

**59. srečanje mladih raziskovalcev Slovenije 2025**

**SISTEM ZA REKUPERACIJO ENERGIJE V FORMULI E IN  
FORMULI 1**

ASTRONOMIJA ALI FIZIKA

Raziskovalna naloga

**Avtor:** Nina Vrečko

**Mentor:** Matjaž Črček, prof., II. gimnazija Maribor



Trg Miloša Zidanška 1

Maribor

Maribor, april 2025

## KAZALO VSEBINE

Povzetek .....	III
Abstract .....	IV
Zahvala .....	V
1 Uvod.....	1
1.1 Hipoteze naloge.....	1
1.2 Metodologija dela.....	2
2 Teoretični del.....	3
2.1 Predstavitev sistema delovanja dirkal .....	3
2.1.1 Formula 1- električni rekuperacijski sistem – ERS.....	3
2.1.2 Motor Formule E z regeneracijskim sistemom .....	6
2.2 Raziskovanje delovanja sistemov .....	8
2.2.1 Efektivnost rekuperacije energije na primeru velike nagrade v Monaku.....	9
2.3 Uporaba v avtomobilski industriji.....	17
2.4 Razprava.....	19
3 Družbena odgovornost .....	21
4 Zaključek in sklepi .....	22
5 Viri in literatura .....	24

## KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz sistema ERS v formuli .....	3
Slika 2: Sistem MGU-K .....	4
Slika 3: Sistem MGU-H .....	5
Slika 4: Pogonski sklop Formule E .....	7

## KAZALO GRAFOV

Graf 1: Moč [ kW ]v odvisnosti od razdalje [ m ].....	11
Graf 2: Graf sil v odvisnosti [ N ] od razdalje [ m ].....	12

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava tehničnih lastnosti vozil leta 2018/19 .....	8
---	---

## **POVZETEK**

Namen raziskovalne naloge je bil, s proučevanjem pisnih virov in primerjanjem, raziskati delovanje sistema ERS v Formuli 1 ter delovanje rekuperacije električnih dirkalnikov Formule E. V raziskavi je vsebovana tehnična analiza delov sistema ERS in dirkalnika Formule E, preučevanje fizikalnih procesov, ki omogočajo energetske rekuperacije, primerja va obeh električnih sistemov ter kako rekuperacijski sistemi prispevajo k razvoju energetske učinkovitih vozil v širši avtomobilski industriji. Zastavila sem si hipoteze: regulacije Formule 1 vplivajo na razvoj rekuperiranja energije, večja uporaba regeneracije energije v Formuli 1 bi lahko zmanjšala porabo goriva in povečala energetske učinkovitost dirkalnikov, regeneracija energije bo uspešnejša v primeru Formule E, saj regulacije spodbujajo razvoj takšne tehnologije, ter da se v avtomobilski industriji bolj zgledujejo po Formuli E, saj se gre za električno zasnovano formulo, električni avtomobili pa so za mnoge prihodnost avtomobilске industrije. Raziskovala sem podatke o modelih iz leta 2018/2019 in ugotovila, da regulacije precej ovirajo rekuperacijo energije v Formuli 1 ter da je rekuperacija učinkovitejša v primeru Formule E.

Ključne besede: Formula 1, Formula E, ERS, energija, rekuperacija, avtomobilska industrija, regeneracija, hibridna vozila, električna vozila

## **ABSTRACT**

This research thesis aimed to investigate, through the study of written sources and comparative analysis, the performance of the ERS system in Formula 1 and the performance of the energy recuperation system in Formula E electric racing cars. The research encompasses a technical analysis of the ERS system's components and the Formula E racing car, an examination of the physical processes that facilitate energy recuperation, a comparison of the two electric systems, and an investigation into how energy recuperation systems contribute to the development of energy-efficient vehicles within the broader automotive industry. I set myself the following hypotheses: Formula 1 regulations are influencing the development of energy recuperation, greater use of energy recuperation in Formula 1 could reduce fuel consumption and increase the energy efficiency of racing cars, energy recuperation will be more successful in Formula E as regulations are encouraging the development of such technology, and that the automotive industry models itself more after Formula E, as it is an electric based formula and electric cars are seen by many as the future of the automotive industry. I researched data on 2018/2019 models and found that regulations are a significant barrier to energy recuperation development in Formula 1 and that energy recuperation is more effective in Formula E.

Keywords: Formula 1, Formula E, ERS, energy, recuperation, automotive industry, regeneration, hybrid vehicles, electric vehicles

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju za vso pomoč, namenjen čas in trud pri raziskovalni nalogi.

# 1 UVOD

Formula 1, uradno znana kot »FIA Formula One Championship« je najvišji mednarodni dirkalni razred za enosedelne dirkalne avtomobile, ki se je uradno pričel leta 1950. Velja za vrhunec motošporta ter za najprestižnejše tekmovanje v avtomobilskih dirkah na svetu (Formula 1, 2024). Od leta 2014 v dirkalnikih uporabljajo sistem za rekuperacijo energije, znan tudi kot »ERS«. Formula E, uradno znana kot »ABB FIA Formula E World Championship«, se je pričela v letu 2014 in je prvo mednarodno prvenstvo v enosedelnih vozilih s popolnoma električnim pogon (Formula E, brez datuma).

Oba motošporta sta pomembna, saj vplivata na razvoj energetske učinkovitih vozil v širši avtomobilski industriji. Zanimalo me je, do kolikšne mere to v resnici drži. Zaradi finančnih omejitev pri izvedbi eksperimenta sem se problema lotila z raziskovanjem dostopnih podatkov.

Cilj raziskovalne naloge je bilo spoznati delovanje sistemov dirkalnikov, kateri dejavniki vplivajo na njuno učinkovitost ter kako se ti sistemi implementirajo v avtomobilsko industrijo. Glede na rezultate raziskav sem želela tudi opredeliti, kateri sistem je učinkovitejši, ali so možne izboljšave obstoječih sistemov za regeneracijo energije ter nenazadnje, kateri sistem je primernejši za implementiranje v cestne avtomobile.

## 1.1 Hipoteze naloge

Pri raziskovanju sem si zastavila naslednje hipoteze:

- Regulacije Formule 1 vplivajo na razvoj rekuperiranja energije
- Večja uporaba regeneracije energije v Formuli 1 bi lahko zmanjšala porabo goriva in povečala energetske učinkovitost dirkalnikov.
- Regeneracija energije bo uspešnejša v primeru Formule E, saj regulacije spodbujajo razvoj takšne tehnologije
- V avtomobilski industriji se bolj zgledujejo po Formuli E, saj se gre za električno zasnovano formulo, električni avtomobili pa so za mnoge prihodnost avtomobilske industrije

## **1.2 Metodologija dela**

Razvidno rekuperiranje energije vozil Formule 1 je težje prikazano z eksperimentom na manjšem sistemu, saj se v tem primeru ukvarjamo z velikimi energijami, hkrati pa ni bilo dovolj tehnoloških javno dostopnih podatkov o obeh motošportih, ki bi mi omogočali replikacijo pogojev s pomočjo programov. Za raziskovanje sem se zato odločila uporabiti metodo proučevanja pisnih virov ter metode primerjave, kjer sem s pomočjo poznavalcev področja rekuperacije ter uradnih spletnih strani športov pridobivala podatke, potrebne za razumevanje in primerjavo sistemov.

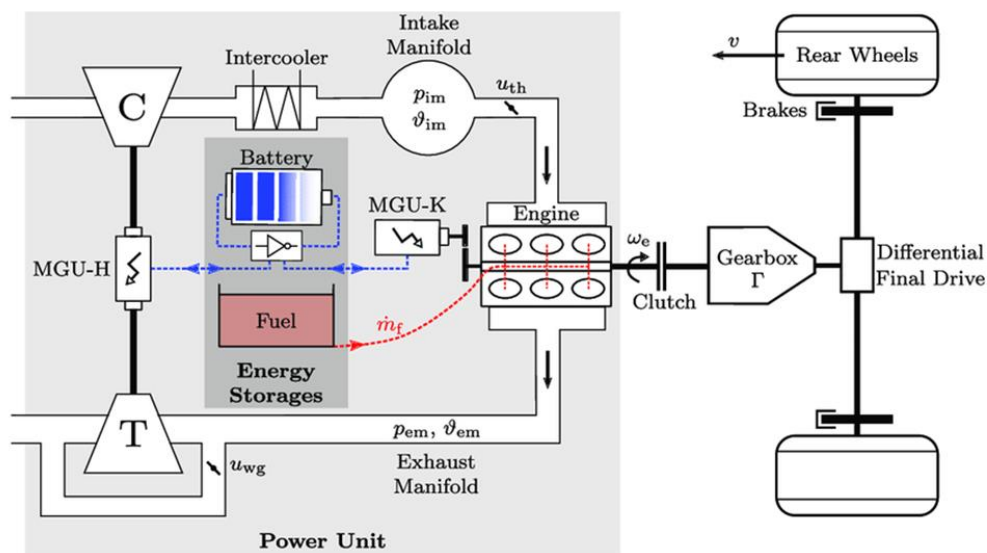
## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 Predstavitev sistema delovanja dirkal

Z uredbo evropskega parlamenta (2022), da bodo od leta 2035 avtomobili brez emisij CO<sub>2</sub>, je postalo jasno, da so alternativa avtomobilom na gorivo električni avtomobili. Z vzponom električnih vozil je pomembno razumevanje fizikalnih procesov znotraj sistema ERS in električnega motorja Formule E, ki se vedno bolj postopno prenašata na cestne avtomobile. V nadaljevanju bodo razloženi pojavi, bistveni za fizikalno razumevanje obeh sistemov.

#### 2.1.1 Formula 1- električni rekuperacijski sistem – ERS

Električni rekuperacijski sistem, s kratico ERS, je del hibridnega pogonskega sistema Formule ena. Obnavlja energijo, ki bi se sicer izgubila z zaviranjem ter jo pretvori v moč, ki se shrani za poljubno uporabo med dirko za večjo zmogljivost vozila. Je pomemben del pogonske enote avtomobila (PU), ki ima dve glavni komponenti: kinetično motorno generatorsko enoto (MGU-K) in toplotno motorno generatorsko enoto (MGU-H). Shranba energije, znana kot ES, je visokozmogljiva litij-ionska baterija. (Richmond, 2023)



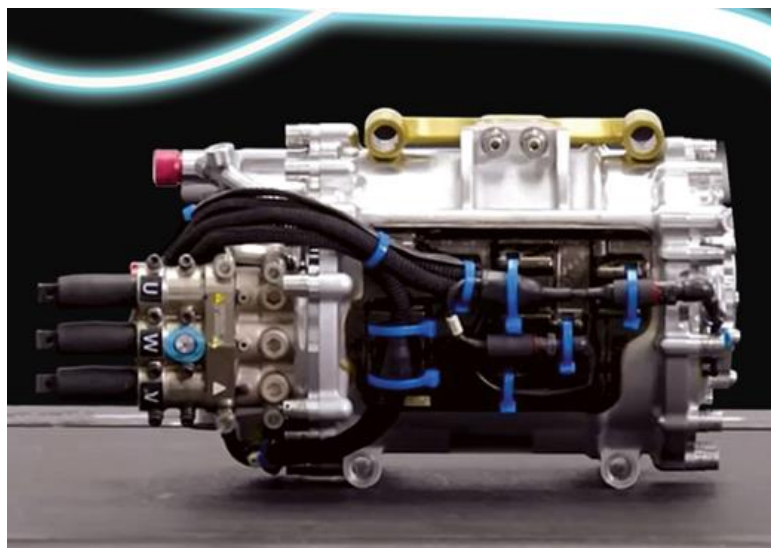
Slika 1:

Shematični prikaz sistema ERS v formuli

VIR: (Balema in sodelavci., 2020)

### 2.1.1.1 Delovanje kinetične motorne generatorske enote - MGU-K

MGU-K, ki je bila razvita iz prvotnega sistema za obnavljanje kinetične energije (KERS), med zaviranjem obnavlja kinetično energijo in jo pretvarja v električno energijo, ki jo shrani ali uporabi pogonska enota. Povezana je z odmično gredjo motorja in se uporablja za povečanje pogonske moči avtomobila ali za rekuperacijo energije med zaviranjem. (Balema in sodelavci, 2020). Lahko deluje kot generator ali kot motor. Glede na regulacije za 69. sezono športa (Fédération Internationale de l'Automobile, 2018), moč te generatorske enote ne sme presegati 120 kW in ne sme preseči navora 200 Nm, tehtati pa mora minimalno 7 kilogramov. Največja dovoljena rekuperacija na krog je 2MJ, največja dovoljena uporaba na krog pa je 4MJ.

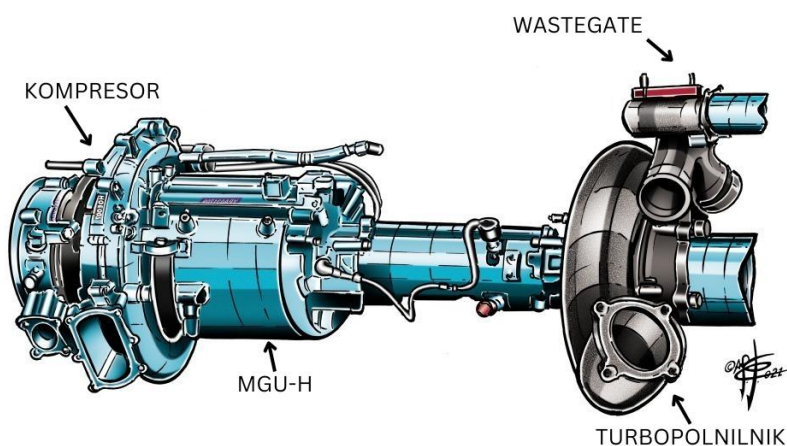


Slika 2:  
Sistem MGU-K

VIR: (PETRONAS Motorsports, 2022a)

### 2.1.1.2 Delovanje toplotne motorne generatorske enote – MGU-H

Kakor MGU-K, lahko MGU-H deluje kot generator ali motor. Nahaja se na osi med kompresorjem ter turbopolnilnika, ki ima na sebi »Wastegate«, ki uravnava pritisk znotraj njega. Vse skupaj se nahaja sredi V-oblike motorja. Svojo električno energijo pridobi z uporabo odpadne energije iz izpušnih plinov, ki jo je turbopolnilnik uporabil za vrtenje gredi in to je tisto, kar vrti to motorno generatorsko enoto in ustvarja električno energijo. Nastala energija lahko gre iz MGU-H v baterijo, da se shrani za poznejšo uporabo, ali pa gre lahko neposredno v MGU-K, da poveča moč ročice. Bolj kot za povrnitev energije je MGU-H bil uveden z namenom izboljšanja pospeševanja nizke hitrosti in odstranitve turbo-zamika bolj kot povrnitve odpadne energije (PETRONAS Motorsports, 2022b). Čeprav v regulacijah ni eksplicitne omejitve rekuperacije in uporabe, glede na regulacije Fédération Internationale de l'Automobile (2018) razlika med največjim in najmanjšim stanjem napolnjenosti ES ne sme preseči 4 MJ kadar koli je vozilo na stezi, kar pomeni, da je uporabna energija, ki lahko kadar koli odteče iz baterije ali vanjo, omejena na 4 MJ. Visoke stopnje rekuperacije iz MGU-H lahko ustvarijo tudi dodatno toploto, ki lahko obremeni hladilni sistem in povzroči izgube učinkovitosti ali mehanske omejitve.



Slika 3:

Sistem MGU-H

VIR:(Sommerfield, 2022)

### 2.1.2 Motor Formule E z regeneracijskim sistemom

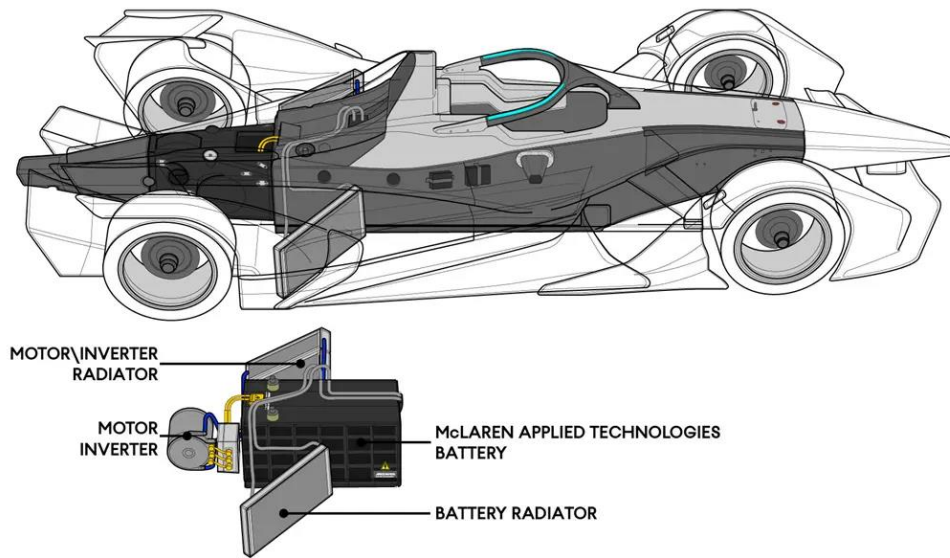
Večina je seznanjena s pogonskim sklopom dirkalnega avtomobila z motorjem z notranjim zgorevanjem, kot so; rezervoar za gorivo, motor, menjalnik in elektronika, ki skrbi za sisteme za vžig in vbrizgavanje goriva. Z električnim dirkalnikom je mogoče primerjati osnovno postavitev, vendar je v obeh le malo enakega. Baterija je analogna rezervoarju za gorivo, saj shranjuje energijo za motor. Čeprav je baterija veliko težja za enako shranjevanje energije kot bencin, pa baterija med dirko ne postane lažja, kot je to pri rezervoarju za gorivo. Elektromotor je zamenjava za motor z notranjim izgorevanjem. Elektromotor manjši in lažji od enakovrednega motorja z notranjim izgorevanjem. Zraven tega ima samo en gibljiv del, zato je manj ležajev, trenja in stvari, ki bi šle narobe. Resnična prednost je, da lahko motor deluje tudi kot generator in med zaviranjem ustvarja električno energijo, ki se lahko shrani v bateriji. Ker lahko ena naprava deluje v obeh načinih, se motor pogosto imenuje motorna generatorska enota ali na kratko MGU. Še več, motor ustvari polni navor od nič vrtljajev na minuto, namesto veliko višjih vrtljajev na minuto kot pri motorju z notranjim izgorevanjem. Ker imajo ti avtomobili tako močan izhodni navor, ni potrebe po večstopenjskem menjalniku za pomnožitev navora. Dirkalniki tako nimajo večstopenjskega menjalnika. Ni potrebe po vbrizgavanju goriva ali vžigu. Elektronika na električnem dirkalniku je potrebna za preklon električnega toka iz AC v DC med motorjem in baterijo (Scarborough, 2020).

Dirkalniki formule E delujejo kot vsa druga električna vozila in si delijo iste temeljne komponente, ki so:

- baterijski sklop, ki zagotavlja moč,
- inverter, ki odvzame električno energijo, ki jo ustvari baterija, in jo pretvori iz enosmernega toka (DC) v naboj izmeničnega toka (AC),
- motor, ki uporablja to moč za pogon menjalnika,
- menjalnik, ki prenaša energijo, ki jo ustvari motor, na kolesa

Ob napajanju menjalnika ima elektromotor še eno ključno vlogo pri električnih vozilih: v njem je regenerativni zavorni mehanizem, ki – ko se popusti pedala za plin in se pritisnejo zavore – upočasni vozilo in pretvori njegovo kinetično energijo v električno, ki polni baterijo. Inverter ima tudi vlogo pri regenerativnem zaviranju: ponovno pretvori izmenični naboj nazaj v enosmerni, kar omogoča polnjenje paketa baterij. Električni motorji ob tem, da so čistejši,

ponujajo dodatno, pomembno prednost pred svojimi bencinskimi sorodniki, saj imajo veliko manj sestavnih delov imajo znatno nižje stroške vzdrževanja (Enel X, n.d.).



Slika 4:  
Pogonski sklop Formule E

VIR: (Scarborough, 2020)

## 2.2 Raziskovanje delovanja sistemov

Zaradi nedostopnosti statističnih podatkov ter težko primerljivih podatkov sistemov na manjšem sistemu v primeru eksperimenta, sem se odločila za analizo različnih raziskav na področju motošporta, ki fizikalno preučujejo učinkovitost ERS sistema ter FE motorja in na podlagi podatkov ustvariti primerjavo ter ugotoviti kakšen je njun razvojni potencial v »zeleni« prihodnosti.

Pri analiziranju podatkov sem uporabila različne pisne vire, saj sama tovrstnih eksperimentov nisem imela možnosti opraviti. Ob pridobivanju podatkov sem naletela na oviro, saj ekipe le redko objavijo podatke, saj bi jih s tem razkrile konkurenčnim ekipam. Ker najnovejši podatki niso na voljo javnosti, sem se odločila primerjavo zasnovati na dirkaških sezonah iz let 2019 za Formulo E in 2018 za Formulo 1, ter si za boljše razumevanje sistemov pomagati s takratnimi regulacijami. Ob primerjavi se je potrebno zavedati, da so ob električnih sistemih tudi druge tehnične lastnosti, ki lahko vplivajo na učinkovitost sistemov in so v tem primeru prilagojene glede na progo v Monaku.

Regulacije leta 2018	Formula 1	Formula E
Največja moč motorja	708–746 kW	250 kW, na dirki 200 kW
Največja možna obnova energije	120 kW	250 kW (25%)
Največja možna masa vozila	733kg (brez goriva)	900kg (z voznikom)
Največja možna hitrost	293 km/h	280 km/h
Kapaciteta goriva/energije	110 kg	54 kWh

Tabela 1:

Primerjava tehničnih lastnosti vozil leta 2018/19

VIR: (Fédération Internationale de l'Automobile, 2018)

## 2.2.1 Efektivnost rekuperacije energije na primeru velike nagrade v Monaku

Monako je ena najtežjih in tehnično najbolj zahtevnih dirkališč, kjer prevladujejo počasni in tehnični ovinki ter ozke ulice. Je tudi eno izmed dirkališč, ki je skupno obema dirkaškima kategorijama. V Formuli 1 in Formuli E so zmogljivosti motorja in hitrost ključnega pomena. V Monaku je manj priložnosti za dolge pospeške, zaradi česar ni tako pomembna največja moč motorja kot na nekaterih progah z dolgimi ravninami ter manj ostrimi ovinki.

### 2.2.1.1 Rekuperacija energije v Formuli 1

Dirka Formule 1 v Monaku obsega 78 krogov ali 260, 52 km, en krog pa meri 3, 34 km (Monaco Grand Prix, ni datuma) Potreben čas za en krog pa je 1: 15, 100. Največja hitrost je približno 293 km/h, minimalna pa 47 km/h, v ovinku pa je povprečna hitrost 102 km/h. (Boretti, 2019)

Stopnja tlačne sile aerodinamike avtomobila je visoka, medtem ko je razmerje aerodinamičnega izkoristka zelo nizko. Motor je 43 % časa polno obremenjen. Na krog je 12 zaviralnih območij in 35 menjav prestav. Leta 2018 je bil najhitrejši krog na dirki 1: 14, 260, v kvalifikacijah pa je znašal 1: 10, 810. Podatki telemetrije, pridobljeni z uradne strani Formule 1 (2018) je Boretti (2019) potrdil s simulacijo časa kroga z uporabo programske opreme Optimum G, s pomočjo katere je pridobil tudi drugače javnosti nedostopne podatke. Največji pospešek je 18, 01 m/s<sup>2</sup>, najmanjši pa -64, 11 m/s<sup>2</sup>. S pomočjo formule lahko izračunamo g-sile:

$$G \text{ sile} = \frac{a}{g}$$

kjer je  $a$  pospešek in  $g$  sila gravitacije na zemlji, ki je enaka približno 9, 81 m/s<sup>2</sup>. Torej, medtem ko so pozitivni pospeški največ 1,84 g, so pojemki (zaviranje) -6,54 g.

Za analizo pretoka energije je potrebno s pomočjo podatkov hitrosti izračunati pogonsko in zavorno energijo. To naredimo z uporabo poenostavljene enačbe avtomobila, ki upošteva samo maso avtomobila ter aerodinamični in kotalni upor. Če je  $F_{P/Z}$  pogonska ali zavorna sila in je  $F_B$  zavorna sila zaradi aerodinamičnega upora in kotalnega upora v  $N$ , potem velja:

$$(F_{P/Z} - F_B) = m \cdot a$$

kjer je  $m$  masa avtomobila v kg in  $a$  je pospešek v  $\frac{m}{s^2}$ . V tem primeru upoštevamo maso 760 kg.

Pri aerodinamičnem uporu je aerodinamična sila upora:

$$F_{B, A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot k_u \cdot S$$

kjer je  $\rho$  gostota zraka,  $k_u$  koeficient upora in  $S$  čelna površina avtomobila,  $v$  pa hitrost v m/s. Privzamemo sledeče podatke:  $\rho=1,205 \text{ kg/m}^3$  in  $k_u=0,85$  za referenčno površino  $S =1,5 \text{ m}^2$ .

Kar zadeva kotalni upor, vzamemo kotalno silo kot

$$F_B = k_u \cdot m \cdot g$$

kjer je  $k$  koeficient kotalnega upora - brezdimenzijski in  $g$  je gravitacijski pospešek,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Kotalni koeficienti za pnevmatike, polnjene z zrakom, običajnih osebnih avtomobilov na suhih cestah so:

$$k = 0,005 + \left(\frac{1}{p}\right) \cdot [0,01 + 0,0095 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2]$$

kjer je  $p$  pnevmatika tlak (bar) in  $v$  je hitrost (m/s). To formulo lahko uporabimo s  $p = 2,5$  bara, ki je optimistična ocena izgub zaradi kotalnega trenja dirkalnika F1. Dobimo:

$$k = 0,005 + \left(\frac{1}{2,5}\right) \cdot [0,01 + 0,0095 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2]$$

$$k = 0,005 + 0,4 \cdot [0,01 + 0,0095 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2]$$

$$k = 0,005 + 0,4 \cdot 0,01 + 0,4 \cdot 0,0095 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

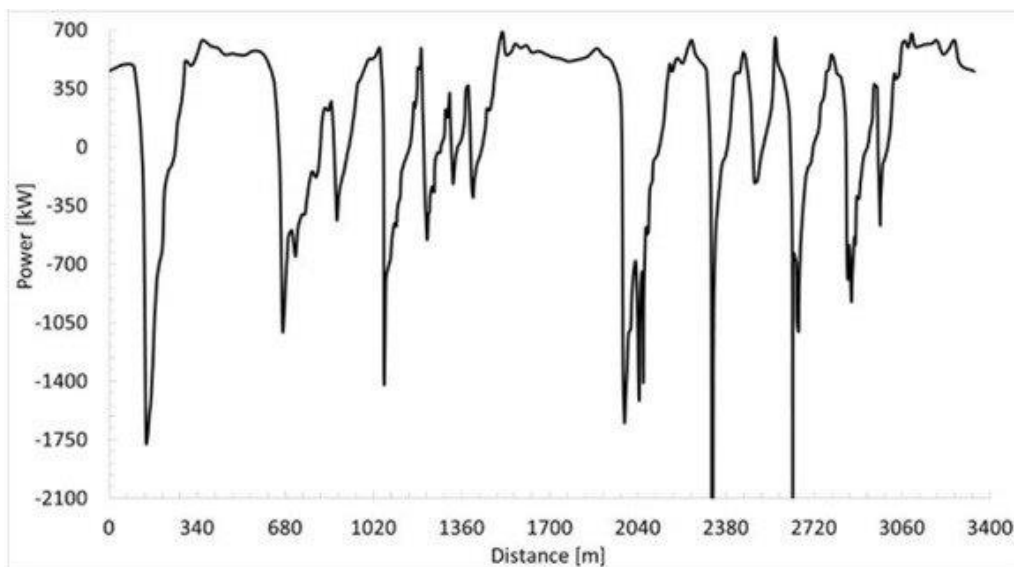
$$k = 0,009 + \frac{0,0038}{1,296 \cdot 10^5} \cdot v^2$$

$$c = a + b \cdot v^2$$

kjer je  $a = 9,00 \cdot 10^{-3}$  in  $b = 4,92 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2/\text{m}^2$  (energija na enoto mase). Vzdolžne sile, ki delujejo na avtomobil, aerodinamične sile, sile kotalnega trenja in vztrajnostne sile, so kadar koli uravnotežene s pogonsko silo, ki jo zagotavljata ICE (motor) in MGU-K, ki delujeta kot motor, in zavorno silo, ki jo proizvajajo torne zavore in MGU-K, ki deluje kot generator. Vztrajnostne sile so veliko večje od aerodinamičnih sil, ki so veliko večje od sil kotalnega trenja. Pozitivna sila je veliko manjša od negativne sile. Pogonska in zavorna moč sta zmnožek pogonske in zavorne sile s hitrostjo:

$$P_{P/Z} = F_{P/Z} \cdot v$$

Ta analiza vrne "referenco" pogonske in zavorne sile ter moči iz razporeda hitrosti in zgornjih okoljskih spremenljivk. Iz pogonske in zavorne moči se nato s časovno integracijo izračunata pogonska in zavorna energija z vrednostmi iz simulacije, ki predstavljajo pogonsko in zavorno moč.

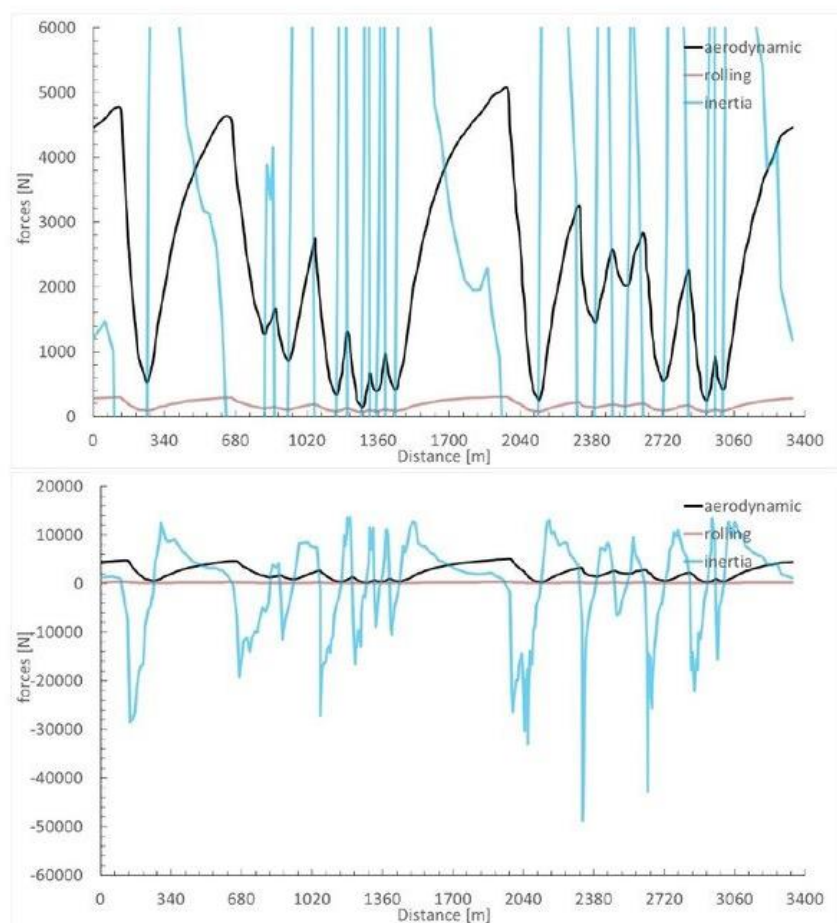


Graf 1:

Moč [ kW ] v odvisnosti od razdalje [ m ]

VIR: (Boretti, 2019)

Medtemko je največja pogonska moč 683,16 kW, je najmanjša moč, tj. zavorna moč,  $-2790,07$  kW. MGU-K z močjo 120 kW zelo malo pomaga pri rekuperaciji zavorne energije, hkrati pa omogoča enako trenje zavorne zmogljivosti. Medtem ko se zaviranje doseže s kombiniranjem trenja in zavornih sil generatorja MGU-K, se lahko regenerativno zaviranje izvede le strateško, ko ni potrebe po obrambi, pridobivanju položaja ali doseganju dobrega časa na krog. Čeprav se je integracija tornega in regenerativnega zaviranja močno izboljšala od uvedbe prvih sistemov za rekuperacijo kinetične energije v F1 leta 2009, je največja zavorna moč tornih zavor veliko večja od regenerativne zavorne moči, ki na grafu presega 2000 kW. Glede na regulacije je omejena na samo 120 kW (Fédération Internationale de l'Automobile, 2011). Ko so potrebna zelo ostrava zaviranja, je prostora za regenerativno zaviranje zelo malo, vozniki pa ga ne uporabljajo, ko izzivajo ali branijo položaj ali poskušajo doseči najboljši čas za krog dirkališča. (Boretti, 2019)



Graf 2:

Graf sil v odvisnosti [ N ] od razdalje [ m ]

VIR: (Boretti, 2019)

Grafa prikazujeta pogonsko in zavorno energijo ter zavorno energijo, ki bi jo optimistično lahko povrnili s popolno integracijo trenja in sil MGU-K generatorja. Skupna pogonska energija je 18,28 MJ. Skupna zavorna energija je več kot polovica,  $-9,77$  MJ. S popolno integracijo tornih in regenerativnih zavor bi lahko rekuperirana energija (72 % povratne vožnje) znašala  $-2,02$  MJ, tj. skupno pogonsko energijo, zahtevano za motor z notranjim zgorevanjem, bi lahko zmanjšali na 16,26 MJ. Po pravilih je obnovljiva energija MGU-K omejena na 2,00 MJ, MGU-H pa nima omejitve, vendar hkrati ni javno dostopnih podatkov o zmogljivostih rekuperacije. Zato predpostavimo, da vso obnovljeno energijo pošilja v MGU-K komponento ali baterijo. V določenem krogu, ker regenerativno zaviranje pomeni podaljšan čas kroga, je obnovljena energija zelo verjetno enaka nič, medtem ko se nekaj obnovljene energije prejšnjega kroga uporabi za ustvarjanje dodatnega navora v primerjavi z motorjem z notranjim zgorevanjem, ki se uporablja samo med krogom. Formula za 120 kW 2 MJ na krog

dovoljuje obnovo le minimalne količine zavorne energije. Če bi energetska učinkovitost lahko bila gonilna sila za razvoj pogonskih sklopov, ni razloga, zakaj ne bi ciljali na precej večji delež od 9,77 MJ zavorne energije, približno 50 % od 18,28 MJ pogonske energije. Medtem ko mora trenutno ICE zagotavljati skoraj vseh 18,28 MJ pogonske energije na krog, s popolnim sistemom za rekuperacijo kinetične energije še vedno obstaja možnost zmanjšanja 50 % potreb po energiji goriva. 2 MJ v primerjavi z 9,77 MJ potencialno obnovljive energije je le 20 %. Poleg tega bi bilo z večjimi močmi MGU-K mogoče povrniti več na račun zmanjšane neučinkovitosti regenerativnega zaviranja. Vendar do zaviranja nikoli ne pride pri tako nizki moči kot 120 kW med dobrimi krogi. Poleg tega bi lahko dodatna moč MGU-K, ko je bilo potrebno za pospeševanje avtomobila, dodatno izboljšala pospešek in najvišjo hitrost. (Boretti, 2019)

Poraba goriva po podatkih za Monako je 1,5 kg, kar je v primerjavi z drugimi progami nizko. Pravilne enote so verjetno litri in ne kg na število krogov, ki jih je 78. Dirkalniki formule 1 pa ne smejo porabiti več kot 105 kg goriva na posamezno dirko. Zato je verjetnejša poraba goriva 1,5 litra na krog ali 1,16 kg na krog, če vzamemo gostoto bencina 0,77 kg/liter. Poraba goriva 90,09 kg med dirko je gotovo veliko bolj realna. S porabo goriva, ocenjeno na 1,16 kg na referenčni krog, kar je v povprečju veliko počasneje od časa kroga 1,15,100, se nižja kurilna vrednost 43,4 MJ/kg pretvori v 50,34 MJ energije goriva na krog. To pomeni učinkovitost pretvorbe goriva 32 %, če upoštevamo zmanjšano pogonsko moč 18,28 MJ iz 2 MJ rekuperirane energije, in 36 %, če ne upoštevamo rekuperirane energije, kar odraža pozitivni vpliv rekuperirane energije. Zaradi tega se zdi, da je učinkovitost padla, v resnici pa se za isto delo porabi manj goriva. Učinkovitost pretvorbe goriva motorja z notranjim zgorevanjem bi se morda še lahko izboljšala, saj se pri 32 % do 36 % učinkovitosti pretvorbe energije goriva večina energije goriva, porabljene v ciklu, še vedno izgubi v hladilni tekočini in odpadnih izpušnih plinih. Vendar pa se mora izboljšati tudi količina rekuperirane zavorne energije, saj sta rekuperirana 2 MJ samo 20 % celotne zavorne energije v obravnavanem primeru. Večja uporaba MGU-H in sprejetje večjih in učinkovitejših MGU-K in energijske shrambe sta prvi potrebni spremembi. (Boretti, 2019)

### 2.2.1.2 Rekuperacija energije v Formuli E, kombinirana z električnih motorjem

Za dirkalnike Formule E dirka brez regeneracije energije ne bi bila izvedljiva, ker bi imeli premajhno kapaciteto baterije za prevoz celotne dirke. Regeneracija je ključnega pomena za povečanje dosega in omogočanje dirkanja brez potrebe po dodatnem polnjenju med dirko.

Dirka Formule E v Monaku trenutno obsega 39 krogov, kjer vsak meri 3,34 km in ima 19 zavojev (Formula E, 2024), rekordni čas za en krog pa znaša 1:28,773 minute. (Formula E, 2023). V letu 2018 je dirka obsegala 51 krogov, kjer je vsak meril 1,765 km in obsegal 12 zavojev. Najhitrejši čas za en krog je na dirki leta 2019 glede na podatke s spletne strani Formule E (ni datuma) znašal 0:52,385. Največja hitrost je približno 280 km/h, dirkalnik formule E Gen2 pa ima zmožnost pospeševanja od 0 do 100 km/h v 2,8 s. Glede na uradne podatke največja regeneracija moči znaša 250 kW. Kapaciteta baterije znaša 54 kWh. (Formula E, 2018). Količina energije, ki jo lahko MGU dostavi RESS (baterija) znaša največ 52 kWh (Fédération Internationale de l'Automobile, 2018), kar pomeni, da voznik prične dirko z 52 kWh.

S pomočjo analize opravljenega aerodinamičnega testiranja na modelu formule E s hitrostjo 50 m/s na simulacijski platformi, pridobimo podatke, da zračni upor znaša 1053 N, koeficient zračnega upora pa  $K_c$  0,62. Pri tem je bila uporabljena čelna površina 1,11 m<sup>2</sup> ter gostota zraka 1,225 kg/m<sup>3</sup>. (Airschaper, 2018).

Dirkalniki Formule E imajo aerodinamiko, prilagojeno za zmanjšanje porabe energije, saj morajo biti čim bolj učinkoviti z električno energijo. V primerjavi z dirkalniki Formule 1 so manj usmerjeni k zagotavljanju ekstremnih hitrosti (Smith, 2023). Aerodinamični upor v Formuli E je precej optimiziran, vendar je zaradi narave tekmovanja na splošno nižji kot v Formuli 1, kjer se lahko spreminjajo nastavitve glede na različne proge. Kotalni upor je neposredno povezan z gumami in njihovimi lastnostmi. V Formuli E so leta 2018 uporabljali enotne 18-palčne pnevmatike, ki jih proizvaja podjetje Michelin. Zasnovane so bile tako, da so zagotavljale dobro oprijemljivost v vseh vremenskih razmerah, vendar zaradi električnih motorjev in hitrih pospeškov niso ustvarjale tako velikega trenja kot gume v Formuli 1 (Formula E, 2018). V sezoni Formule E 2018/2019 so Michelinovi inženirji še naprej premikali meje, s posebnim poudarkom na masi tretje generacije pnevmatik, ki je postala kar 2,5 kg manjša od prejšnje različice. Tako je skupni prihranek teže znašal skoraj 10 kg na komplet štirih pnevmatik (Rubber Journal Asi, 2022), vendar natančnih podatkov o kotalnem uporu ni objavljenih, javnosti pa ni dostopno dovolj podatkov za njegov izračun. Zato pri računanju

uporabljamo sprva povprečni čas za celotno dirko, ki delno vsebuje ta podatek ter druge realne pogoje.

S pomočjo spletne strani Formule E izračunamo iz časov, potrebnih za uspešno zaključitev dirke, iz leta 2019, povprečen čas za celotno dirko:

Vsi časi, podani kot minuta, sekunda, milisekunda:

46: 05, 547; 46: 05, 748; 46: 06, 808; 46: 06, 986; 46: 11, 762; 46: 21, 760; 46: 22, 395;

46: 23, 659; 46: 24, 098; 46: 24, 407; 46: 27, 035; 46: 27, 400; 46: 32, 481; 46: 37, 408;

46: 54, 947

Vsak čas pretvorimo v skupno število sekund z uporabo formule:

$$t = \text{minute} \cdot 60 + \text{sekunde} + \frac{\text{milisekunde}}{1000}$$

Primer:

$$t_1 = 46 \cdot 60 + 5 + \frac{547}{1000}$$

$$t_1 = 2765,547 \text{ s}$$

Ko imamo vse čase v sekundah, najdemo njihovo povprečje:

$$t_{\text{povp}} = \frac{\sum \text{vseh časov v sekundah}}{\text{število dirkačev}}$$

$$t_{\text{povp.}} = \frac{(2765,547 + 2765,748 + 2766,808 + \dots + 2814,947)}{15}$$

$$t_{\text{povp.}} = 2782,162 \text{ s}$$

Izračunamo še celotno opravljeno pot tako, da pomnožimo dolžino enega kroga s številom krogov:

$$s_2 = s_{\text{krog}} \cdot 51$$

$$s_2 = 1765 \text{ m} \cdot 51$$

$$s_2 = 90\,015 \text{ m} = 90,015 \text{ km}$$

S pomočjo časa in poti lahko izračunamo povprečno hitrost, ki meri:

$$v_{\text{povp.}} = \frac{s_1}{t_{\text{povp.}}}$$

$$v_{\text{povp.}} = \frac{90\,015\text{ m}}{2782,162\text{ s}}$$

$$v_{\text{povp.}} = 32,354\text{ m/s} = 116,5\text{ km/h}$$

Izračunamo čas, potreben za en krog:

$$t_{\text{krog}} = \frac{s_{\text{krog}}}{v}$$

$$t_{\text{krog}} = \frac{1765\text{ m}}{32,354\text{ m/s}}$$

$$t_{\text{krog}} = 64,552\text{ s}$$

S sklepanjem s pomočjo podatka, da pri 50 m/s zračni upor znaša 1053 N ugotovimo, da pri povprečni hitrosti zračni upor znaša 681,375 N.

Izračunamo moč, potrebno za premagovanje zračnega upora:

$$P = F_u \cdot v$$

$$P = 681,375\text{ N} \cdot 32,354\text{ m/s}$$

$$P = 22045,207\text{ W}$$

Sledi izračun energije, porabljene za en krog:

$$W_{\text{krog}} = P \cdot t_{\text{krog}}$$

$$W_{\text{krog}} = 22045,207 \cdot 64,552\text{ s}$$

$$W_{\text{krog}} = 1423062,202\text{ W} = 0,39\text{ kWh}$$

Formula E dovoljuje regeneracijo največ 25 % porabljene energije:

$$W_{\text{regen max.}} = W_{\text{krog}} \cdot 0,25$$

$$W_{\text{regen max.}} = 0,39\text{ kWh} \cdot 0,25$$

$$W_{\text{regen max.}} = 0,0975\text{ kWh} = 3510 \cdot 10^6\text{ J}$$

Za še bolj natančne izračune bi bilo treba vključiti kotalni upor (odvisen od mase in podlage), pospeševanja in zaviranja (ključna za regeneracijo energije) ter spremembe hitrosti in obremenitve skozi dirko.

To bi zahtevalo bolj podrobno simulacijo ali dodatne podatke iz telemetrije vozila, ki trenutno niso dostopni javnosti.

### 2.3 Uporaba v avtomobilski industriji

Regeneracijski sistemi so dandanes že prisotni v avtomobilski industriji, posebej pri električnih vozilih z regeneracijskim zaviranjem, ki pretvarjajo kinetično energijo v električno. Namesto da bi voznik za ustavljanje avtomobila ves čas uporabljal mehanske zavore, se v fazi regeneracije oziroma regenerativnega delovanja motorja obrne, e-stroj začne delovati kot generator in kinetično energijo avtomobila namesto v toploto pretvarja v električno energijo. Boj intenzivno kot deluje, več energije proizvaja - in bolj upočasnjuje avto. Z regenerirano energijo potem polni visokonapetostno (pogonsko) baterijo. Ta energija (električna) pa se potem spet porablja za pogon. Takšen sistem uporabljajo polni hibridi (FHEV), priključni hibridi (PHEV), ter blagi hibridi (MHEV).

Priključni hibrid (PHEV) z elektromotorjem in motorjem z notranjim zgorevanjem učinkovito združuje dva pogona. Baterijo je za razliko od ostalih hibridov mogoče polniti tako z regeneracijo energije kot tudi preko zunanjih virov, kot so polnilne postaje in vtičnice. (Audi Slovenija, ni datuma). Odvisno od vozila, bo vozilo opremljeno z veliko baterijo, ki običajno zadostuje za obseg od 35 do 77 kilometrov. Električni motor se nato običajno uporablja za počasnejša potovanja, čeprav bi se motor z notranjim zgorevanjem lahko vklopil, če je potrebno, tudi če baterija ni prazna (Cocoon Vehicles Ltd, 2024).

Hibridi s samopolnjenjem, včasih imenovani tudi polna hibridna električna vozila (FHEV), so pogosto znani preprosto kot hibridi. Združujejo hibridno baterijo s konvencionalnim motorjem z notranjim zgorevanjem za povečanje moči in izboljšanje učinkovitosti. Baterija se med vožnjo polni z regenerativnim zaviranjem. Hibridna vozila imajo manj popolnoma električnega dosega kot priključni hibridi, vendar so še vedno sposobna prevoziti kratke razdalje le na električni pogon pri nižjih hitrostih. (Ford New Zealand, ni datuma)

Blagi električni hibrid (MHEV), imenovan tudi akumulatorsko podprti hibrid (BAHV) ima osnovno mehaniko hibrida z le lahkim električnim napajanjem (običajno 48-voltni električni sistem) (ROLLiN' Insurance, ni datuma). Deluje tako, da ima tradicionalni motor z notranjim izgorevanjem poleg majhne baterije in električnega motorja. Električni motor pomaga tradicionalnemu motorju, na splošno pri nizkih vrtljajih, da zadrži nizke emisije in zagotavlja dodatno moč za sisteme, kot sta klimatska naprava in sistemi za hlajenje motorja. Električni motorji lahko dodatno okrepijo motor, kar vozilu omogoči nekoliko hitrejšo pospeševanje v primerjavi z avtomobili brez blagega hibridnega sistema (Cocoon Vehicles Ltd, 2024).

V teh treh sistemih regenerirana energija nudi podporo motorju z notranjim zgorevanjem med pospeševanjem ali pri zagonu, kar zmanjšuje porabo goriva in emisije, napajanje električnih sistemov avtomobila kakor je klimatska naprava, pri PHEV in FHEV pa omogoča tudi vožnjo zgolj na električni pogon.

Poznamo tudi baterijska električna vozila (BEV), ki delujejo izključno na električnem motorju, ki ga poganja baterija, zato fosilno gorivo ni potrebno, baterija pa se polni z zunanjimi napajalniki (Opel, ni datuma). Primer takšnega vozila so Jaguarjevi I-PACE modeli, ki so svoj rekuperacijski sistem razvili po zgledu Formule E. Jaguar svojo prisotnost v Formuli E uporablja kot razvojno platformo za tehnologije električnih vozil, zlasti za optimizacijo rekuperacijskega sistema. Ta omogoča učinkovito izrabo energije pri zaviranju, kar neposredno vpliva na povečanje dosega serijskih modelov (Jaguar, ni datuma).

## 2.4 Razprava

V primerjavi s Formulo E je Formula 1 bila zmožna manjše regeneracije energije in je kljub izračunanem presegu 2,02 MJ omejena na 2,00 MJ, s čimer sem potrdila hipotezo, da regulacije vplivajo na razvoj rekuperiranja energije. Formula E je medtem glede na izračune lahko rekuperirala 3510 MJ. S tem sem potrdila hipotezo, da je regeneracija energije uspešnejša v primeru Formule E in glede na analizo ter raziskano delovanje dirkalnika Formule E, da regulacije spodbujajo takšen razvoj.

Pri izračunu rekuperacije energije Formule E mnogi podatki, kakor kotalni upor ter pospeševanja in zaviranja, niso bili javno dostopni, zato to lahko vodi v nepravilno pridobljene izračune. V obeh primerih tudi nisem upoštevali drugih faktorjev, kakor je v primeru Formule 1 t. i. »pit stop«, ko med dirko pride do menjave gum, ter »attack mode« v primeru Formule E, ki vozačem omogoči pridobitev dodatne moči z zapustitvijo dirkalne črte - optimalne poti po progi. Tudi avtomobila sta drugačna saj medtem ko si ekipe formule E delijo isto šasijo, baterijo in pnevmatike (Porsche, 2024), je v Formuli 1 v skladu z regulacijami več svobode za oblikovanje avtomobila.

V letu 2018/19 je vozilo Formule 1 imelo večjo moč motorja (708-746 kW) ter večjo možno hitrost (293 km/h), Formula E pa večjo možno obnovo energije (25 %), iz česar je razvidno da je glavna prioriteta F1 doseganje visokih hitrosti, medtem ko se FE bolj osredotoča na okoljevarstveni aspekt športa: rekuperacijo energije. Tudi zaradi popolnoma električnega pogona se celotna dirka pogosto osredotoča na to, kako optimizirati uporabo baterije skozi regeneracijo in na ohranjanje moči skozi vse kroge. Celotno dirko morajo upravljati porabo energije, ki je shranjena v baterijah in s poznavanjem tehnologije izkoriščati svoje regenerativne sisteme, da maksimalno obnovijo energijo.

V Formuli 1 obstaja jasna potreba po razvoju novih pravil za spodbujanje razvoja tehničnih lastnosti, ki bi lahko bile koristne za uporabo v osebnih avtomobilih, za izboljšano rekuperacijo energije, ker ne bi bila omejena na baterijski sklop ampak tudi na mehanske komponente. Na podlagi energetske analize kroga v Monaku je smiselno, da se omogoči svoboda pri razvoju motorja z notranjim zgorevanjem, kot tudi sistema za rekuperacijo kinetične energije, brez kakršnih koli omejitev ponovne rekuperacije energije vendar kot je razvidno iz regulacij. Smiselno je tudi, da bi se rekuperacija energije še dodatno razvijala, saj čeprav se lahko odstotek neobdelane učinkovitosti zdi nižji (32 % v primerjavi s 36 %) če vključimo regenerirano energijo, je pravi učinek prihranek goriva in boljša povprečna učinkovitost v

krogu. S tem se potrdila hipotezo, da bi večja uporaba regeneracije energije v Formuli 1 lahko znatno zmanjšala porabo goriva in povečala energetska učinkovitost dirkalnikov. S takšnim razvojem bi se lahko nasploh spodbudil okoljevarstveno-orientiran razvoj.

Pri opažanju praktičnih primerov je opazno, da se industrija bolj usklajuje z razvojem Formule E in regeneracijo kinetične energije ter postopno prehaja na električno zasnovano s polnimi hibridi (FHEV), priključnimi hibridi (PHEV), ter blagimi hibridi (MHEV), kar dodatno še spodbujajo okoljevarstveni ukrepi, npr. Evropskega parlamenta o emisijah avtomobilov. Obstajajo tudi že baterijska električna vozila (BEV), pri razvijanju katerih se podjetja kakor Jaguar zgledujejo po Formuli E. S tem sem potrdila hipotezo, da se v avtomobilski industriji bolj zgledujejo po Formuli E, saj se gre za električno zasnovano formulo, električni avtomobili pa so za mnoge prihodnost avtomobilske industrije.

Raziskovalno nalogo bi lahko izboljšala tako, da bi poskušala pridobiti podatke s strani Formule E, Formule 1 ali njune vrhovne organizacije FIA, lahko pa bi poskušala kontaktirati koga, ki je zaposlen v katerem izmed športov. Lahko bi poskusila pridobiti podatke z metodo videoanalize dirk, saj so včasih gledalcem prikazane hitrosti in njihova spreminjanja v ovinkih, orientirala pa bi se lahko glede na table, ki označujejo razdaljo od ovinka.

Za dodatno razumevanje sistemov bi lahko sodelovala s fakultetami ki imajo program »Formula Student« kakor je Mariborska Fakulteta z ekipo Grand Prix Engineering. S pomočjo novo pridobljenih informacij bi lahko uvedla nove spremenljivke, kakor je čas zaviranja in posledično približen čas delovanja rekuperacijskega sistema. Glede na razvoje Formule E ter Formule 1 bi bilo še bolj primerno primerjati najnovejše modele vozil v obeh serijah na progi v Monaku, saj trenutno obe dirkata na isti progi in ne več prilagojeni, kakor v letu 2019 (Formula E, 2024).

### 3 DRUŽBENA ODGOVORNOST

Raziskovalna naloga prispeva k trajnostnemu razvoju in družbeni odgovornosti z analizo sistemov regeneracije energije, ki omogočajo učinkovitejšo rabo virov ter zmanjšanje emisij. Takšne inovacije ne vplivajo le na industrijo in tehnologijo, ampak tudi na širšo družbo. Takšne inovacije ne vplivajo le na industrijo in tehnologijo, ampak tudi na širšo družbo, saj prispevajo k prehodu na bolj trajnostne in okolju prijazne tehnologije. S tem, ko podjetja in raziskovalne institucije razvijajo tehnologije za regeneracijo energije, morajo biti pozorna na okoljske, socialne in etične vplive, ki jih imajo njihovi izdelki in rešitve. Navsezadnje je cilj ustvariti bolj trajnostno in pravično družbo z boljšo izrabo virov in zmanjšanjem negativnih vplivov na okolje. V svetu motošporta se vedno več pozornosti posveča izboljšanju energetske učinkovitosti, zlasti v kontekstu hibridnih in električnih vozil, ki vključujejo sisteme za regeneracijo energije, kot so rekuperacija zavorne energije. Z uporabo teh sistemov se v primeru Formule 1 zmanjšuje poraba goriva, hkrati pa se povečuje skupna učinkovitost vozila, kar omogoča večjo izrabo virov in zmanjšanje škodljivih emisij. Prehod na električna vozila v motošportu je privedel do občutnega zmanjšanja ogljičnega odtisa dirkalnih dogodkov. Formula E je na primer od svojega začetka dosegla neto ničelne emisije ogljika, s čimer je nadomestila morebitne neizogibne emisije s certificiranimi projekti za zaščito podnebja (EV Powerwd, 2024). Prihodnost električnih vozil v motošportu obljublja vznemirljive inovacije. Polprevodniške baterije, brezžično polnjenje in napredna aerodinamika so le nekatere od tehnologij, ki se raziskujejo, da bi premaknile meje, ki jih lahko dosežejo električna vozila. Ti napredki ne bodo le izboljšali zmogljivosti dirkalnih avtomobilov, temveč bodo prišli tudi do potrošniških vozil, kar bo spodbudilo širšo uporabo električnih vozil (EV Povered, 2024).

## 4 ZAKLJUČEK IN SKLEPI

Formula 1 je zmožna rekuperacije 2, 02 MJ, vendar je omejena na rekuperacijo 2, 00 MJ. Formula E je glede na izračune zmožna rekuperacije 3510 MJ, vendar to znaša le 0, 18% energije, s katero se prične dirka (52 kWh).

Formula je kot tehnološko napreden šport odličen primer, kako raziskave in razvoj na področju regeneracije energije vplivajo na družbeno odgovornost. Prizadeva za zmanjšanje svojega ekološkega odtisa. Regenerativno zaviranje v dirkalnikih omogoča, da se del energije, ki bi bila sicer izgubljena, vrne nazaj v baterijo, kar povečuje energetske učinkovitost in zmanjša porabo energije. Raziskave na področju regeneracije energije v Formuli spodbujajo inovacije v avtomobilski industriji, ki kasneje vplivajo na komercialno dostopne električne avtomobile in izboljšujejo tehnologije za večjo energetske učinkovitost. Ob tem pa tudi povečuje ozaveščenost o pomenu električnih vozil in trajnostnih energetskih rešitev.

Z raziskavo sem ugotovila, da bi dirkalniki formule 1 lahko regenerirali več energije, v kolikor ne bi bili omejeni s tehničnimi predpisi.

Z rekuperacijo energije so dirkalniki učinkovitejši, kar je razvidno predvsem na primeru Formule E. Regeneracija je ključnega pomena za povečanje dosega in omogočanje dirkanja brez potrebe po dodatnem polnjenju med dirko.

Z nalogo sem potrdila vse svoje hipoteze:

- Regulacije Formule 1 vplivajo na razvoj rekuperiranja energije
- Večja uporaba regeneracije energije v Formuli 1 bi lahko zmanjšala porabo goriva in povečala energetske učinkovitost dirkalnikov.
- Regeneracija energije bo uspešnejša v primeru Formule E, saj regulacije spodbujajo razvoj takšne tehnologije
- V avtomobilski industriji se bolj zgledujejo po Formuli E, saj se gre za električno zasnovano formulo, električni avtomobili pa so za mnoge prihodnost avtomobilske industrije

Kljub temu nisem popolnoma dosegla njenega namena, saj podatki za natančne in objektivno pravilne rezultate, kakor kotalni upor v primeru Formule E, niso bili javno dostopni, njihov izračun pa ni bil možen. S tem moja primerjava sistemov rekuperacije v Formuli 1 in Formuli E ni popolna ter ni dosegla svojega namena, ki je bila objektivna, natančna primerjava sistemov.

Pri nadaljnjem raziskovanju bi se lahko vprašala kako uporaba rekuperacije energije in strategij regenerativnega zaviranja vpliva na odločanje ekip v realnem času med dirko v Formuli 1 in Formuli E, ter kako bi optimizacija teh strategij lahko pripomogla k večjim zmogljivostim in bolj trajnostnim dirkam. Lahko bi tudi raziskovala delovanje rekuperacijskih sistemov v drugih dirkaških kategorijah ter kako bi se rekuperacijski sistem v dirkaških kategorijah ter zunaj njih lahko izboljšal.

## 5 VIRI IN LITERATURA

- AIRSCHAPER.COM. (2018). DATE: ACCURACY: 2018-12-14 FORMULA E. Pridobljeno 22. januarja 2025, iz [https://airshaper.com/assets/reports/AirShaper\\_sample\\_report\\_-\\_Formula\\_E.pdf](https://airshaper.com/assets/reports/AirShaper_sample_report_-_Formula_E.pdf)
- Armenta-Déu, C., & Cortés, H. (2023). Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles. *Vehicles*, 5(2), 387–403. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>
- Audi Slovenija. (ni datuma). Priključni hibridni modeli združujejo prednosti električne mobilnosti in običajnih pogonskih tehnologij. Audi.si. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://www.audi.si/modeli/e-vozila/prikljucni-hibrid>
- Bopaiah, K., & Samuel, S. (2021). Analysis of Energy Recovery System of Formula One cars. Pridobljeno 25. januarja 2025, iz <https://radar.brookes.ac.uk/radar/file/b42a5cf8-d88a-47eb-9ea7-60c7019f3484/1/Energy%20recovery%20system%20for%20Formula%20One%20-%202021%20-%20Bopaiah%20Samuel.pdf>
- Boretti, A. (2019). Energy flow of a 2018 FIA F1 racing car and proposed changes to the powertrain rules. *Nonlinear Engineering*, 9(1), 28–34. Pridobljeno 25. januarja 2025, iz <https://doi.org/10.1515/nleng-2018-0171>
- Cocoon Vehicles Ltd. (2024, August 11). Cocoon Vehicles Ltd. Cocoon Vehicles Ltd. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://cocoonvehicles.co.uk/phev-bev-mhev-hev-differences/>
- Enel X. (n.d.). What is Formula E and how do Formula E cars work? Enel X. Pridobljeno 25. januarja 2025, iz <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/formula-e-how-does-it-work>
- EV Powered. (2024, August 18). The Electric Revolution: Exploring the Transition to Electric Vehicles in Motorsports. EV Powered. Pridobljeno 26. januarja 2025, iz <https://evpowered.co.uk/feature/the-electric-revolution-exploring-the-transition-to-electric-vehicles-in-motorsports/>
- Evropski parlament. (2022, 11. oktober). Prepoved prodaje novih bencinskih in dizelskih avtomobilov od leta 2035: kaj to pomeni? | Teme | Evropski parlament. Teme | Evropski Parlament. Pridobljeno 22. januarja 2025, iz <https://www.europarl.europa.eu/topics/sl/article/20221019STO44572/kaj-pomeni-prepoved-prodaje-novih-bencinskih-in-dizelskih-avtomobilov-od-2035>
- Fédération Internationale de l'Automobile . (2011, 14. junij). 2014 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS . Pridobljeno 26. januarja 2025, iz <https://www.fia.com/regulation/category/110>
- Fédération Internationale de l'Automobile . (2018). FIA Formula E Championship Technical Regulations Règlement Technique du Championnat de Formule E de la FIA. Pridobljeno 4. februarja 2025, iz [https://www.fia.com/sites/default/files/2018-2019\\_formula\\_e\\_techregs\\_yearbook2019.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2018-2019_formula_e_techregs_yearbook2019.pdf)
- Ford New Zealand. (ni datuma). FHEV. Ford New Zealand. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://www.ford.co.nz/electric/fhev/>
- Formula E. (2024, 24. april). What does the Monaco Formula E street circuit look like? The Official Home of Formula E; Formula E. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://www.fiaformulae.com/en/news/495886>

- Jaguar. (ni datuma). I-PACE Concept Electric Car - Creating Energy | Jaguar UAE. Jaguar-Uae.com. Pridobljeno 7. aprila 2025, iz <https://www.jaguar-uae.com/en/electrification/race-to-road/creating-energy?>
- Opel. (ni datuma). Pomen BEV, PHEV in E-REV | Preprosto električno | Opel Slovenija. Opel.si. Pridobljeno 7. aprila 2025, iz <https://www.opel.si/preprosto-elektricno/overview/subpages/get-started-bev-phev-e-rev.html>
- Porsche. (2024, 22. april). Nine amazing facts about Formula E electric racecars. Porsche.com. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://www.porsche.com/stories/innovation/facts-about-formula-e-racecars/>
- ROLLiN' Insurance. (ni datuma). The 4 Different Types of Hybrid Cars (Full Guide). ROLLiN' Insurance. Pridobljeno 8. februarja 2025, iz <https://rollininsurance.com.au/types-of-hybrid-cars>
- Rubber Journal Asia. (2022, 22. avgust). Michelin and Formula E part ways after eight years. Rubber Journal Asia -News on Rubber Machinery , Manufacturers , Rubber Chemical Producers and Rubber Processors. Pridobljeno 27. januarja 2025, iz <https://rubberjournalasia.com/michelin-and-formula-e-part-ways-after-eight-years/>
- Scarborough, C. (2020, 30. julij). In-depth: the Formula E powertrain explained. CAR Magazine. Pridobljeno 22. januarja 2025, iz <https://www.carmagazine.co.uk/electric/formula-e-powertrain/>
- Smith, S. (2023, 18. maj). Secrets and myths of Formula E's divisive "new chapter." The Race. Pridobljeno 20. januarja 2025, iz <https://www.the-race.com/formula-e/secrets-and-myths-of-formula-es-divisive-new-chapter/>

