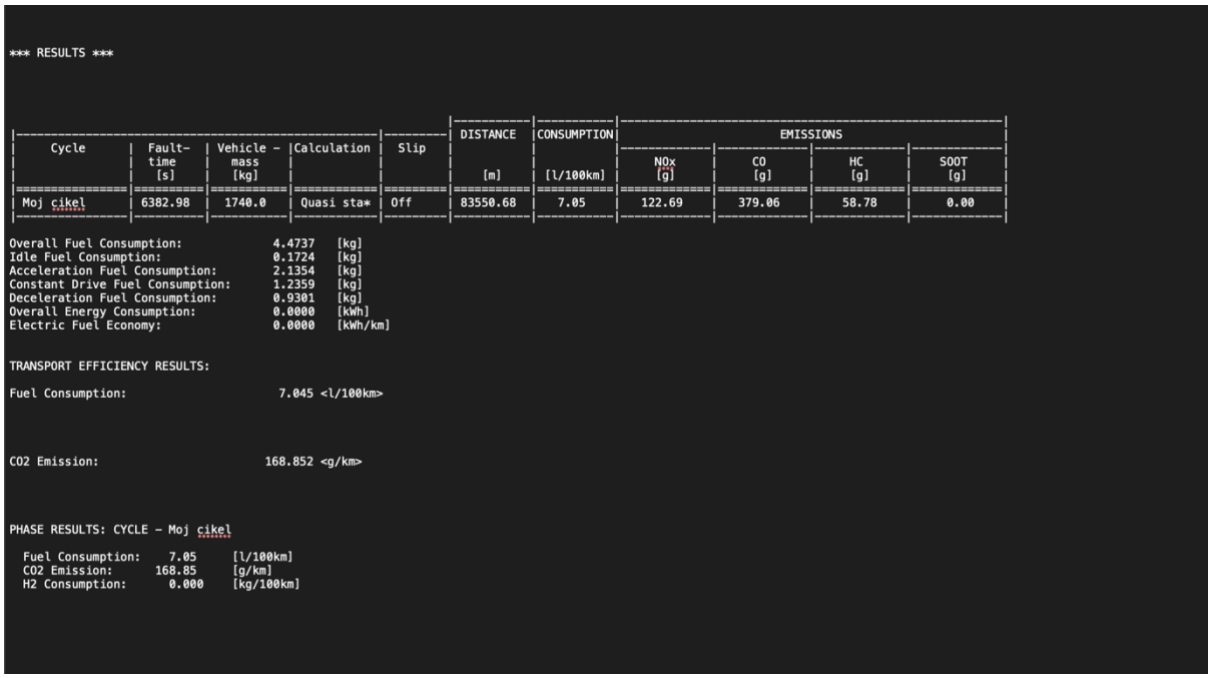


Slika 4.19 Karakteristika baterije med polnjenjem in praznjenjem

5. REZULTATI SIMULACIJE

5.1. Rezultati simulacije za vozilo na bencinski pogon

Po izvedeni simulaciji za vozilo na bencinski pogon dobimo rezultate, predstavljene na sliki 5.1:



*** RESULTS ***

Cycle	Fault-time [s]	Vehicle - mass [kg]	Calculation	Slip	DISTANCE [m]	CONSUMPTION [l/100km]	EMISSIONS NOx [g]	CO [g]	HC [g]	SOOT [g]
Moj cikel	6382.98	1740.0	Quasi sta*	Off	83550.68	7.05	122.69	379.06	58.78	0.00

Overall Fuel Consumption: 4.4737 [kg]
Idle Fuel Consumption: 0.1724 [kg]
Acceleration Fuel Consumption: 2.1354 [kg]
Constant Drive Fuel Consumption: 1.2359 [kg]
Deceleration Fuel Consumption: 0.9301 [kg]
Overall Energy Consumption: 0.0000 [kWh]
Electric Fuel Economy: 0.0000 [kWh/km]

TRANSPORT EFFICIENCY RESULTS:

Fuel Consumption: 7.045 <l/100km>

CO2 Emission: 168.852 <g/km>

PHASE RESULTS: CYCLE - Moj cikel

Fuel Consumption: 7.05 [l/100km]
CO2 Emission: 168.85 [g/km]
H2 Consumption: 0.000 [kg/100km]

Slika 5.1 Rezultati simulacije vozila na bencinski pogon

Kot vidimo, je vozilo cikel končalo v 6.383 s oziroma v 1 h, 46 min in 23 s. Med ciklom je v zrak spustilo 122,69 g dušikovih oksidov NO_x, 379,06 g ogljikovega monoksida CO in 58,78 g ogljikovodikov HC. Prevozilo (Distance) je 83.550,68 m, povprečna poraba goriva skozi cikel (Fuel Consumption) pa je bila 7,05 l/100 km. Podatek, ki je za potrebe diplomskega dela najbolj koristen in pomemben, je izpust ogljikovega dioksida CO_2, ki je 168,85 g CO_2/km.

5.2. Rezultati simulacije za vozilo na električni pogon

Rezultati po izvedeni simulaciji za vozilo na električni pogon pa so vidni na sliki 5.2:

```
*** RESULTS ***

|-----------------------------------------------|---------|----------|----------|-----------------------------------------------|
|                                               |         | DISTANCE |CONSUMPTION|                EMISSIONS                      |
|     Cycle      |  Fault-  | Vehicle - |Calculation |  Slip   |          |          |-----------|-----------|-----------|-----------|
|                |  time    |   mass    |            |         |          |          |    NOx    |    CO     |    HC     |   SOOT    |
|                |   [s]    |   [kg]    |            |         |   [m]    | [l/100km]|   [g]     |   [g]     |   [g]     |   [g]     |
|================|==========|===========|============|=========|==========|==========|===========|===========|===========|===========|
| Moj cikel      | 6365.50  |  1990.0   | Quasi sta* | Off     | 83549.68 |   0.00   |   0.00    |   0.00    |   0.00    |   0.00    |
|----------------|----------|-----------|------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|

Overall Fuel Consumption:              0.0000   [kg]
Idle Fuel Consumption:                 0.0000   [kg]
Acceleration Fuel Consumption:         0.0000   [kg]
Constant Drive Fuel Consumption:       0.0000   [kg]
Deceleration Fuel Consumption:         0.0000   [kg]
Overall Energy Consumption:           17.7745   [kWh]
Electric Fuel Economy:                 4.7005   [km/kWh]
Electric Fuel Economy:                 0.2127   [kWh/km]

TRANSPORT EFFICIENCY RESULTS:

Fuel Consumption:                       0.000 <l/100km>



CO2 Emission:                           0.000 <g/km>



PHASE RESULTS: CYCLE - Moj cikel

  Fuel Consumption:    0.00     [l/100km]
  CO2 Emission:        0.00     [g/km]
  H2 Consumption:      0.000    [kg/100km]
```

Slika 5.2 Rezultati simulacije za električno vozilo

Kot vidimo, je vozilo cikel končalo v 6.365 s oziroma v 1 h, 46 min in 5 s. Med ciklom je v zrak spustilo 0 g dušikovih oksidov NO_x, 0 g ogljikovega dioksida CO_2, 0g ogljikovega monoksida CO in 0 g ogljikovodikov HC. Prevozilo (Distance) je 83.549,68 m, za kar je porabilo 17,7745 kWh (Overall Energy Consumption). Povprečna poraba električne energije skozi cikel je bila torej 21,27 kWh/100 km.

5.3. Opredelitev in obrazložitev rezultatov

Preglednica 5.1: Rezultati simulacij za konvencionalno in električno vozilo

Pogonsko sredstvo	Bencin	Elektrika
Masa vozila v simulaciji	1740 kg	1990 kg
Povprečna poraba goriva	7,05 l/100 km	0 l/100 km
Povprečna poraba energije	62,67 kWh/100 km[1]	21,27 kWh/100 km
Emisije CO med vožnjo po ciklu	379,06 g	0 g[2]
Emisije NO_x med vožnjo po ciklu	122,69 g	0 g[2]
Emisije HC med vožnjo po ciklu	58,78 g	0 g[2]
Emisije CO_2 med vožnjo po ciklu	14.107g	0 g[2]
Povprečen izpust emisij CO_2 med simulacijo	168,85 g/km	159,47 g/km

Za primerjavo rezultatov obeh simulacij moramo najprej najti skupni imenovalec. Ko kupujemo nov avto, so podatki o emisijah vedno podani v g CO_2/km. To je zato, ker so vse ostale emisije pri vozilih na konvencionalni pogon (NO_x, CO, HC ...) minimalne v primerjavi z emisijami CO_2. Na rezultatih simulacije za konvencionalno vozilo na sliki 5.1. vidimo, da je vozilo za vsak prevožen kilometer v zrak spustilo 168,85 g CO_2. Med tem pa je vozilo skozi celoten vozni cikel (približno 84 km) proizvedlo »le« 122,69 g NO_x. Za potrebe primerjave rezultatov bomo uporabili le emisije CO_2, ki so za naše vozilo na konvencionalni pogon, kot že rečeno, **168,85 g CO_2/km**.

[1] Če velja, da ima 1 l bencina energijsko vrednost 8,89 kWh [Krautov strojniški priročnik]
[2] Emisije med vožnjo so res 0 g, nastanejo pa zato med proizvodnjo in dobavo elektrike za polnjenje baterije

Na sliki 5.2 lahko preberemo, da električno vozilo med simulacijo v zrak ni spustilo niti grama CO_2. Tudi ko beremo brošure novih električnih avtomobilov, v drobnem tisku po navadi piše nekaj v smislu »emisije: 0 g CO_2/km«. To je v bistvu realno, saj vozilo samo po sebi ne pretvarja fosilnih goriv v električno energijo, ki jo potem koristi za pogon, ampak do tega pride v elektrarnah. Vozilo le shranjuje to električno energijo v baterijskem paketu in jo potem koristi za pogon. Koliko CO_2 proizvedemo za vsako kWh, pa je odvisno od električnega ponudnika naše polnilne postaje. V podpoglavju 3.2. smo že pojasnili, da za konkretni primer za vsako kWh v zrak spustimo 576 g CO_2.

Naše električno vozilo je skozi cikel v povprečju porabilo 0,2127 kWh/km. S preprostim izračunom lahko torej izračunamo, koliko g CO_2 dejansko proizvedemo za vsak kilometer, ki ga prevozimo z električnim vozilom. Najprej moramo izračunati, koliko g CO_2 porabimo, da spravimo električno energijo v baterijo. Za to je treba upoštevati še izgube, ki smo jih navedli v podpoglavju 2.3. To so izgube v električnem omrežju (3 %) in izgube pri polnjenju baterije (13 %). Izgube praznjenja baterije je upošteval že program, izgube v pretvorbi energije pa ponudnik električne energije, zato jih tukaj ne potrebujemo:

$$576\ \frac{gCO_2}{kWh} \div 0{,}97 \div 0{,}87 = 682{,}5\ \frac{gCO_2}{kWh} \tag{5.1}$$

Potem lahko izračunamo dejanski izpust električnega vozila:

$$682{,}5\ \frac{gCO_2}{kWh} \times 0{,}2127\ \frac{kWh}{km} = 145{,}17\ \frac{gCO_2}{km} \tag{5.2}$$

Kot smo že omenili v podpoglavju 3.2., je treba temu dodati tudi delež CO_2, ki nastane pri proizvodnji baterije. To je približno 14,3 g CO_2/km za baterijo kapacitete 86 kWh. Skupne emisije našega vozila na električni pogon so torej **159,47 g CO_2/km**.

6. DISKUSIJA

Ko smo začeli pisati diplomsko delo, smo bili skoraj prepričani, da električna vozila ne morejo biti konkurenčna alternativa konvencionalnim. Ne z ekološkega vidika, kaj šele z vseh drugih. Do neke mere smo še zdaj prepričani, da imajo konvencionalna vozila, kakor tudi električna, svoj prostor v svetu in bo trajalo še nekaj časa, preden jih bodo električna vozila zamenjala kot najpriljubljenejši način osebnega transporta.

A ne moremo zanemariti dejstev. Simulacija, ki smo jo izvedli, je pokazala, da je v Sloveniji pod enakimi pogoji, za enako delo, na videz enako električno vozilo preprosto ekološko manj škodljivo od konvencionalnega. Dejstvo je tudi, da večina držav po svetu stremi tudi k čistejši proizvodnji elektrike. Stare termoelektrarne se nadomeščajo z novimi, čistejšimi termoelektrarnami. Ogromno se vlaga v nuklearno energijo po svetu ter tudi v vetrno in solarno. S tem bo elektrika po svetu vedno čistejša. Tudi proizvodnja baterij je vedno čistejša. Ko bodo globalne vrednosti emisij proizvodnje elektrike padle pod 100 g CO_2/kWh, konvencionalna vozila v ekološkem vidiku preprosto ne bodo več sposobna konkurirati električnim. Ampak ker bodo do takrat že tako ali tako padli skupni izpusti CO_2, mislimo, da bodo tudi motorji z notranjim zgorevanjem ohranili svoje mesto v avtomobilskem svetu. Porsche je napovedal tudi, da so zelo blizu konkurenčnemu sintetičnemu gorivu, ki ga lahko uporabljajo v svojih motorjih z notranjim zgorevanjem, tako da je prihodnost konvencionalnega pogona tudi videti svetla.

Z izboljšanjem infrastrukture in napredka v baterijski tehnologiji bodo električna vozila postala le še bolj mikavna alternativa. V svetu, kjer se vedno bolj pomikamo proti avtonomni vožnji in kjer človeški vpliv (na vožnjo in planet) vedno bolj zmanjšujemo, si upamo po tem diplomskem delu trditi, da so električna vozila neizbežen in logičen korak naprej.

7. SKLEP

V okviru diplomskega dela smo se želeli prepričati, da so električna vozila res ekološko bolj sprejemljiva alternativa konvencionalnim vozilom. Za to smo najprej poiskali skupni imenovalec, s katerim smo lahko potem med sabo primerjali ekološki vpliv obeh vozil.

Nato smo, s pomočjo simulacije v poglavju 4., ugotovili, da je, če imamo dve na videz enaki vozili s primerljivimi karakteristikami in zmogljivostjo, električno vozilo preprosto bolj ekološko. Čeprav ne gre za veliko razliko – 9,38 g CO_2/km – rezultati še vedno kažejo v prid električnega vozila. V bistvu bi bili še bolj naklonjeni električnemu vozilu, če bi za emisije proizvodnje elektrike vzeli slovensko povprečje namesto podatkov našega ponudnika električne energije. V tem primeru bi izbrano električno vozilo v zrak spustilo le 69,19 g CO_2/km. Po drugi strani bi bili rezultati spet drugačni, če bi upošteval čisto vse emisije vozila od proizvodnje do razgradnje in če ne bi ublažili vpliva proizvodnje baterij.

Ugotovili smo, da tudi električna vozila onesnažujejo okolje in v zrak spuščajo toplogredne pline, čeprav posredno. Količina ogljikovega dioksida, ki ga električno vozilo dejansko spusti v zrak, je v bistvu odvisna od lokacije vozila oziroma od načina pridobivanja električne energije. Lokacija polnjenja vozila je v bistvu glavni dejavnik, ki odloča, ali je električno vozilo čistejša alternativa vozilu na konvencionalni pogon ali ne.

Se pravi, če živimo v državi, ki ima nizko povprečno vrednost izpusta CO_2 za vsako proizvedeno kWh elektrike in želimo biti okolju prijazni z električnim vozilom delamo korak v pravo smer. Če živimo v državi z visokim izpustom CO_2 za vsako kWh proizvedene elektrike, pa je za nas boljša izbira, z ekološkega vidika, vozilo na konvencionalni pogon. Za še bolj podrobno analizo vpliva na okolje bi morali upoštevati še okoljski vpliv pri proizvodnji in razgradnji posameznega vozila.

Sklenemo lahko, da je v primeru, ki je predmet diplomskega dela; se pravi, ko za glavni indikator ekološkosti vozila vzamemo izpust CO_2, kjer je upoštevan energetski miks dobavitelja elektrike Energija Plus d. o. o. in kjer vpliv ostalih ekoloških vplivov, do katerih pride med

proizvodnjo, recikliranjem in razgradnjo baterij ter vozil, ni upoštevan, električno vozilo **čistejša alternativa** vozilu na konvencionalni pogon, čeprav je razlika relativno majhna; 5,5 %.

8. SEZNAM VIROV

[1] N. Gostiša, Registrirana cestna motorna vozila in prikolice, Slovenija, 2021. Dosegljivo: https://www.stat.si/StatWeb/news/Index/9389 [Datum dostopa: 10. 2. 2022]

[2] EPA, Electric vehicle efficiency, USA, 2022. Dosegljivo: https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml

[3] J. F. Tissot, Birth of an idea: Etienne Lenoir and the internal combustion engine, 2020. Dosegljivo: https://charge-magazine.abb.com/birth-of-an-idea-etienne-lenoir-and-the-internal-combustion-engine/ [Datum dostopa: 13. 3. 2022]

[4] Wikipedia, Formula 1 Engines, 2022. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_One_engines#2014–2021 [Datum dostopa: 15. 3. 2022]

[5] Wikipedia, Car, 2022. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Car [Datum dostopa: 12. 2. 2022]

[6] Mercedes Benz, Slika Benz Patent Motorwagen, 2022. Dosegljivo: https://www.mercedes-benz.com/en/classic/museum/benz-patent-motor-car-2/

[7] Wikipedia, History of the electric vehicle, 2022. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle [Datum dostopa: 13. 2. 2022]

[8] J. Vilaró, World Best Cars, 2022. Dosegljivo: https://all-andorra.com/electric-la-jamais-contente-from-1899/ [Datum dostopa: 21. 3. 2022]

[9] Dewhurst Photography, Slika Tesla Roadster, 2008.

[10] Toyota Blog, Toyota Diesel engines engineered cleaner and more efficient, 2015. Dosegljivo: https://mag.toyota.co.uk/toyota-turbodiesel-engines-cleaner-and-more-efficient/ [Datum dostopa: 24. 3. 2020]

[11] BorgWarner Inc., HVH250-090 Electric motor, katalog, 2016. Dosegljivo: https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds---hvh250-090-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a142cd3c_11

[12] M. Česen, Inštitut Jožef Štefan, Izgube energije v pretvorbi in prenosu, 10. 6. 2017. Dosegljivo: http://kazalci.arso.gov.si/sl/content/izgube-energije-v-pretvorbi-prenosu-2

[13] E. Apostolaki, P. Codani, W. Kempton, Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging, Maj 2017. Dosegljivo: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217303730

[14] H. Ritchie, M. Roser, CO_2 and Greenhouse Gas Emissions, 2022. Dosegljivo: https://ourworldindata.org/co2-emissions

[15] B. Kegl, M. Demić, S. Pehan, Ekološka problematika vozil in motorjev z notranjim zgorevanjem. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2009

[16] Ecoscore BE, 2022. Dosegljivo: https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2 [Datum dostopa: 15. 3. 2022]

[17] H. Jääskeläinen, Exhaust Gas Recirculation, 2020, Dosegljivo: https://dieselnet.com/tech/engine_egr.php

[18] Energija Plus d. o. o., Račun za elektriko, Marec 2022.

[19] European Environment Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe, 18.11.2021. Dosegljivo: https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1

[20] Tesla Inc., Model S Plaid, Marec 2022. Dosegljivo: https://www.tesla.com/sl_si/models [Datum dostopa: 25. 3. 2022]

[21] R. Kawamoto, H. Mochizuki, Y. Moriguchi, T. Nakano, M. Motohashi, Y. Sakai, A. Inaba, Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA, *Sustainability*, 2019

[22] BMW Slovenija, Novi M8 Gran Coupe, 2022. Dosegljivo: https://www.bmw.si/sl/all-models/m-series/m8-gran-coupe/2022/bmw-serija-8-gran-coupe-m-avtomobili-tehnicni-podatki.html#tab-0-0 [Datum dostopa: 27. 3. 2022]

[23] AVL List GmbH, Cruise™ Primer, Release 2020 R1, 2021.

[24] Tesla Inc., Model 3 Owner's Manual, Battery, High Voltage, 2022. Dosegljivo: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_gb/GUID-E414862C-CFA1-4A0B-9548-BE21C32CAA58.html [Datum dostopa: 21. 3. 2022]