

Određivanje kapaciteta baterije električnog tegljača s poluprikolicom

Vlašić, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:701771>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karla Vlašić

Zagreb, 2023.godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Karla Vlašić

Zagreb, 2023.godina.

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

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Goranu Šagiju, na stručnoj pomoći, uloženom vremenu i velikoj potpori tijekom izrade rada. Također se zahvaljujem kolegama, a najviše svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studija.

Karla Vlašić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karla Vlašić** JMBAG: **0035219558**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje kapaciteta baterije električnog tegljača s poluprikolicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determining battery capacity of electric tractor-trailer**

Opis zadatka:

Tegljač s poluprikolicom najčešći je oblik cestovnog prijevoza tereta na dugim relacijama. S ciljem postizanja CO₂ neutralnosti cestovnog prometa, posljednjih godina predstavljeno je nekoliko baterijskih električnih tegljača. Zbog ograničenog kapaciteta baterija, domet električnih tegljača je značajno manji od dometa konvencionalnih tegljača, pri čemu ugradnja baterija velikog kapaciteta nepovoljno utječe i na količinu korisnog tereta koji se prevozi. Zbog toga je potreban drugačiji pristup korištenju električnih tegljača s poluprikolicom. Ideja koja se spominje u literaturi je korištenje električnih tegljača s poluprikolicom po principu "brze poštanske kočije", pri čemu poluprikolica s teretom nesmetano putuje uz minimalne zastoje, a na čvorištima uz autocestu mijenjaju se električni tegljači i po potrebi vozači.

U okviru završnog rada potrebno je:

- analizirati propise o vremenima rada i odmora vozača i mogućnosti rada vozača u blizini kuće (vožnja samo na relaciji susjednih čvorišta),
- odrediti količinu korisnog tereta koji se prevozi ovisi o kapacitetu baterije i osovinskom opterećenju,
- odrediti domet tegljača s poluprikolicom za odgovarajući vozni ciklus na autocesti, za nekoliko scenarija (uzeti u obzir ovisnosti o kapacitetu baterije, masi tereta, profilu trase kojom se vozi),
- analizirati utjecaj tehnologije baterije (cijena, gustoća energije i broj punjenja),
- analizirati energetske učinkovitost (utrošena energija i emisija CO₂) po kilometru i masi tereta,
- analizirati brzinu transporta (ovisno o broju izmjena tegljača, vremenu rada i odmora vozača, dopunjavanju baterije),
- analizirati utjecaj vremena (kratko dopunjavanje ili potpuno punjenje preko noći) i snage punjenja baterije.

Na temelju provedenih analiza i izračuna odrediti kapacitet baterije prihvatljiv za primjenu električnog tegljača s poluprikolicom po principu "brze poštanske kočije".

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VREMENA RADA/ODMORA VOZAČA.....	3
2.1. Propisi o vremenima rada – Uredba 561/2006.....	3
2.2. Primjeri raspodjele prekida vožnje	5
2.2.1. Primjeri za udaljenosti čvorišta 1,5 sat ~ 120 km.....	6
2.2.2. Primjer za udaljenosti čvorišta 2:15 h ~ 180 km	7
2.2.3. Primjeri za razne udaljenosti čvorova.....	8
3. KOLIČINA KORISNOG TERETA.....	10
3.1. Ovisnost korisnog tereta i dometa.....	10
3.2. Određivanje osovinskog opterećenja	11
3.2.1. Osovinsko opterećenje BEV tegljača.....	11
3.2.2. Osovinsko opterećenje poluprikolice.....	13
3.3. Proračun otpora vožnje	17
3.3.1. Otpori kotrljanja.....	17
3.3.2. Otpor zraka.....	17
3.3.3. Otpori uspona.....	18
3.3.4. Otpori ubrzanja	18
3.4. European Transient Cycle - ETC	19
3.5. VECTO ciklus.....	30
3.6. Millbrook ciklus.....	35
3.7. Usporedba FIGE, VECTO i Millbrook ciklusa	40
4. UTJECAJ TEHNOLOGIJA BATERIJA	45
4.1. NMC baterije.....	45
4.2. NCA baterije	46
4.3. LFP baterije.....	46
5. ENERGETSKA UČINKOVITOST	49
5.1. Emisije CO ₂	49
5.1.1. Diesel tegljači.....	49
5.1.2. BEV tegljači.....	50
6. UTJECAJ VREMENA I SNAGE PUNJENJA BATERIJE.....	53
6.1. Punjenje tijekom pauze od 45 minuta	53
6.2. Noćno punjenje u skladištu/garaži/odmorištu.....	54
6.3. Životni vijek baterije s obzirom na broj ciklusa punjenja/praznjenja.....	55
7. BRZINA TRANSPORTA	57
8. ZAKLJUČAK.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prototip eActros LongHaul [2].....	2
Slika 2.	Prekid vožnje [3]	3
Slika 3.	Primjer raspodjele prekida vožnje [3]	3
Slika 4.	Primjeri dnevnog odmora [3]	4
Slika 5.	Primjer tjednog odmora [3]	4
Slika 6.	Primjer skraćenog tjednog odmora [3].....	5
Slika 7.	Primjer prekida vožnje 45 minuta	5
Slika 8.	Primjeri raspodjele prekida vožnje za udaljenosti između čvorova ~ 120 km.....	7
Slika 9.	Primjer za udaljenosti čvorova 2:15 h ~ 180 km.....	8
Slika 10.	Primjeri nejednakih udaljenosti čvorišta	9
Slika 11.	Maksimalna nosivost tegljača s poluprikolicom u ovisnosti o dometu [4]	10
Slika 12.	Dimenzije BEV tegljača konfiguracije 4x2 [5]	11
Slika 13.	Dimenzije poluprikolice [5]	13
Slika 14.	ETC (FIGE) ciklus [8].....	19
Slika 15.	Parametri FIGE ciklusa [8].....	20
Slika 16.	ETC (FIGE) ciklus – 3. dio [8].....	20
Slika 17.	Parametri 3. dijela FIGE ciklusa – vožnja autocestom [8].....	21
Slika 18.	Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu prilagođenog FIGE ciklusa	22
Slika 19.	Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u FIGE ciklusu za puno opterećenje.....	22
Slika 20.	Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u FIGE ciklusu za puno opterećenje.....	23
Slika 21.	Prikaz kumulativa potrošnje energije u FIGE ciklusu.....	23
Slika 22.	Prikaz ovisnosti kumulativa potrošnje energije o vremenu usporedno za sve vrste opterećenja.....	27
Slika 23.	Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu za različite vrste opterećenja u FIGE ciklusu	28
Slika 24.	Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu za pojedine vrste opterećenja u FIGE ciklusu	29
Slika 25.	Prikaz VECTO ciklusa za dugotrajni ciklus [9]	30
Slika 26.	Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu u VECTO ciklusu.....	31
Slika 27.	Prikaz ovisnosti nadmorske visine i nagiba o vremenu u VECTO ciklusu.....	31
Slika 28.	Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u VECTO ciklusu.....	32
Slika 29.	Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u VECTO ciklusu ..	32
Slika 30.	Prikaz kumulativa potrošnje energije u VECTO ciklusu	33
Slika 31.	Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu u VECTO ciklusu	34
Slika 32.	Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu u VECTO ciklusu ...	35
Slika 33.	Millbrook ciklus [8].....	35
Slika 34.	Parametri Millbrook ciklusa [8]	36
Slika 35.	Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu za Millbrook ciklus	36
Slika 36.	Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za Millbrook ciklus ..	37
Slika 37.	Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za Millbrook ciklus	37
Slika 38.	Prikaz kumulativa potrošnje energije za Millbrook ciklus.....	38
Slika 39.	Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu u Millbrook ciklusu ...	39
Slika 40.	Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu u Millbrook ciklusu	40
Slika 41.	Usporedba sila otpora u pojedinim ciklusima	40
Slika 42.	Usporedba snaga otpora u pojedinim ciklusima.....	41
Slika 43.	Usporedba potrošnje energije po kilometru u pojedinom ciklusu.....	41

Slika 44.	Usporedba udjela kumulativa regeneracijskog kočenja u ukupnoj potrošnji energije za pojedini ciklus	42
Slika 45.	Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o dometu za pojedini ciklus	42
Slika 46.	Prikaz ovisnosti potrošnje energije po kilometru i toni o kapacitetu baterije za pojedine cikluse	43
Slika 47.	Prikaz ovisnosti mase prevezenog tereta o dometu za pojedine cikluse	43
Slika 48.	Prikaz ovisnosti potrošnje energije po kilometru o kapacitetu baterije za pojedine cikluse.....	44
Slika 49.	Prikaz ovisnosti mase prevezenog tereta o kapacitetu baterije	44
Slika 50.	Usporedba različitih tehnologija baterija za puno opterećenje u FIGE ciklusu	46
Slika 51.	Usporedba različitih tehnologija baterija u VECTO ciklusu.....	47
Slika 52.	Usporedba različitih tehnologija baterija u Millbrook ciklusu.....	47
Slika 53.	Usporedba masa baterija za različite tehnologije i različite cikluse.....	48
Slika 54.	Usporedba emisija CO ₂ po kWh energije za Diesel i BEV tegljač	51
Slika 55.	Usporedba emisija CO ₂ po odvoženom kilometru za Diesel i BEV tegljač.....	51
Slika 56.	Usporedba emisija CO ₂ po danu za Diesel i BEV tegljač	52
Slika 57.	Usporedba emisija CO ₂ po godini za Diesel i BEV tegljač na godišnjoj razini	52
Slika 58.	Prototip Siemensova "Megawatt charging" punjača [11]	53
Slika 59.	Sekvence vožnji i punjenja u tjednu za jednog vozača	54
Slika 60.	Sekvence vožnji i punjenja u tjednu za dva vozača	55
Slika 61.	Primjeri glavnih čvorišta u Europi [12].....	57
Slika 62.	Trenutačni kapaciteti baterija u ovisnosti o dometu za scenarij bez i sa brzim punjačem	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Modeli BEV tegljača i njihove karakteristike	2
Tablica 2. Rezultati proračuna za osovinska opterećenja eActros 300 - $G_{\text{tereta}} = 27,15 \text{ t}$	15
Tablica 3. Rezultati proračuna za osovinska opterećenja eActros 300 - $G_{\text{tereta}} = 22,5 \text{ t}$	16
Tablica 4. Rezultati potrošnje energije za puno opterećenje bez uspona.....	24
Tablica 5. Rezultati za pojedini vozni ciklus za puno opterećenje bez uspona.....	25
Tablica 6. Rezultati potrošnje energije za pola opterećenja bez uspona	25
Tablica 7. Rezultati za pojedini vozni ciklus za pola opterećenja bez uspona.....	26
Tablica 8. Rezultati potrošnje energije bez opterećenja i bez uspona.....	26
Tablica 9. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus bez opterećenja i bez uspona u FIGE ciklusu.....	27
Tablica 10. Rezultati VECTO ciklusa.....	33
Tablica 11. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus u VECTO ciklusu	34
Tablica 12. Rezultati prilagođenog Millbrook ciklusa.....	38
Tablica 13. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus u Millbrook ciklusu	39
Tablica 14. Prikaz dostupnih kemija Li-ion katoda za BEV tegljače s poluprikolicom [4].....	45
Tablica 15. Životni vijek baterije s obzirom na vrstu tehnologije.....	56
Tablica 16. Vremena punjenja 80 % kapaciteta za pojedine snage punjača	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	čeaona površina vozila
a	m/s^2	akceleracija
c_w	-	faktor otpora zraka
E_{CO_2}	kg_{CO_2} / kg_G	emisija CO_2 po kilogramu dizelskog goriva
e_{CO_2}	g_{CO_2} / km	emisija CO_2 po kilometru
F_A	kg	dio opterećenja sedla/tereta koje je opterećuje prednju osovinu pogonskog vozila
F_a	N	sila otpora ubrzanja
F_B	kg	dio opterećenja sedla/tereta koje opterećuje stražnju osovinu pogonskog vozila
F_k	N	sila otpora kotrljanja
F_u	N	sila otpora uspona
F_z	N	sila otpora zraka
f_k	-	koeficijent otpora kotrljanja
G_{pp}	kg	masa prazne poluprikolice
G_s	kg	opterećenje na sedlu
G_t	kg	masa praznog pogonskog vozila
G_{tereta}	kg	maksimalna masa korisnog tereta
$G_{ukupna, dop}$	kg	ukupna dopuštena masa BEV tegljača s poluprikolicom i teretom
g	m/s^2	gravitacijska akceleracija
l	mm	međuosovinski razmak
l_s	mm	razmak prednje osovine i sedla
$l_{t,pp}$	mm	razmak vučnog svornjaka i težišta poluprikolice
l_1	mm	razmak prednje osovine i težišta praznog pogonskog vozila
l_3	mm	razmak vučnog svornjaka i prve osovine poluprikolice
l_4	mm	međuosovinski razmak osovina poluprikolice
m_{G100}	$kg/100 km$	masa dizelskog goriva po 100 km
m_v	kg	ukupna masa vozila
P_A	kg	ukupno osovinsko opterećenje prednje osovine pogonskog vozila
P_a	kW	snaga potrebna za svladavanje otpora ubrzanja
$P_{A,dop}$	kg	dopušteno osovinsko opterećenje prednje osovine pogonskog vozila
P_B	kg	ukupno osovinsko opterećenje stražnje osovine pogonskog vozila
$P_{B,dop}$	kg	dopušteno osovinsko opterećenje stražnje osovine pogonskog vozila

P_C	kg	ukupno osovinsko opterećenje osovina poluprikolice
$P_{C,dop}$	kg	dopušteno osovinsko opterećenje osovina poluprikolice
P_k	kW	snaga potrebna za svladavanje otpora kotrljanja
P_u	kW	snaga potrebna za svladavanje otpora uspona
P_z	kW	snaga potrebna za svladavanje otpora zraka
T_A	kg	opterećenje prednje osovine praznog pogonskog vozila
T_B	kg	opterećenje stražnje osovine praznog pogonskog vozila
T_C	kg	opterećenje osovina prazne poluprikolice
V_{G100}	L/100 km	potrošnja dizelskog goriva
v	m/s	brzina vožnje
v_0	m/s	brzina protuvjetra
α	°	kut uspona
ρ_G	kg/L	gustoća dizelskog goriva
ρ_z	kg/m ³	gustoća zraka

SAŽETAK

U ovom radu analizirano je nekoliko ciklusa vožnje i potrošnja energije kroz te cikluse kako bi se odredio optimalni kapacitet baterije BEV tegljača s poluprikolicom. Razmatrala se situacija korištenja tegljača s poluprikolicom po principu "poštanske kočije" gdje se tegljači i vozači izmjenjuju, a poluprikolice uz što manje zaustavljanja putuju između čvorišta. U sklopu analize određeno je osovinsko opterećenje kojim se odredila maksimalna masa tereta koju vozilo može prevesti i masa baterije, a da su dopuštena osovinska opterećenja zadovoljena. S povećanjem mase baterije pada masa prevezenog tereta, ali raste domet i obratno. Razrađeni su razni ciklusi vožnje s obzirom na vremena rada i odmora vozača s raznim udaljenostima čvorišta, emisija CO₂ i brzina transporta kako bi se usporedile prednosti i mane BEV tegljača s poluprikolicom u odnosu na tegljač s Diesellovim motorom.

Ključne riječi: BEV tegljač s poluprikolicom, baterija, vozni ciklusi, kapacitet, emisija CO₂, potrošnja

SUMMARY

In this paper, several driving cycles and energy consumption through these cycles were analyzed in order to determine the optimal battery capacity of a BEV tractor-trailer. The situation of using a tractor-trailer according to the 'stagecoach' principle was considered, where tractors and drivers alternate, and semi-trailers travel between nodes with as few stops as possible. As part of the analysis, the axle load was determined, which defined the maximum load mass that the vehicle can transport and the mass of the battery, and that the permitted axle loads are met. As the weight of the battery increases, the weight of the transported load decreases, but the range increases and vice versa. Different driving cycles with regard to driver work and rest time with various hub distances, emission and transport speed were considered to compare the advantages and disadvantages of a BEV tractor with a semi-trailer compared to a diesel engine tractor.

Keywords: BEV tractor-trailer, battery, driving cycles, capacity, CO₂ emission, consumption

1. UVOD

Tegljač s poluprikolicom jedan je od glavnih oblika prijevoza tereta velikih masa na dugim relacijama na regionalnoj, nacionalnoj i međunarodnoj razini. Zbog klimatskih promjena koje su velikim dijelom uzrokovane transportnim sektorom, Europska Unija je donijela odluku o smanjenju emisija stakleničkih plinova Pariškim sporazumom. Kako bi se postigli ciljevi određeni u sporazumu, cestovna vozila se nastoje dekarbonizirati odnosno zamijeniti vozilima s nultom emisijom. Postoje dvije vrste tehnologija koje se koriste pri dekarbonizaciji, a to su baterijska električna vozila (BEV) i električna vozila pogonjena vodikovim gorivim ćelijama. U ovom radu će se razmatrati samo BEV vozila. Posljednjih nekoliko godina se posvećuje pažnja izradi električnog tegljača s poluprikolicom, te se nastoji postići učinkovitost kao i kod konvencionalnih tegljača s motorom s unutarnjim izgaranjem. To je teško postići s obzirom na ograničeni kapacitet baterije i njegove mase koji su usko povezani s količinom korisnog tereta koju taj tegljač može prevesti.

S obzirom na probleme dometa i maksimalne nosivosti korisnog tereta razmatra se o korištenju tegljača s poluprikolicom po principu "brze poštanske kočije". Ideja je da poluprikolica s teretom putuje uz minimalne zastoje, pri čemu se mijenjaju tegljači i vozači. Na primjer, tegljač s napunjenom poluprikolicom krene od skladišta te vozi nekih 100-200 km do čvora gdje će zamijeniti poluprikolice s drugim tegljačem. Prvi tegljač će preuzeti poluprikolicu drugog tegljača i odvesti ju na odredišnu lokaciju u smjeru iz kojeg je došao, a drugi će odvesti poluprikolicu prvog tegljača na odredišnu lokaciju nazad u svom smjeru kako bi izvršio isporuku. Prilikom mijenjanja poluprikolica na čvoru, punjenja/pražnjenja tereta u skladištu ili pauza vozača moguće je punjenje baterije tegljača.

Pri odabiru baterija postoje razne kombinacije kemijskih sastava od kojih svaki ima određene prednosti i nedostatke faktora koji se razmatraju npr. gustoća energije, masa i kapacitet baterije, broj punjenja/pražnjenja koji može podnijeti, sigurnost, te nabavna cijena baterija i ćelija. Većina proizvođača teških teretnih vozila koristi Li-ion baterije s različitim izvedbama ćelija (NMC, NCA, LFP) koje imaju veću gustoću energije što izravno utječe na maksimalnu nosivost i volumen koji vozilo može prevesti.

Trenutačno na EU tržištu postoji nekoliko proizvođača električnih tegljača. Neki od poznatijih modela BEV tegljača su prikazani u tablici 1. s odgovarajućim dometima, kapacitetima baterije i trajanjima punjenja koja ovise o snazi punjača [1].

Tablica 1. Modeli BEV tegljača i njihove karakteristike

MODEL	DOMET	KAPACITET BATERIJE	TRAJANJE PUNJENJA
Volvo FM	380 km	540 kWh	2 sata i 30 min
Mercedes eActros 300	300 km	336 kWh	1 sat i 15 min
Mercedes eActros 400	400 km	448 kWh	1 sat i 15 min
Mercedes eActros LongHaul (2024.)	500 km	600 kWh	30-45 minuta
MAN eTGM	190 km	185 kWh	1 sat

Proizvođači nastoje što brže izbacivati nove modele s povećanim dometom kako bi se povećao interes tržišta, a samim time i njihova primjena. Na slici 1. prikazan je Mercedesov eActros LongHaul čiji se početak serijske proizvodnje očekuje 2024. godine.

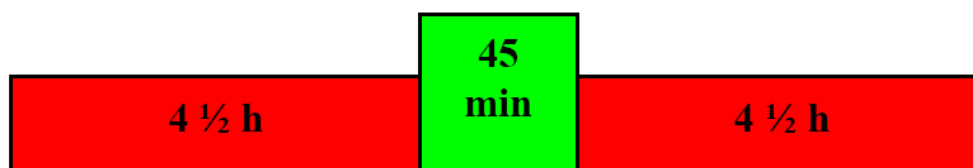


Slika 1. Prototip eActros LongHaul [2]

2. VREMENA RADA/ODMORA VOZAČA

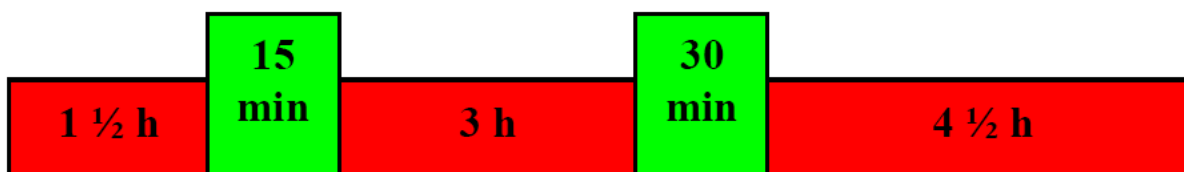
2.1. Propisi o vremenima rada – Uredba 561/2006

Europska Unija, programom IPA 2008 Uredba 561/2006 [3], za Hrvatsku je odredila određene propise o vremenu vožnje i odmora mobilnih radnika. Maksimalno vrijeme vožnje je 4 sata i 30 minuta nakon čega je potrebno napraviti prekid vožnje u trajanju od 45 minuta kao što je prikazano na slici 2. Tijekom prekida vožnje ne smiju se obavljati nikakvi ostali poslovi. Dnevno vrijeme vožnje je maksimalno 9 sati, a dva puta tjedno moguće je i po 10 sati vožnje.



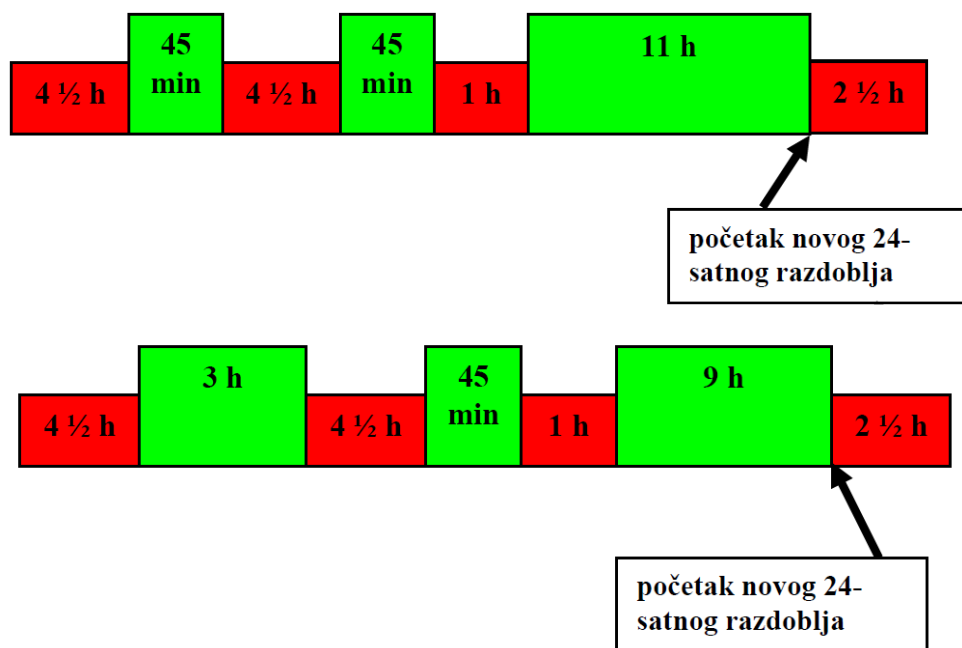
Slika 2. Prekid vožnje [3]

Raspodjela prekida vožnje zahtjeva prvi prekid vožnje od najmanje 15 minuta, a nakon toga drugi od najmanje 30 minuta kako bi se i dalje poštivao zahtjev za pauzom od 45 minuta nakon 4,5 sata vožnje što je prikazano na slici 3.



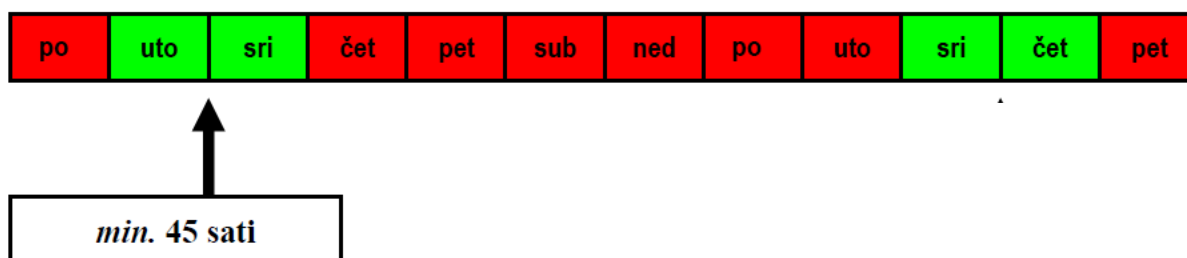
Slika 3. Primjer raspodjele prekida vožnje [3]

Na slici 4. prikazani su primjeri dnevnog odmora. Gore na slici je prikazan redovni dnevni odmor u trajanju od 11 sati, a dolje je prikazan skraćeni dnevni odmor koji traje 9 sati. Prvi dio dnevnog odmora mora biti od najmanje 3 sata, a drugi dio od najmanje 9 sati što znači da dnevni odmor od 2 dijela traje 12 sati. Moguća su tri skraćena dnevna odmora između bilo koja dva tjedna odmora.



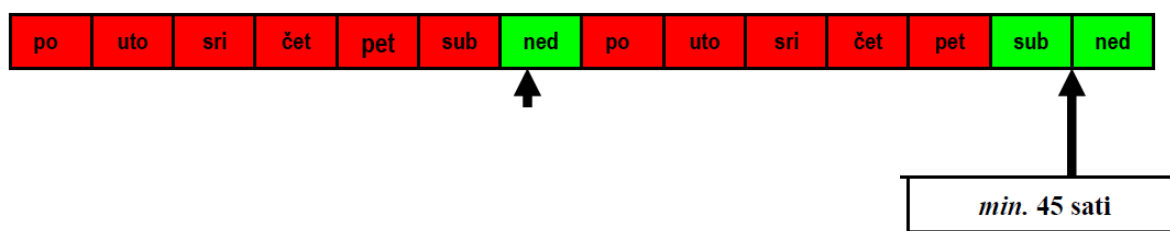
Slika 4. Primjeri dnevnog odmora [3]

Tjedni odmor započinje najkasnije nakon šest 24-satnih razdoblja od kraja prethodnog tjednog odmora kao što je prikazano na slici 5. Minimalno trajanje tjednog odmora je 45 sati.



Slika 5. Primjer tjednog odmora [3]

Skraćeni tjedni odmor može trajati manje od 45 sati, ali više od 24 sata, ali se to vrijeme mora nadoknaditi do kraja trećeg tjedna od tjedna korištenja skraćenog tjednog odmora. U prethodnom i u slijedećem tjednu vozač mora koristiti minimalno jedan redoviti tjedni odmor što je prikazano na slici 6.

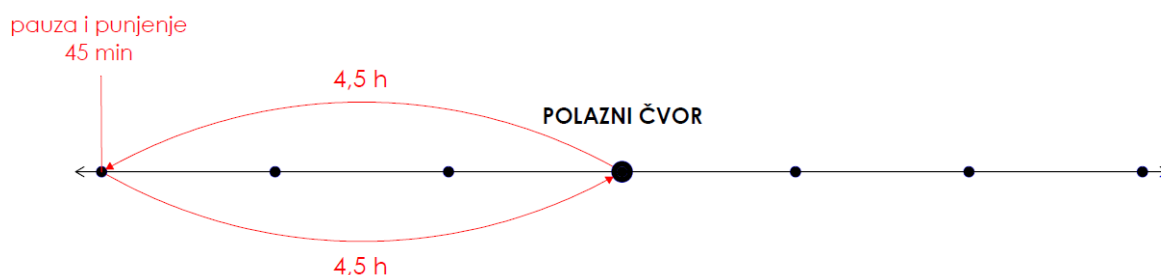


Slika 6. Primjer skraćenog tjednog odmora [3]

Ako se efektivno vozi 9-10 h uz prosječnu brzinu od 80 km/h moguće je prevaliti put 720-800 km, što zahtjeva kapacitet baterije 1350–1500 kWh za potpuno opterećenje i nemogućnost punjenja. Potrebno je uzeti u obzir da se baterija ne isprazni u potpunosti jer je moguće naići na komplikacije prilikom vožnje kao što je gužva zbog čega bi kapacitet baterije za jednak domet trebao biti oko 15 % veći od prethodno rečenog te bi iznosio 1530–1700 kWh. Uz mogućnosti dopunjavanja moguće je značajno smanjiti kapacitet baterije.

2.2. Primjeri raspodjele prekida vožnje

Kako bi se pojednostavio i skratio put vozaču do posla, ali i povećala isplativost prijevozničkoj tvrtki, polazni čvor se nalazi u blizini vozačevog mjesta stanovanja. Razmatra se slučaj u kojem vozač kreće iz jednog čvora i završava rutu vožnje u istom čvoru, ali je moguća i opcija u kojoj vozač ne završi u početnom čvoru nego se s drugim vozačem, kao putnik, vrati u početni čvor. Postoji mnogo kombinacija udaljenosti čvorova i raspodjele prekida vožnje pa su ovdje prikazane samo neke od njih uz pretpostavku da je prosječna brzina vožnje BEV tegljača s poluprikolicom 80 km/h. Na slici 7. prikazan je primjer prekida vožnje gdje vozač vozi 4,5 sati u jednom smjeru, zatim ima pauzu od 45 minuta tijekom koje puni bateriju tegljača. Nakon toga se vraća u početni čvor.



Slika 7. Primjer prekida vožnje 45 minuta

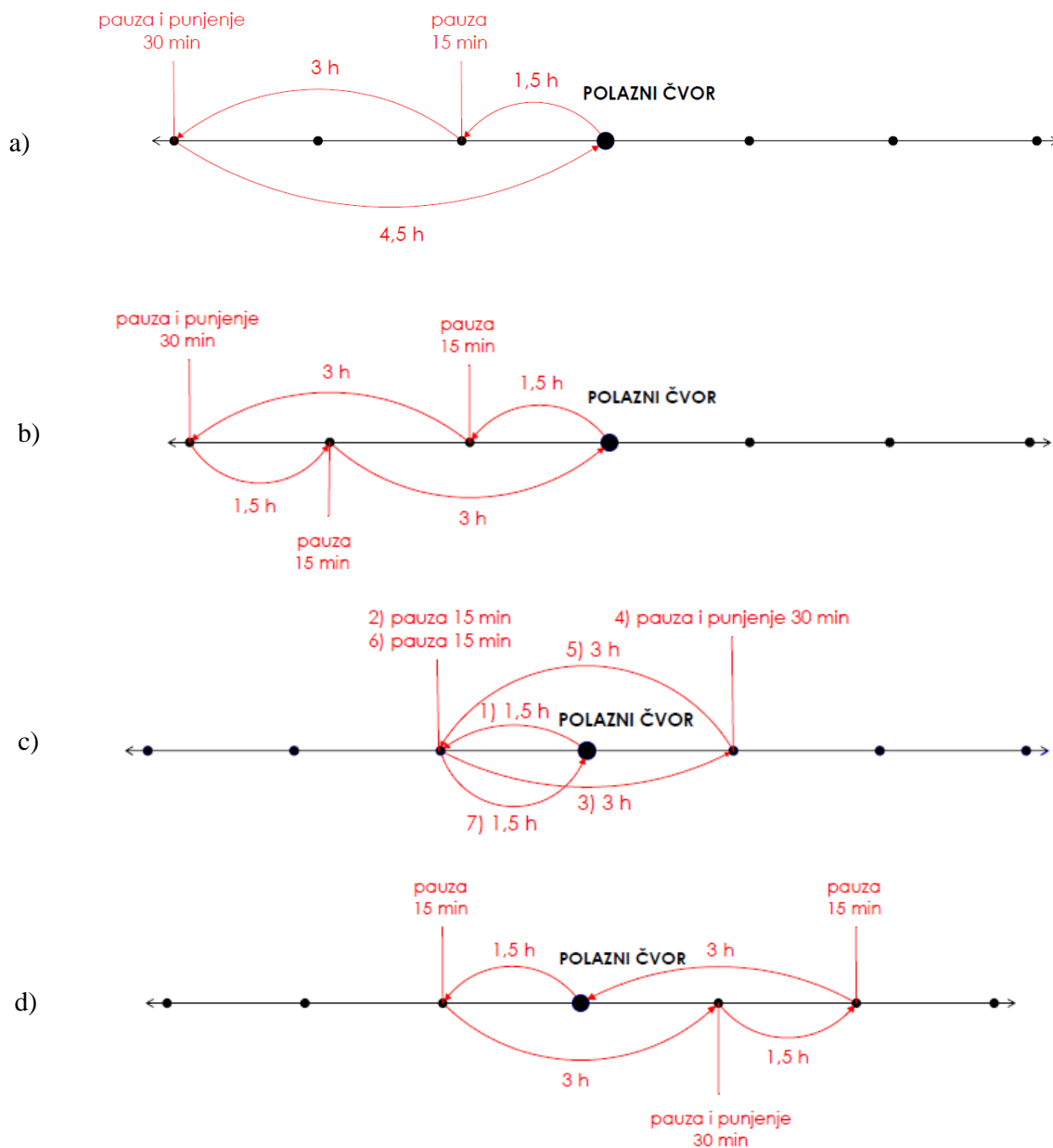
2.2.1. Primjeri za udaljenosti čvorišta 1,5 sat ~ 120 km

Na slici 8.a) vozač vozi u jednom smjeru 1,5 sat do prvog čvora. Radi pauzu od 15 minuta, a zatim u istom smjeru nastavlja vožnju još 3 sata do idućeg čvora. Tamo radi još jednu pauzu i puni bateriju 30 minuta vozi nazad prema početnom čvoru.

Na slici 8.b) vozač u jednom smjeru radi identično kao i u primjeru a), ali nazad vozi 1,5 sat do prvog čvora gdje radi pauzu nakon koje vozi još 3 sata prema početnom čvoru.

Na slici 8.c) vozač u jednom smjeru vozi 1,5 sat, radi pauzu od 15 minuta, zatim se vraća u smjeru početnog čvora, ali vozi 3 sata. Radi pauzu od 30 minuta, te vozi opet 3 sata prema prethodnom čvoru na kojem je bio. Tamo radi pauzu od 15 minuta nakon čega se vraća u početni čvor od kojeg je udaljen 1,5 sat vožnje.

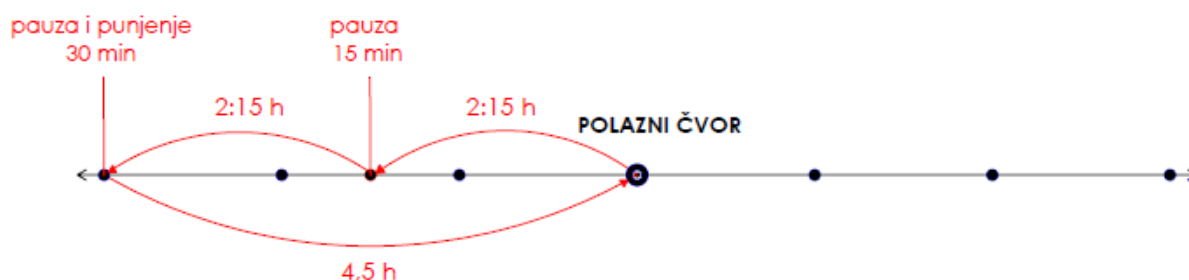
Na slici 8.d) vozač vozi u jednom smjeru 1,5 sat i radi pauzu od 15 minuta. Nakon toga vozi nazad u smjeru početnog čvora 3 sata, te radi pauzu od 30 min. Nastavlja u istom smjeru još 1,5 h i ima stanku od 15 min. Zatim ide nazad do početnog čvora do kojeg mu ima 3 sata vožnje.



Slika 8. Primjeri raspodjele prekida vožnje za udaljenosti između čvorova ~ 120 km

2.2.2. Primjer za udaljenosti čvorišta 2:15 h ~ 180 km

Na slici 9. prikazana je opcija za udaljenost između čvorova ~ 180 km gdje vozač vozi u jednom smjeru 2:15 h, te radi pauzu od 15 min. Nakon toga nastavlja u istom smjeru još 2:15 h gdje radi pauzu od 30 min te se vraća prema polaznom čvoru do kojeg ima 4,5 sata vožnje.



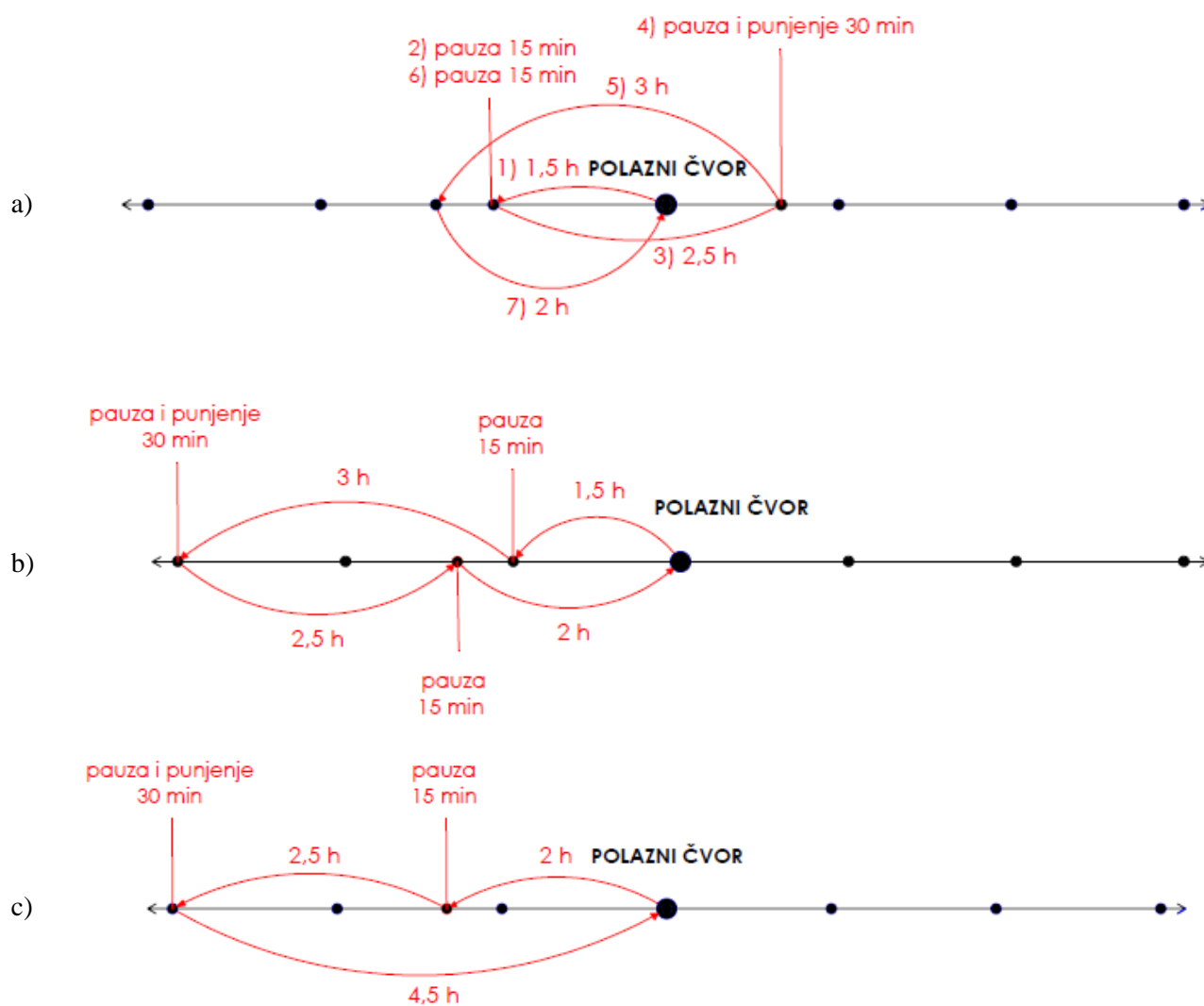
Slika 9. Primjer za udaljenosti čvorova 2:15 h ~ 180 km

2.2.3. Primjeri za razne udaljenosti čvorova

Udaljenosti čvorova nisu nužno uvijek jednake zbog čega su ovdje razrađene i takve situacije. Na slici 10.a) prikazan je slučaj gdje vozač vozi u jednom smjeru 1,5 sat, radi pauzu od 15 min te se vraća nazad vozeći 2,5 sata. Tu radi pauzu od 30 minuta pa se opet vraća nazad vozeći 3 sata. Opet ima pauzu od 15 min nakon koje se vraća nazad u početni čvor do kojeg ima 2 sata vožnje.

Na slici 10.b) prikazana je situacija u kojoj vozač vozi u jednom smjeru 1,5 sat, radi pauzu od 15 min, te nastavlja u istom smjeru još 3 sata. Na čvoru radi pauzu od 30 min, te se vraća nazad u polazni čvor u dva navrata. Prvo vozi 2,5 sata, radi pauzu od 15 min, a zatim nastavlja vožnju još 2 sata.

Na slici 10.c) vozač vozi 2 sata u jednom smjeru, radi pauzu od 15 min i nastavlja još 2,5 sata u istom smjeru gdje staje 30 minuta. Nakon toga se vraća u početni čvor do kojeg ima 4,5 sata vožnje.



Slika 10. Primjeri nejednakih udaljenosti čvorišta

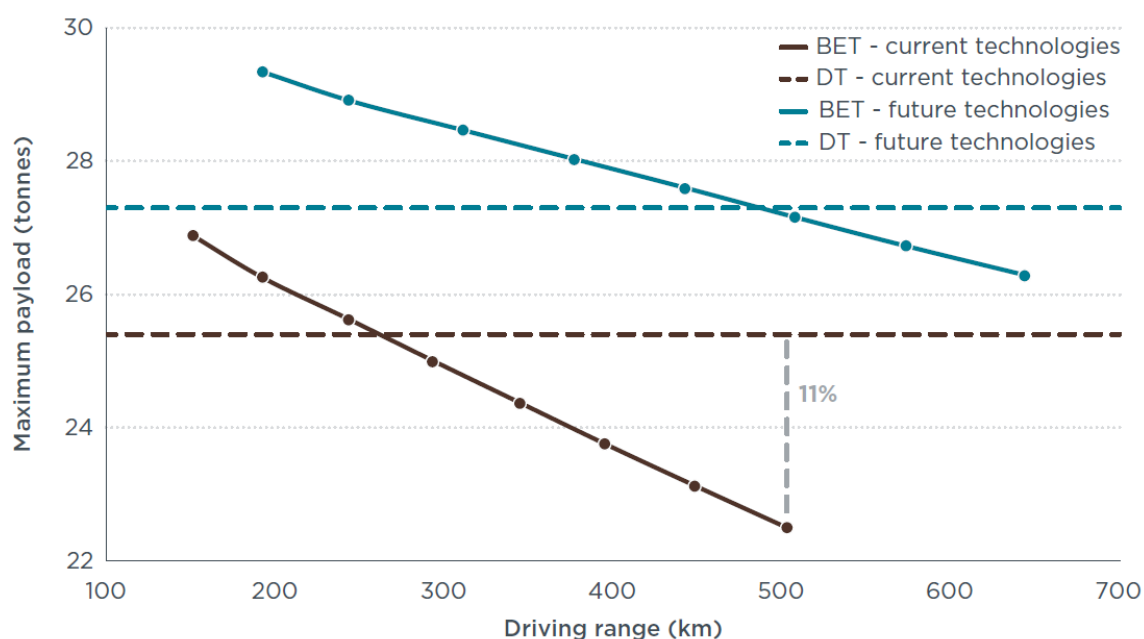
Primjeri prikazani na slikama 7.-10. pokazuju da je moguće mnogo varijacija u rasporedu vremena vožnje i odmora vozača. Također su moguće i varijacije u udaljenostima između čvorišta. Pauze u trajanju 30-45 min, uz pretpostavku brzih punjača, moguće je iskoristiti za dopunjavanje, pa čak i značajno punjenje baterije što pridonosi smanjenju potrebnog kapaciteta baterije.

3. KOLIČINA KORISNOG TERETA

U ovom poglavlju će biti prikazana ovisnost nosivosti korisnog tereta i dometa, te proračunski postupak za određivanje osovinskog opterećenja na temelju čega je određena količina korisnog tereta koji BEV tegljač može prevoziti.

3.1. Ovisnost korisnog tereta i dometa

Na slici 11. se može vidjeti graf koji prikazuje ovisnost maksimalne nosivosti o dometu usporedno za BEV tegljače i tegljače s Dieselovim motorom trenutačne i buduće tehnologije. Najveća korisna nosivost tereta električnog tegljača s poluprikolicom određuje se s najvećom dopuštenom masom vozila od 42 t što je dopušteno u svrhu promoviranja teških teretnih vozila s nultom emisijom štetnih plinova. Maksimalna nosivost tereta se proporcionalno smanjuje s povećanjem dometa zbog povećanja mase baterije. Zbog toga se u budućnosti oslanja na smanjenje mase šasije i povećanje gustoće energije baterije.



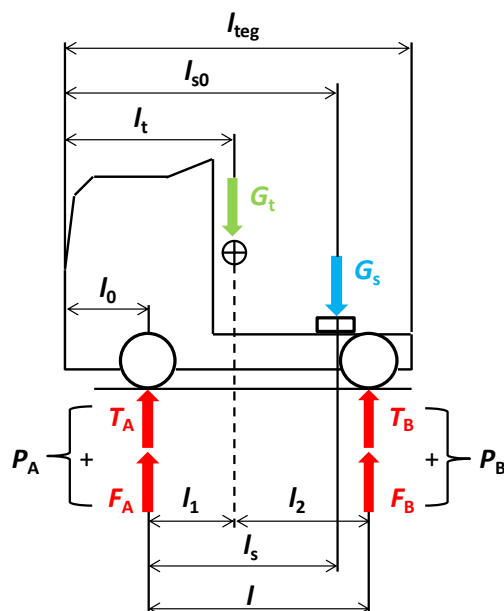
Slika 11. Maksimalna nosivost tegljača s poluprikolicom u ovisnosti o dometu [4]

3.2. Određivanje osovinskog opterećenja

Jednadžbe koje su korištene u narednom poglavlju služe za izračun osovinskog opterećenja BEV tegljača s konfiguracijom osovina 4x2 što je ujedno i najčešća kombinacija tegljača s poluprikolicom na Europskom tržištu. Ukoliko bi se koristile druge konfiguracije potrebno je prenamijeniti jednadžbe.

3.2.1. Osovinsko opterećenje BEV tegljača

Na slici 12. prikazane su dimenzije koje su potrebne za proračun. Za izračun treba znati ili osovinska opterećenja ili masu praznog BEV tegljača i položaj njegova težišta.



Slika 12. Dimenzije BEV tegljača konfiguracije 4x2 [5]

Iz sume momenata prema slici 6. će se dobiti opterećenje stražnje osovine praznog pogonskog vozila:

$$\sum M_A = 0 \rightarrow T_B \cdot l - G_t \cdot l_1 = 0 \quad (3.1)$$

T_B – opterećenje stražnje osovine praznog pogonskog vozila [kg]

l – međuosovinski razmak [mm]

G_t – masa praznog pogonskog vozila [kg]

l_1 – razmak prednje osovine i težišta praznog pogonskog vozila [mm]

$$T_B = \frac{G_t \cdot l_1}{l} . \quad (3.2)$$

Prema slici 12. se također postavi suma sila iz koje se dobije opterećenje prednje osovine praznog pogonskog vozila:

$$\sum F = 0 \rightarrow T_A + T_B - G_t = 0 \quad (3.3)$$

T_A – opterećenje prednje osovine praznog pogonskog vozila [kg]

$$T_A = G_t - T_B . \quad (3.4)$$

Iz sume momenata će se dobiti dio opterećenja sedla koje opterećuje stražnju osovinu pogonskog vozila, te ukupno osovinsko opterećenje stražnje osovine pogonskog vozila:

$$\sum M_A = 0 \rightarrow F_B \cdot l - G_s \cdot l_s = 0 \quad (3.5)$$

gdje je:

F_B – dio opterećenja sedla/tereta koje opterećuje stražnju osovinu pogonskog vozila [kg]

G_s – opterećenje na sedlu [kg]

l_s – razmak prednje osovine i sedla [mm]

$$F_B = \frac{G_s \cdot l_s}{l} \quad (3.6)$$

$$P_B = T_B + F_B \quad (3.7)$$

P_B – ukupno osovinsko opterećenje stražnje osovine pogonskog vozila [kg].

Na kraju se dobije dio opterećenja sedla koje opterećuje prednju osovinu pogonskog vozila i ukupno osovinsko opterećenje prednje osovine pogonskog vozila:

$$F_A = G_s - F_B \quad (3.8)$$

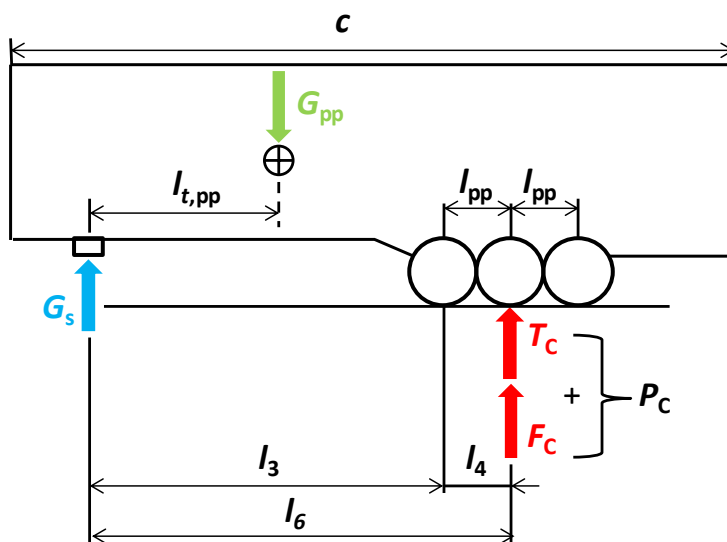
F_A – dio opterećenja sedla/tereta koje opterećuje prednju osovinu pogonskog vozila [kg]

$$P_A = T_A - F_A \quad (3.9)$$

P_A – ukupno osovinsko opterećenje prednje osovine pogonskog vozila [kg].

3.2.2. Osovinsko opterećenje poluprikolice

Proračun se izvodi za poluprikolicu s 3 osovine koja je prikazana na slici 13. I kod ovog izračuna su potrebna poznata osovinska opterećenja ili masa prazne poluprikolice i položaj njezinog težišta.



Slika 13. Dimenzije poluprikolice [5]

Ukoliko je poznato osovinsko opterećenje:

$$T_C = P_C \quad (3.10)$$

gdje je:

T_C – opterećenje osovine prazne poluprikolice [kg]

P_C – ukupno osovinsko opterećenje osovine poluprikolice [kg].

Ili za slučaj kada je poznata masa prazne poluprikolice i položaj težišta gdje se računa pomoću sume momenata oko vučnog sedla:

$$\sum M_s = 0 \rightarrow T_C \cdot (l_3 + l_4) - G_{pp} \cdot l_{t,pp} = 0 \quad (3.11)$$

gdje je:

G_{pp} – masa prazne poluprikolice [kg]

$l_{t,pp}$ – razmak vučnog svornjaka i težišta poluprikolice [mm]

l_3 – razmak vučnog svornjaka i prve osovine poluprikolice [mm]

l_4 – međuosovinski razmak osovine poluprikolice [mm]

$$T_C = \frac{G_{pp} \cdot l_{t,pp}}{l_3 + l_4} \rightarrow T_C = P_C \quad (3.12)$$

Kao što je rečeno u poglavlju 3.1. ukupna dopuštena masa BEV tegljača s poluprikolicom je 42 t. Masa praznog tegljača bez baterije je oko 6,5 t, a sa baterijom od 336 kWh je oko 7,85 t što je više od mase tegljača s Diesellovim motorom s gorivom koja iznosi oko 7,5 t. Prazna poluprikolica ima masu oko 7 t.

Maksimalna masa korisnog tereta dobiva se preko sljedeće jednadžbe:

$$G_{\text{tereta}} = G_{\text{ukupna, dop}} - (G_t + G_{pp}) \quad (3.13)$$

gdje je:

G_{tereta} – maksimalna masa korisnog tereta [kg]

$G_{\text{ukupna, dop}}$ – ukupna dopuštena masa BEV tegljača s poluprikolicom i teretom [kg].

Uvrštavanjem spomenutih masa dobije se sljedeće:

$$G_{\text{tereta}} = 42 - (7,85 + 7) = 27,15 \text{ t} \quad (3.14)$$

Dopušteno osovinsko opterećenje vozila na vodoravnog podlozi prema Direktivi 96/53/EZ [6] za slobodnu osovinu iznosi 10 t, a za pogonsku 11,5 t. Za trostruke osovine poluprikolica gdje je razmak između susjednih osovina < 1,3 m dopušteno osovinsko opterećenje iznosi 21 t. Ukupna masa poluprikolice s maksimalnom nosivosti korisnog tereta iznosi 34,15 t. S obzirom na dopušteno osovinsko opterećenje poluprikolice od 21 t, što je manje od stvarnog osovinskog opterećenja, stražnja osovina tegljača mora preuzeti dio opterećenja. Kako bi provjerili zadovoljava li stvarno osovinsko opterećenje, odnosno je iznosi li manje od dopuštenog osovinskog opterećenja potrebno je uvrstiti dimenzije i podatke u proračune u poglavljima 3.2.1. i 3.2.2. U tablici 2. su prikazani rezultati proračuna za osovinska opterećenja modela eActros 300.

Tablica 2. Rezultati proračuna za osovinska opterećenja eActros 300 - $G_{\text{tereta}} = 27,15 \text{ t}$

T_B	2374,6 kg
F_B	7769,1 kg
P_B	10143,8 kg
T_A	5475,4 kg
F_A	2255,6 kg
P_A	7730,9 kg
G_s	10024,7 kg
T_C	5827,8 kg
F_C	18197,5 kg
P_C	24025,3 kg

Kako bi se zadovoljili uvjeti osovinskih opterećenja moguće je da maksimalna masa korisnog tereta dobivena prema izrazu 3.14 neće biti moguća. S obzirom na dobivene rezultate moguće je to i provjeriti.

Usporedba rezultata i dopuštenih vrijednosti:

$$P_A \approx 7,74 \text{ t} < P_{A,\text{dop}} = 10 \text{ t} \rightarrow \text{Zadovoljava!} \quad (3.15)$$

$$P_B \approx 10,14 \text{ t} < P_{B,\text{dop}} = 11,5 \text{ t} \rightarrow \text{Zadovoljava!} \quad (3.16)$$

$$P_C \approx 24,03 \text{ t} > P_{C,\text{dop}} = 21 \text{ t} \rightarrow \text{NE zadovoljava!} \quad (3.17)$$

Na temelju izraza 3.15 i 3.16. vidi se da osovinska opterećenja prednje i stražnje osovine tegljača zadovoljavaju, odnosno niže su od dopuštenih vrijednosti, a iz izraza 3.17. je vidljivo da osovinsko opterećenje prikolice nije zadovoljeno te ono iznosi više od dopuštene 21 t.

Kako bi se dobili odgovarajuća stvarna osovinska opterećenja koja su manja od dopuštenih, potrebno je smanjiti maksimalnu masu korisnog tereta. U tablici 3. su dobiveni rezultati za maksimalnu masu korisnog tereta od 22,5 t.

Tablica 3. Rezultati proračuna za osovinska opterećenja eActros 300 – $G_{\text{tereta}} = 22,5 \text{ t}$

T_B	2374,6 kg
F_B	6580,8 kg
P_B	8955,4 kg
T_A	5475,4 kg
F_A	1910,6 kg
P_A	7385,9 kg
G_s	8491,4 kg
T_C	5827,8 kg
F_C	15080,8 kg
P_C	20908,6 kg
G_s	8491,4 kg

Usporedba novih rezultata i dopuštenih vrijednosti:

$$P_A \approx 7,39 \text{ t} < P_{A,\text{dop}} = 10 \text{ t} \rightarrow \text{Zadovoljava!} \quad (3.18)$$

$$P_B \approx 8,96 \text{ t} < P_{B,\text{dop}} = 11,5 \text{ t} \rightarrow \text{Zadovoljava!} \quad (3.19)$$

$$P_C \approx 20,9 \text{ t} < P_{C,\text{dop}} = 21 \text{ t} \rightarrow \text{Zadovoljava!} \quad (3.20)$$

Iz izraza 3.18, 3.19. i 3.20 vidljivo je da sva osovinska opterećenja za maksimalnu masu korisnog tereta od 22,5 t zadovoljavaju odnosno da su niža od dopuštenih vrijednosti, ali ukoliko bi se zahtijevalo povećanje maksimalne mase korisnog tereta onda ona bi zadovoljavala. Za kapacitet baterije 672 kWh također je dobivena maksimalna masa korisnog tereta od 22,5 t s obzirom da povećanjem mase baterije nema utjecaja na osovinsko opterećenje poluprikolice, a zbog velikih sigurnosti kod osovinskih opterećenja tegljača ono će i dalje biti manje od dopuštenih vrijednosti. Maksimalna masa baterije do koje se može ići, a da se i dalje ne promijeni maksimalna masa korisnog tereta je 4,8 t iz čega se dobije da za NMC tehnologiju baterije ona može imati maksimalni kapacitet od 1200 kWh.

3.3. Proračun otpora vožnje

Otpori vožnje izračunat će se za nekoliko ciklusa vožnje: FIGE, VECTO i Millbrook. Ni u jednom ciklusu nisu uzeti utjecaji protuvjetera, FIGE ciklus se vozi na horizontalnoj cesti s raznim opterećenjima. Za puno opterećenje ukupna masa vozila iznosi 42 t, za poluopterećenje iznosi oko 28,5 t, a za slučaj bez opterećenja ona iznosi oko 14,8 t odnosno jednaka je masi praznog vozila. VECTO i Millbrook su analizirani samo za puno opterećenje gdje je za VECTO uračunat utjecaj uspona, a Millbrook se analizira na horizontalnoj cesti. Proračun se provodi u programu Microsoft Excel.

3.3.1. Otpori kotrljanja

Otpori kotrljanja računaju se prema sljedećem izrazu:

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (3.21)$$

gdje je:

F_k – sila otpora kotrljanja [N]

$f_k = 0,006$ – koeficijent otpora kotrljanja

m_v – ukupna masa vozila [kg]

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – gravitacijska akceleracija

α – kut uspona [°]

Snaga potrebna za svladavanje otpora kotrljanja iznosi:

$$P_k = F_k \cdot v \quad (3.22)$$

P_k – snaga otpora kotrljanja [kW]

v – brzina vožnje [m/s]

3.3.2. Otpor zraka

Otpor zraka računa se prema izrazu:

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v + v_0)^2}{2} \cdot c_w \cdot A \quad (3.23)$$

gdje je:

F_z – sila otpora zraka [N]

$\rho_z = 1,204 \text{ kg/m}^3$ – gustoća zraka

$v_0 = 0 \text{ km/h}$ – brzina protuvjetra

$c_w = 0,53$ – faktor otpora zraka

$A = 10 \text{ m}^2$ – čeona površina vozila

Snaga potrebna za svladavanje otpora zraka iznosi:

$$P_z = F_z \cdot v \quad (3.24)$$

3.3.3. Otpori uspona

Otpor uspona izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.25)$$

Snaga potrebna za svladavanje otpora uspona iznosi:

$$P_u = F_u \cdot v \quad (3.26)$$

3.3.4. Otpori ubrzanja

Otpori ubrzanja računaju se prema izrazu:

$$F_a = m_v \cdot a \quad (3.27)$$

gdje je:

a – akceleracija [m/s^2]

Snaga potrebna za svladavanje otpora ubrzanja iznosi:

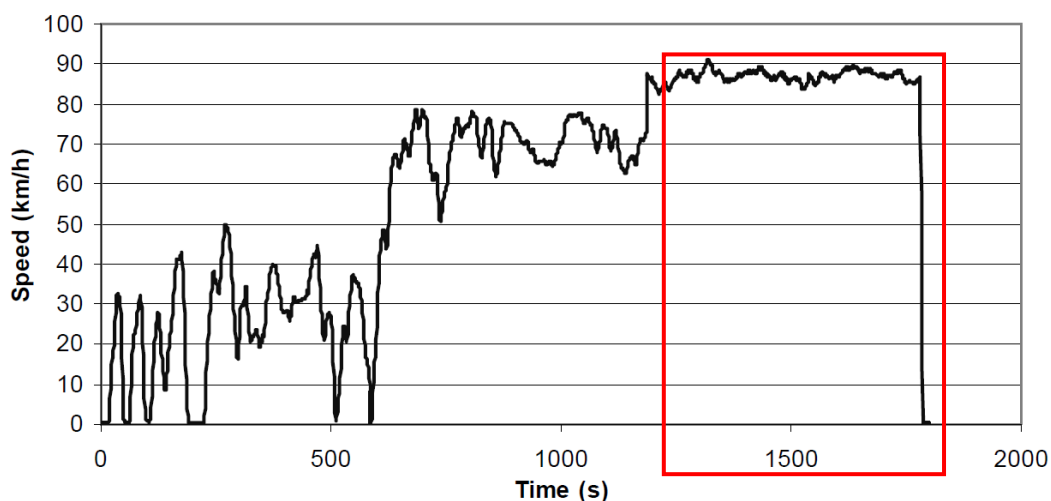
$$P_a = F_a \cdot v \quad (3.28)$$

3.4. European Transient Cycle - ETC

ETC odnosno FIGE ciklus [7] [8] je testni ciklus na temelju mjerenja stvarnih ciklusa vožnje teških teretnih vozila, a uveden je zbog certifikacije njihovih emisija. Sastoji se od tri različita dijela koji odgovaraju različitim uvjetima vožnje:

1. gradska vožnja – maksimalna brzina 50 km/h; česta zaustavljanja i kretanja,
2. ruralna vožnja – počinje strmim ubrzanjem; prosječna brzina 72 km/h,
3. vožnja autocestom – prosječna brzina 88 km/h.

Kao što je vidljivo na slici 14. cijeli ciklus traje 1800 sekundi, a trajanje svakog dijela posebno je 600 sekundi. S obzirom da se u ovom radu proučavaju duge relacije na regionalnoj, nacionalnoj i međunarodnoj razini bitan je 3. dio, odnosno vožnja autocestom. On će se koristiti u ovome radu kako bi se odredio potrebni kapacitet baterije BEV tegljača.



Slika 14. ETC (FIGE) ciklus [8]

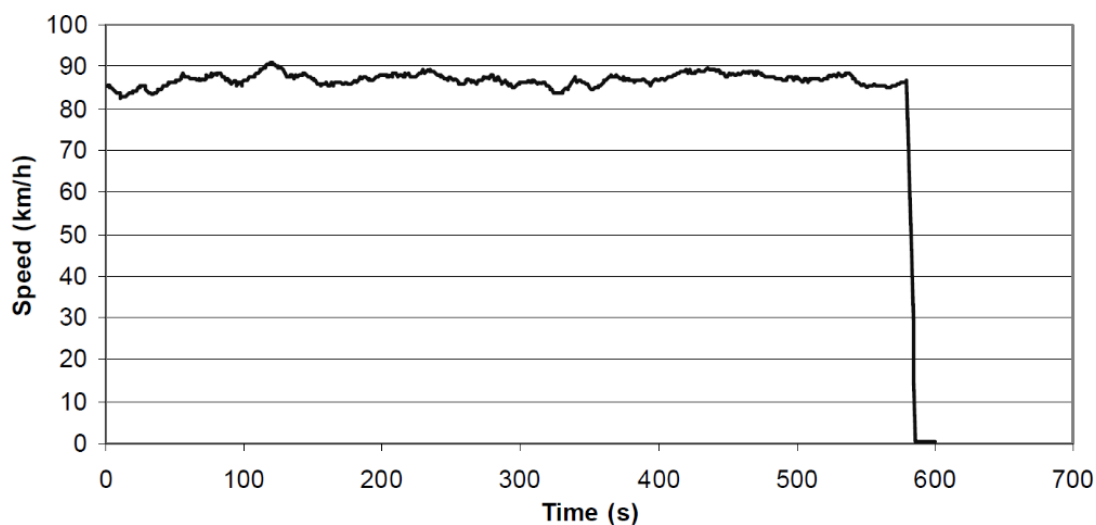
Na slici 15. prikazani su parametri cijelog FIGE ciklusa.

ART.KINEMA parameters

Total distance	29493.59 m	Average negative acceleration	-0.176 m/s ²
Total time	1800 s	Standard deviation of accel.	0.327 m/s ²
Driving time	1800 s	Standard dev. of positive accel.	0.189 m/s ²
Drive time	859 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.129 m/s ²
Drive time spent accelerating	522 s	Number of accelerations	65
Drive time spent decelerating	419 s	Accelerations per km	2.204 /km
Time spent braking	155 s	Number of stops	0
Standing time	0 s	Stops per km	0 /km
% of time driving	100.00 %	Average stop duration	N/A s
% of cruising	47.72 %	Average distance between stops	N/A m
% of time accelerating	29.00 %	Relative positive acceleration	0.0565 m/s ²
% of time decelerating	23.28 %	Positive kinetic energy	1.477 m/s ²
% of time braking	8.61 %	Relative positive speed	0.515
% of time standing	0.00 %	Relative real speed	0.951
Average speed (trip)	59.0 km/h	Relative square speed	20.262 m/s
Average driving speed	58.99 km/h	Relative positive square speed	10.278 m/s
Standard deviation of speed	28.7 km/h	Relative real square speed	19.613 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	54.33 km/h	Relative cubic speed	438.55 m ² /s ²
Maximum speed	90.8 km/h	Relative positive cubic speed	220.77 m ² /s ²
Average acceleration	0.000 m/s ²	Relative real cubic speed	428.06 m ² /s ²
Average positive acceleration	0.158 m/s ²	Root mean square of acceleration	0.081 m/s ²

Slika 15. Parametri FIGE ciklusa [8]

Na slici 16. posebno je izvučen profil brzina vožnje 3. dijela ciklusa na autocesti u ovisnosti o vremenu.



Slika 16. ETC (FIGE) ciklus – 3. dio [8]

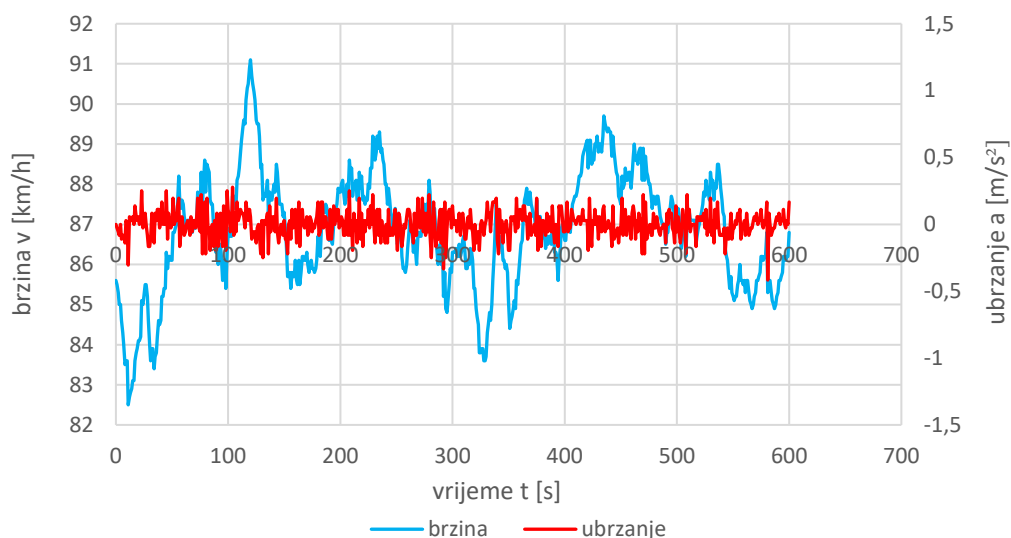
Na slici 17. prikazani su parametri 3. dijela FIGE ciklusa.

ART.KINEMA parameters

Total distance	14062.72 m	Average negative acceleration	-0.115 m/s ²
Total time	600 s	Standard deviation of accel.	0.362 m/s ²
Driving time	600 s	Standard dev. of positive accel.	0.027 m/s ²
Drive time	473 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.061 m/s ²
Drive time spent accelerating	59 s	Number of accelerations	131
Drive time spent decelerating	68 s	Accelerations per km	9.315 /km
Time spent braking	9 s	Number of stops	0
Standing time	0 s	Stops per km	0 /km
% of time driving	100.00 %	Average stop duration	N/A s
% of cruising	78.83 %	Average distance between stops	N/A m
% of time accelerating	9.83 %	Relative positive acceleration	0.0179 m/s ²
% of time decelerating	11.33 %	Positive kinetic energy	0.473 m/s ²
% of time braking	1.50 %	Relative positive speed	0.498
% of time standing	0.00 %	Relative real speed	0.992
Average speed (trip)	84.4 km/h	Relative square speed	24.098 m/s
Average driving speed	84.38 km/h	Relative positive square speed	12.027 m/s
Standard deviation of speed	14.18 km/h	Relative real square speed	23.958 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	1.84 km/h	Relative cubic speed	581.50 m ² /s ²
Maximum speed	90.8 km/h	Relative positive cubic speed	290.57 m ² /s ²
Average acceleration	-0.039 m/s ²	Relative real cubic speed	578.67 m ² /s ²
Average positive acceleration	0.036 m/s ²	Root mean square of acceleration	0.075 m/s ²

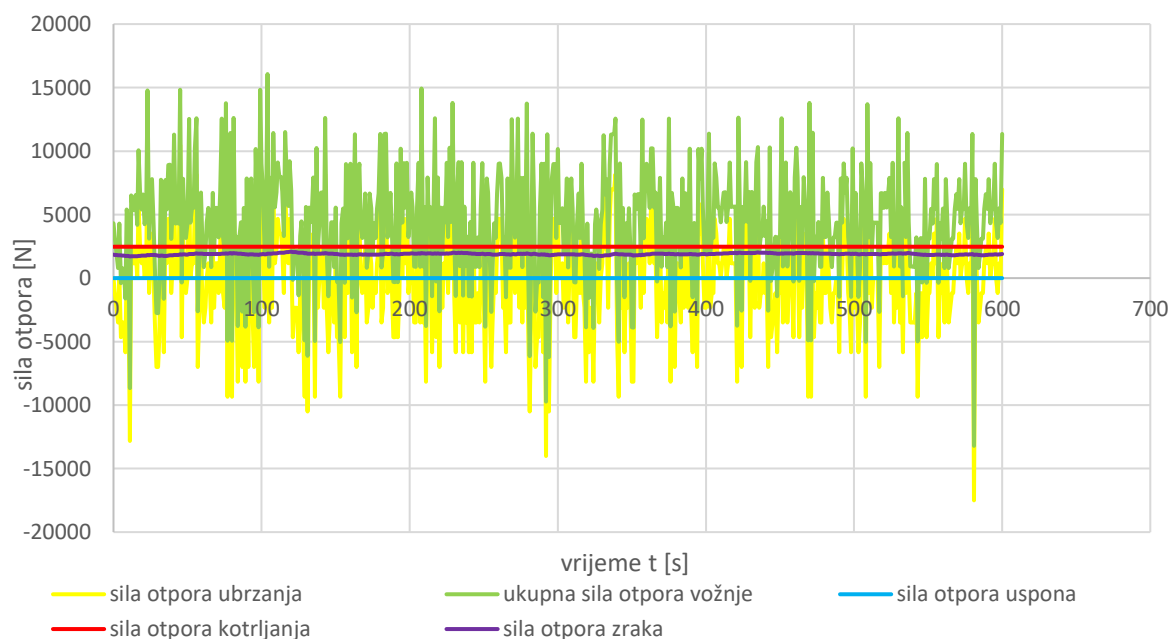
Slika 17. Parametri 3. dijela FIGE ciklusa – vožnja autocestom [8]

S obzirom da tijekom vožnje na autocesti, ukoliko nema nikakvih smetnji kao što su na primjer gužva ili nekakva zaustavljanja, postoji jedno ubrzanje 0-80 km/h i jedno usporavanje 80-0 km/h te je ostatak vožnje kontinuiran pri brzinama od oko 80 km/h. FIGE ciklus za 3. dio započinje odmah pri brzini od oko 80 km/h te se na kraju potpuno zaustavlja. Radi pojednostavljenja promatrati će se samo dio s kontinuiranom brzinom, bez usporenja na kraju. Na slici 18. usporedno su prikazane linije ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu. Slike 18. vrijedi za sve vrste opterećenja.



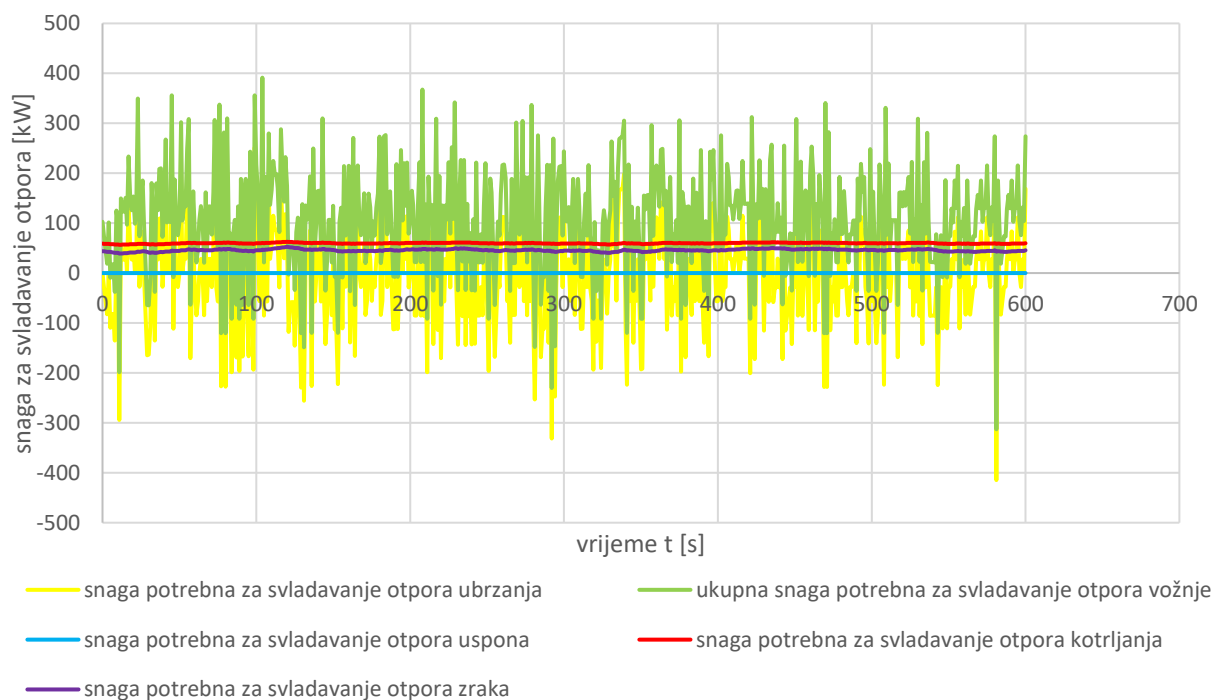
Slika 18. Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu prilagođenog FIGE ciklusa

Na slici 19. prikazane su pojedine sile otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za puno opterećenje. Sila otpora uspona u FIGE ciklusu iznosi nula jer nema uspona tijekom vožnje.



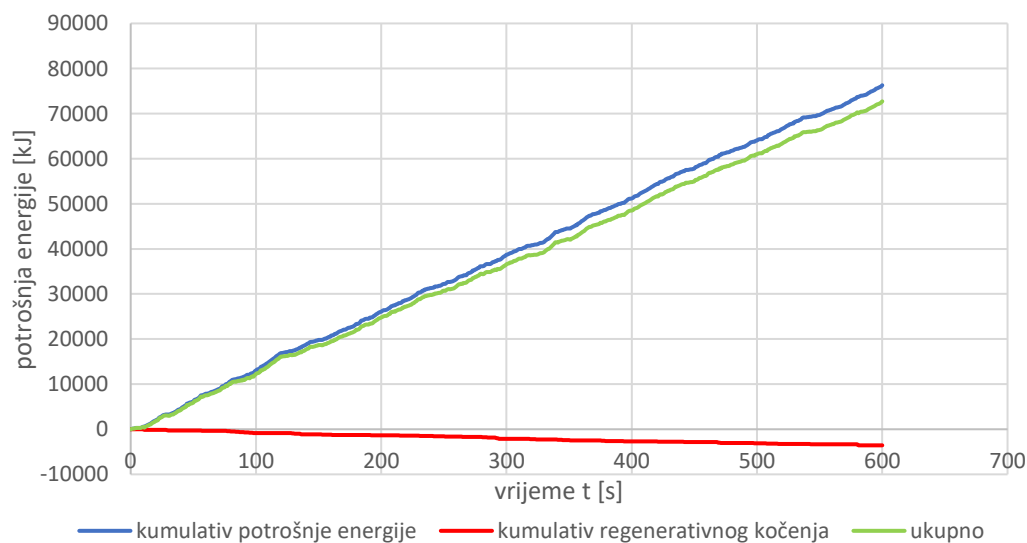
Slika 19. Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u FIGE ciklusu za puno opterećenje

Na slici 20. prikazane pojedine snage otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za puno opterećenje. Snaga potrebna za svladavanje otpora uspona u FIGE ciklusu iznosi nula jer nema uspona tijekom vožnje.



Slika 20. Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u FIGE ciklusu za puno opterećenje

Na slici 21. prikazana je potrošnja energije u FIGE ciklusu. Plava linija prikazuje kumulativ potrošnje energije prilikom vožnje, a crvena linija kumulativ regenerativnog kočenja odnosno energiju koja se regenerira prilikom kočenja te će ona umanjiti ukupnu potrošnju energije koja je prikazana zelenom linijom.



Slika 21. Prikaz kumulativa potrošnje energije u FIGE ciklusu

Potreban domet BEV tegljača s poluprikolicom moguće je dobiti sljedećim izrazom:

$$\text{potreban domet [km]} = \text{prosječna brzina [m/s]} \cdot \text{sati vožnje [h]} \quad (3.29)$$

Prema izrazu 3.29 ako je prosječna brzina 80 km/h za vozni ciklus od 9 h potreban domet je 720 km, za 4,5 h je oko 360 km, za 3 h oko 240 km, a za 1,5 h potrebno je 120 km. Za pojedini scenarij moguće je izračunati stvarni domet s obzirom na potrošnju energije i kapacitete baterija koje su trenutačno dostupne na tržištu za BEV tegljače. Zbog raznih zapreka na koje tegljač može naići prilikom vožnje nije moguće računati da će se sav kapacitet baterije iskoristiti nego je potrebno ostaviti rezervu te u daljnjem proračunu ona iznosi 30 %.

To je moguće dobiti prema sljedećem izrazu:

$$\text{domet [km]} = 0,7 \cdot \frac{\text{kapacitet baterije [kWh]}}{\text{potrošnja energije [kWh/km]}} \quad (3.30)$$

a) PUNO OPTEREĆENJE

U tablici 4. su prikazani rezultati potrošnje energije po jednom FIGE ciklusu koji traje 600 sekundi te potrošnja energije po kilometru.

Tablica 4. Rezultati potrošnje energije za puno opterećenje bez uspona

Potrošnja energije u jednom FIGE ciklusu	20,782 kWh
Potrošnja energije po kilometru	1,479 kWh/km

U tablici 5. su vidljivi rezultati potrošnje energije po kilometru i ukupne potrošnje energije po voznom ciklusu dobiveni za pojedini vozni ciklus.

Tablica 5. Rezultati za pojedini vozni ciklus za puno opterećenje bez uspona

Vozni ciklus	Potrošnja energije po kilometru	Ukupna potrošnja energije po voznom ciklusu
9 h	1,479 kWh/km	1125 kWh
4,5 h	1,479 kWh/km	562,5 kWh
3 h	1,479 kWh/km	375 kWh
1,5 h	1,479 kWh/km	187,5 kWh

Na temelju tablice 1. i tablice 5. može se zaključiti da baterija kapaciteta 1125 kWh koja je potrebna za vozni ciklus od 9 h nije u uporabi jer bi zbog toga naglo pala maksimalna masa korisnog tereta koju je moguće prevoziti što ne bi bilo isplativo. Domet takve baterije iznosio bi oko 532 km. Za vozne cikluse od 4,5 i 3 h potrebne su baterije kapaciteta od 562,5 i 375 kWh što je moguće jer su kapaciteti baterija tegljača s poluprikolicom oko tog iznosa. Domet s takvim baterijama iznosili bi oko 266 i 177 km. Također je moguć i vozni ciklus od 1,5 h s obzirom da su u čestoj upotrebi kapaciteti baterija preko 187,5 kWh, ali njihovi dometi iznose samo oko 88 km.

b) POLUOPTEREĆENJE

U tablici 6. su prikazani rezultati potrošnje energije po jednom FIGE ciklusu koji traje 600 sekundi te potrošnja energije po kilometru.

Tablica 6. Rezultati potrošnje energije za pola opterećenja bez uspona

Potrošnja energije u 1 FIGE ciklusu	16,952 kWh
Potrošnja energije po km	1,207 kWh/km

Tablica 7. Rezultati za pojedini vozni ciklus za pola opterećenja bez uspona

Vozni ciklus	Potrošnja energije po kilometru	Ukupna potrošnja po voznom ciklusu
9 h	1,207 kWh/km	920 kWh
4,5 h	1,207 kWh/km	460 kWh
3 h	1,207 kWh/km	305 kWh
1,5 h	1,207 kWh/km	152,5 kWh

Na temelju tablice 1. i tablice 7. može se zaključiti da baterija kapaciteta 920 kWh koja je potrebna za vozni ciklus od 9 h trenutno nije u uporabi jer bi zbog toga naglo pala maksimalna masa korisnog tereta koji je moguće prevoziti što ne bi bilo isplativo. Domet takve baterije iznosio bi oko 533 km. Za vozne cikluse od 4,5 i 3 h potrebne su baterije kapaciteta od 460 i 305 kWh što je moguće jer su kapaciteti baterija tegljača s poluprikolicom oko tog iznosa. Domet s takvim baterijama iznosili bi oko 266 i 177 km. Također je moguć vozni ciklus od 1,5 h s obzirom da su u čestoj upotrebi kapaciteti baterija preko 152,5 kWh, ali njihovi dometi iznose samo oko 88 km.

c) BEZ OPTEREĆENJA

U tablici 8. su prikazani rezultati potrošnje energije po jednom FIGE ciklusu koji traje 600 sekundi te potrošnja energije po kilometru.

Tablica 8. Rezultati potrošnje energije bez opterećenja i bez uspona

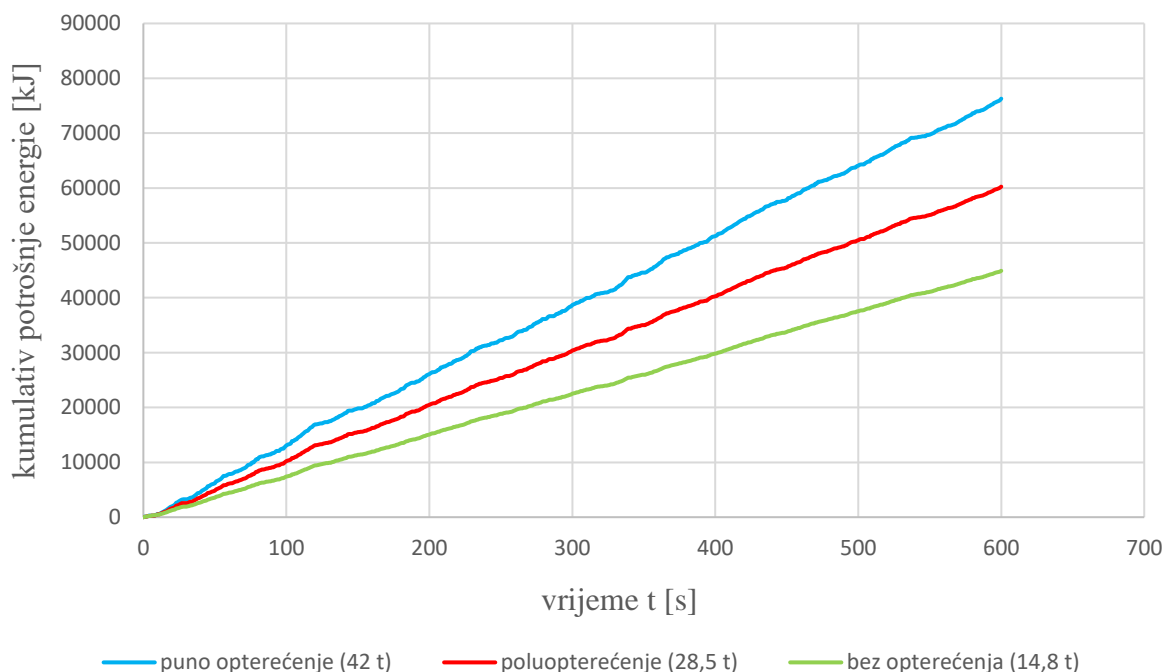
Potrošnja energije u 1 FIGE ciklusu	13,192 kWh
Potrošnja energije po km	0,940 kWh/km

Tablica 9. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus bez opterećenja i bez uspona u FIGE ciklusu

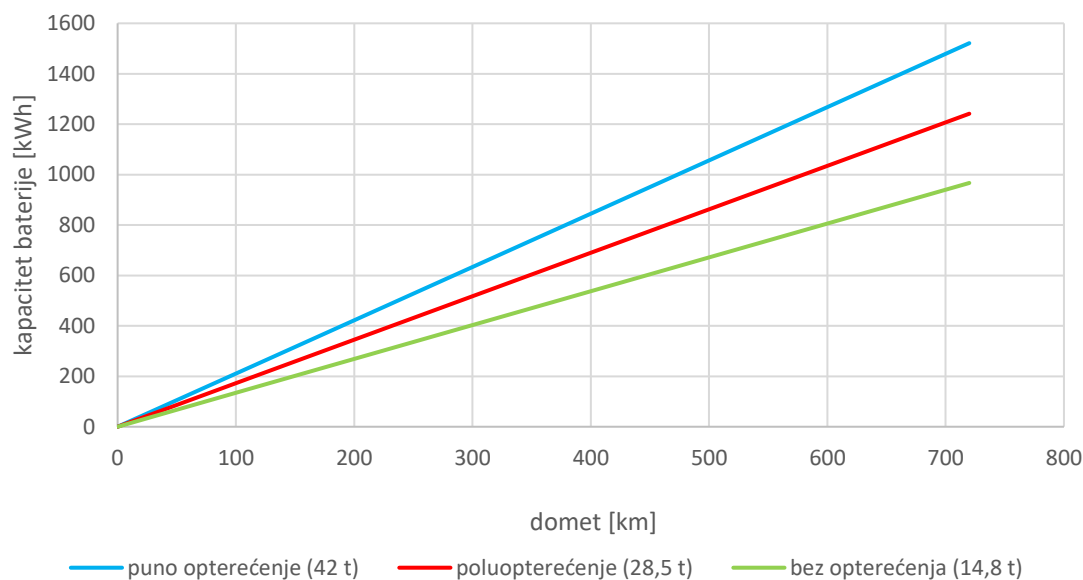
Vozni ciklus	Potrošnja energije po kilometru	Ukupna potrošnja po voznom ciklusu
9 h	0,940 kWh/km	712 kWh
4,5 h	0,940 kWh/km	356 kWh
3 h	0,940 kWh/km	237 kWh
1,5 h	0,940 kWh/km	118,5 kWh

Za ovaj slučaj nije potrebno razmatrati moguće domete jer prevoženje praznih tegljača s poluprikolicom nije od financijske koristi te se nastoji izbjegavati vožnja bez opterećenja.

Na slici 22. usporedno su prikazane linije kumulativna potrošnje energije u ovisnosti o vremenu za sve vrste opterećenja gdje je vidljivo da je najveća potrošnja kod punog opterećenja, a najmanja kad nema opterećenja. Ako se usporedi energija po ciklusu potrebno je 34 % više energije za polupuni, odnosno 70 % više energije za puni u odnosu na prazni tegljač s poluprikolicom.

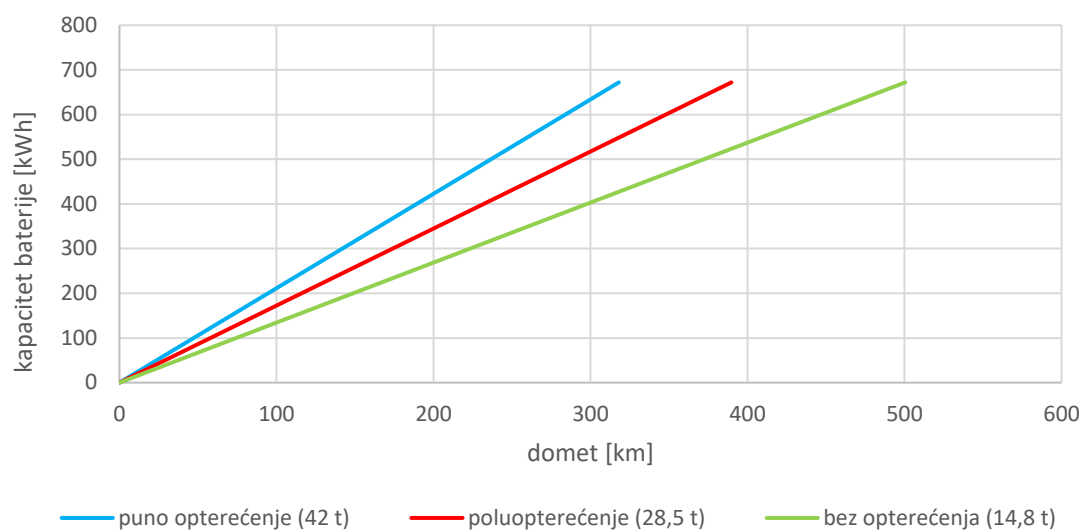
**Slika 22. Prikaz ovisnosti kumulativna potrošnje energije o vremenu usporedno za sve vrste opterećenja**

Na slici 23. je prikazana ovisnost kapaciteta baterije o dometu usporedno za različite vrste opterećenja u FIGE ciklusu. Iz dijagrama je vidljivo koliki je potreban kapacitet baterije da BEV tegljač s poluprikolicom odvozi 720 km odnosno svih 9 h bez nadopunjavanja za pojedino opterećenje. Ukoliko se uključi nadopunjavanje moguće je smanjiti taj kapacitet baterije. Ekvivalent dometa 720 km praznog tegljača s poluprikolicom je 560 km polupraznog i 457 km punog.



Slika 23. Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu za različite vrste opterećenja u FIGE ciklusu

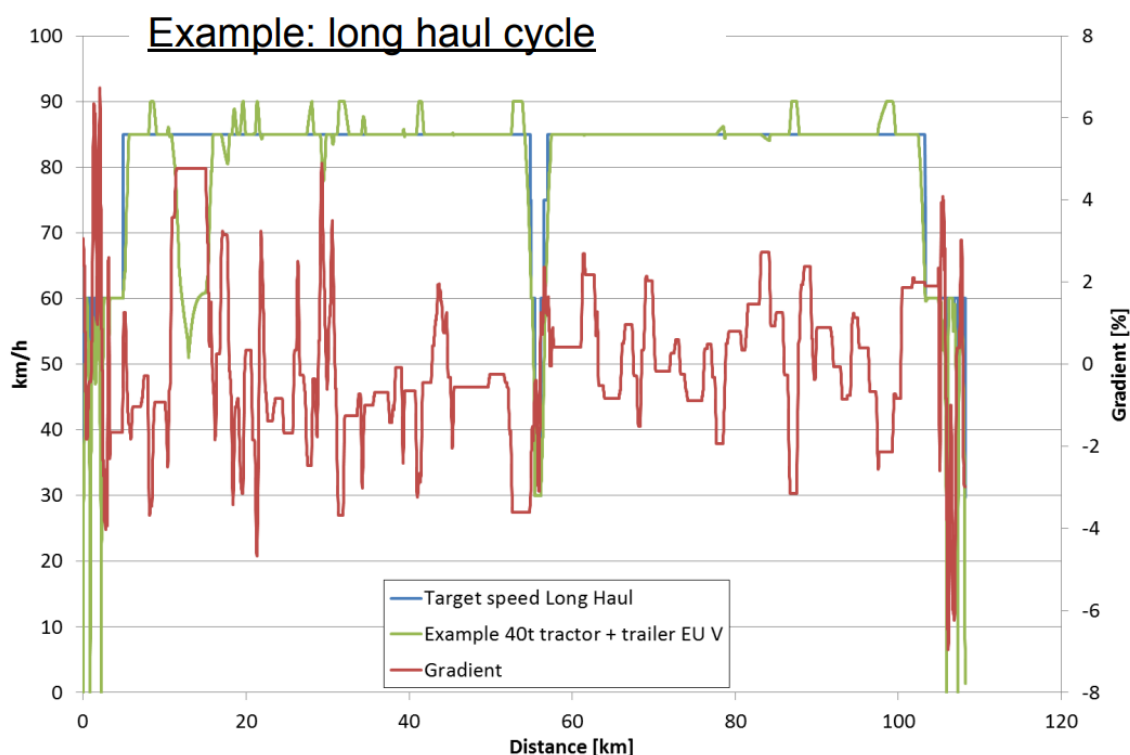
Ukoliko se razmatraju kapaciteti koji su trenutno na tržištu dobije se koliki je moguć domet s pojedinom vrstom opterećenja što je prikazano na slici 24. S kapacitetom baterije od 672 kWh za puno opterećenje nije moguće odvoziti svih 9 h odnosno 720 km bez nadopunjavanja. S tim kapacitetom također nije moguće odvoziti ni 4,5 h odnosno 360 km bez nadopunjavanja, ali je moguće voziti 318 km.



Slika 24. Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu za pojedine vrste opterećenja u FIGE ciklusu

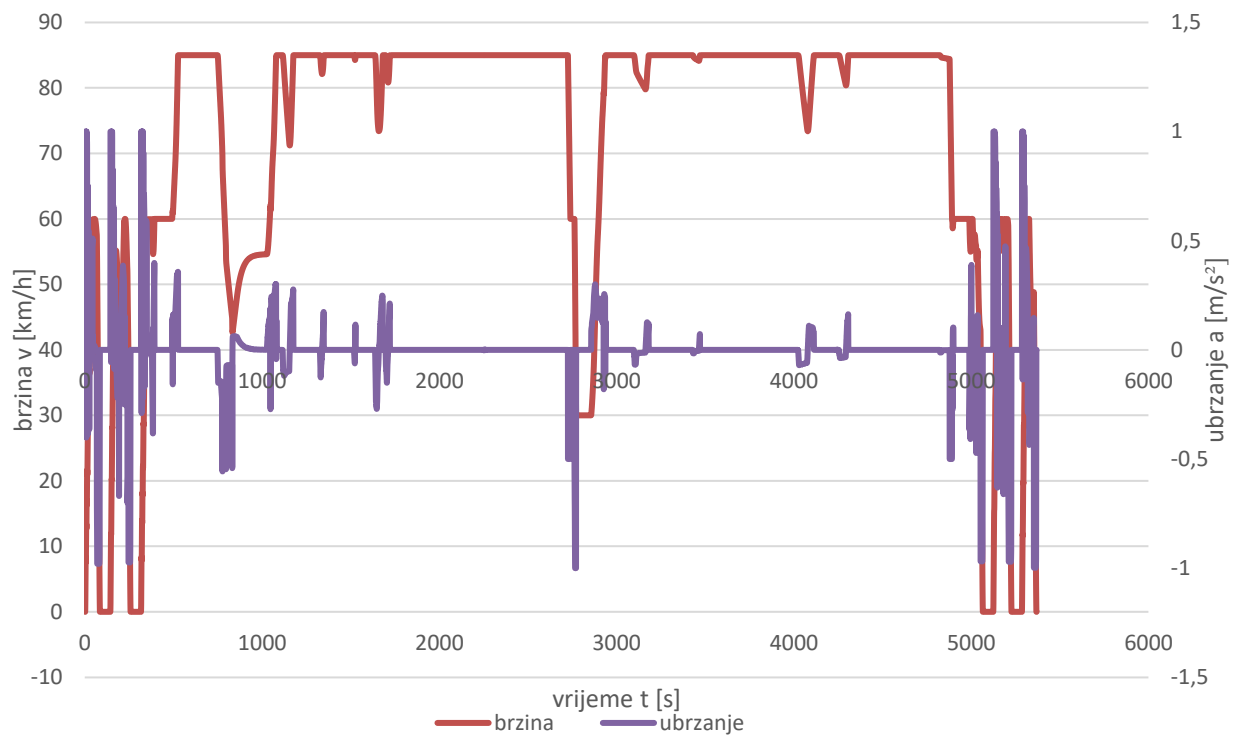
3.5. VECTO ciklus

VECTO je standardizirani simulacijski model vozila koji se koristi kako bi se simulirale emisije CO₂ i potrošnju energije vozila za realne cikluse vožnje i opterećenja. Izračuni su precizniji nego u FIGE ciklusu jer su ovdje obuhvaćeni usponi odnosno uvrštena je realna ruta. Trajanje jednog VECTO ciklusa je 5396 sekundi, te kako bi se mogao usporediti s FIGE potrebno ga je svesti na 600 sekundi. U jednom VECTO ciklusu prijeđeni put iznosi 108 191 m. Također je potrebno u VECTO ciklus uvrstit ulazne podatke jednake onima u FIGE ciklusu te ga prilagoditi električnom tegljaču s obzirom da je predviđen za tegljač s Dieselovim motorom. Na slici 25. prikazan je primjer VECTO ciklusa.



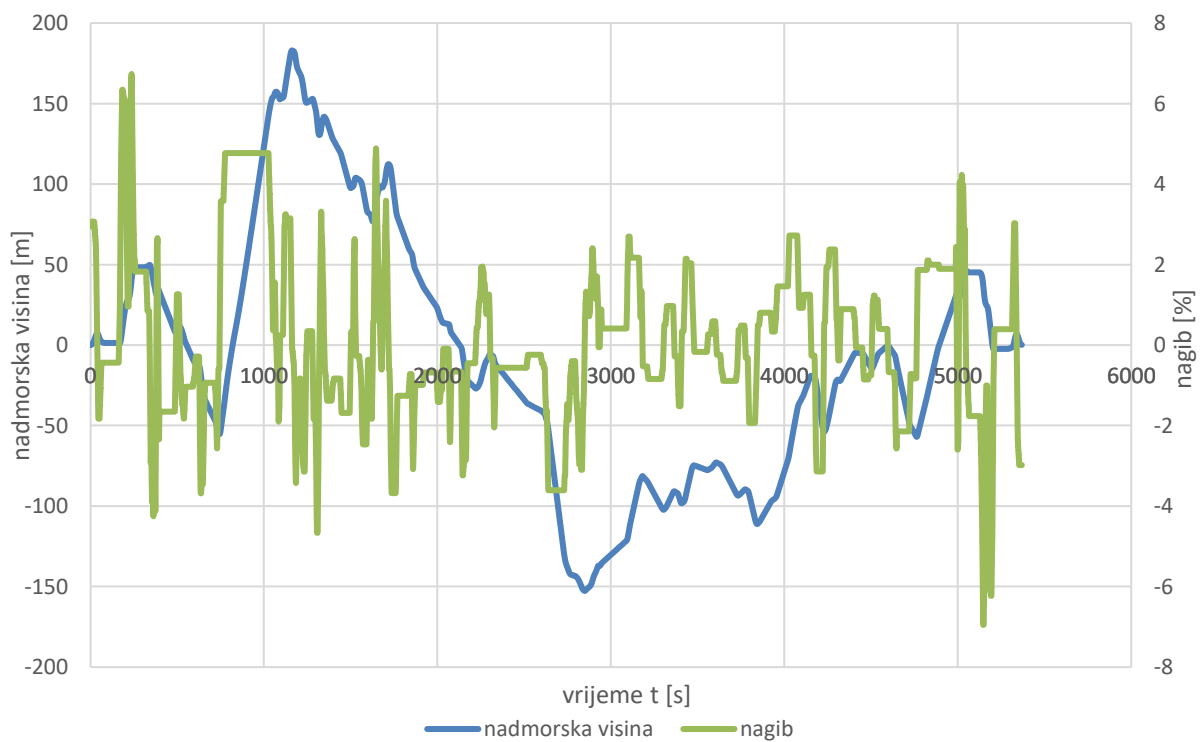
Slika 25. Prikaz VECTO ciklusa za dugotrajni ciklus [9]

Na slici 26. prikazana je ovisnost brzine i ubrzanja o vremenu za VECTO ciklus.



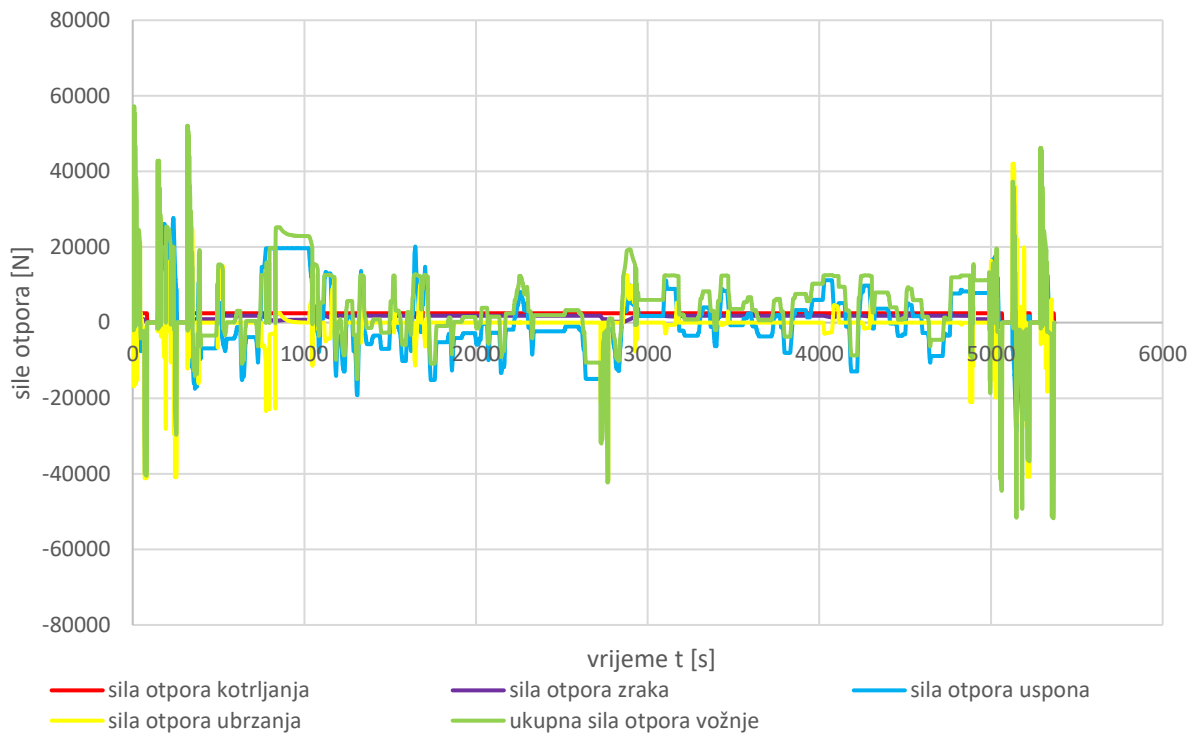
Slika 26. Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu u VECTO ciklusu

Na slici 27. prikazana je ovisnost nadmorske visine i nagiba o vremenu za VECTO ciklus.

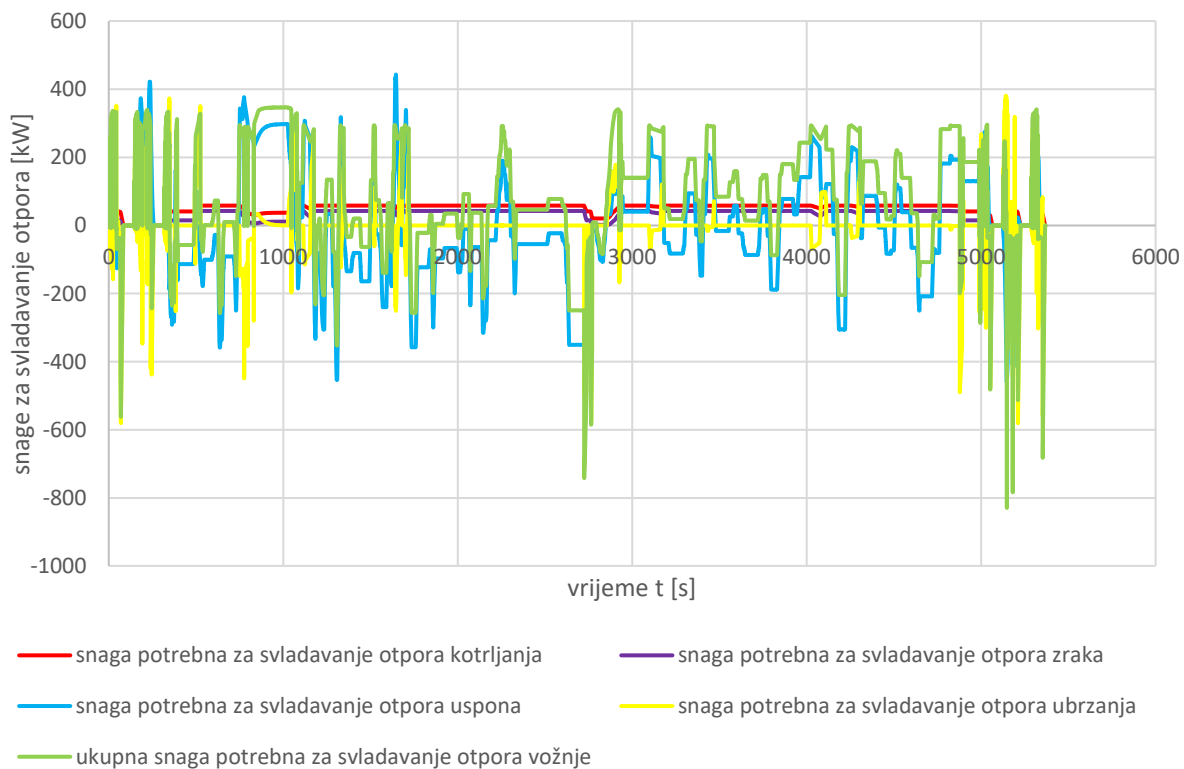


Slika 27. Prikaz ovisnosti nadmorske visine i nagiba o vremenu u VECTO ciklusu

Na slikama 28. i 29. prikazane su pojedine sile i snage otpora u ovisnosti o vremenu za VECTO ciklus.

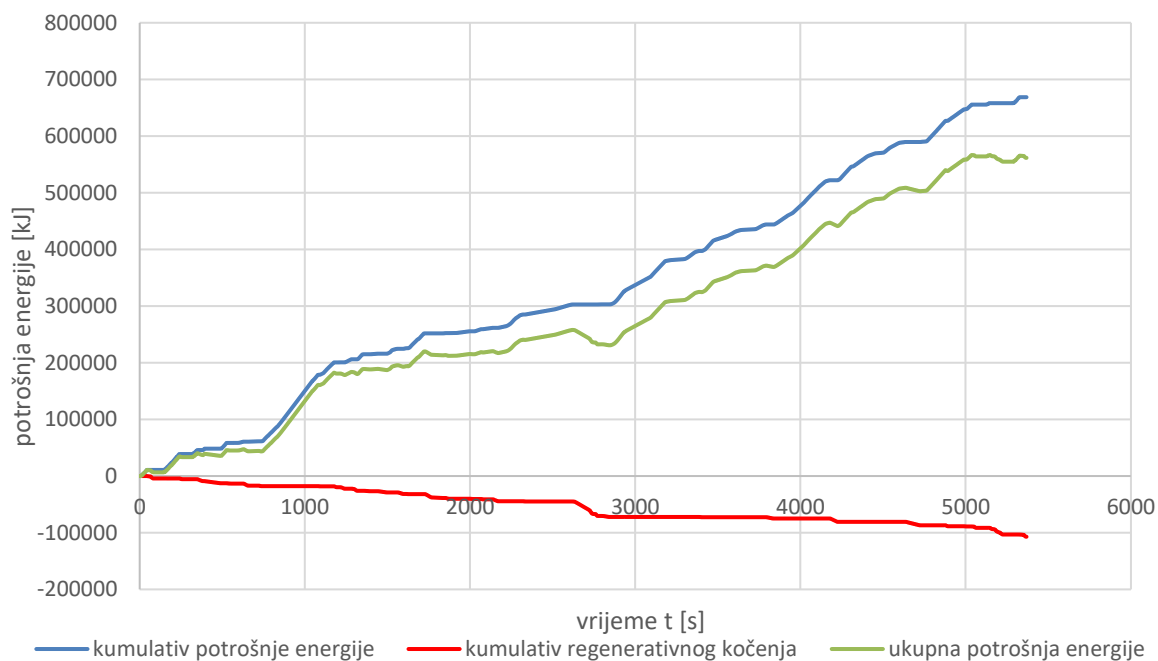


Slika 28. Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u VECTO ciklusu



Slika 29. Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu u VECTO ciklusu

Na slici 30. prikazana je potrošnja energije u VECTO ciklusu. Plava linija prikazuje kumulativ potrošnje energije prilikom vožnje, a crvena linija kumulativ regenerativnog kočenja odnosno energiju koja se regenerira prilikom kočenja te će ona umanjiti ukupnu potrošnju energije koja je prikazana zelenom linijom.



Slika 30. Prikaz kumulativa potrošnje energije u VECTO ciklusu

U tablici 10. prikazani su rezultati VECTO ciklusa.

Tablica 10. Rezultati VECTO ciklusa

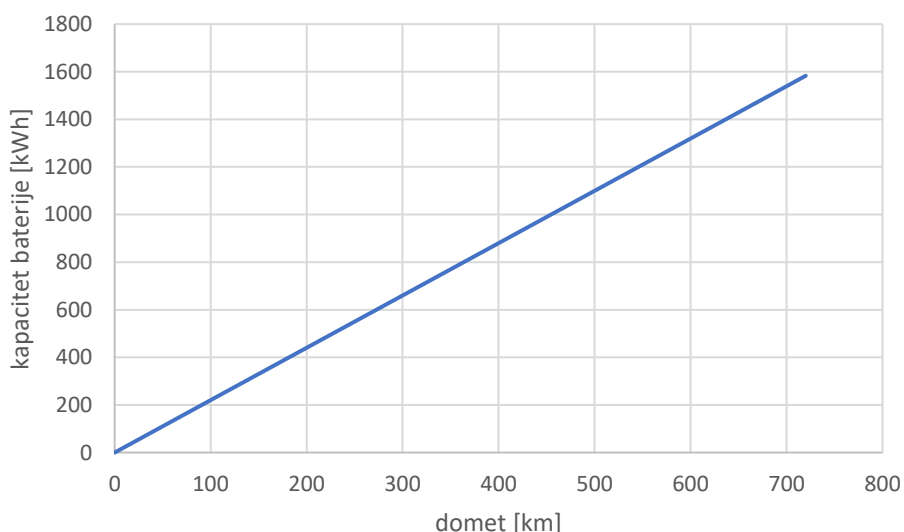
Potrošnja energije u 1 VECTO ciklusu	161,239 kWh
Potrošnja energije u 600 sekundi	18,019 kWh
Potrošnja energije po km	1,539 kWh/km

U tablici 11. prikazani su rezultati kapaciteti baterija za pojedini vozni ciklus u VECTO ciklusu.

Tablica 11. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus u VECTO ciklusu

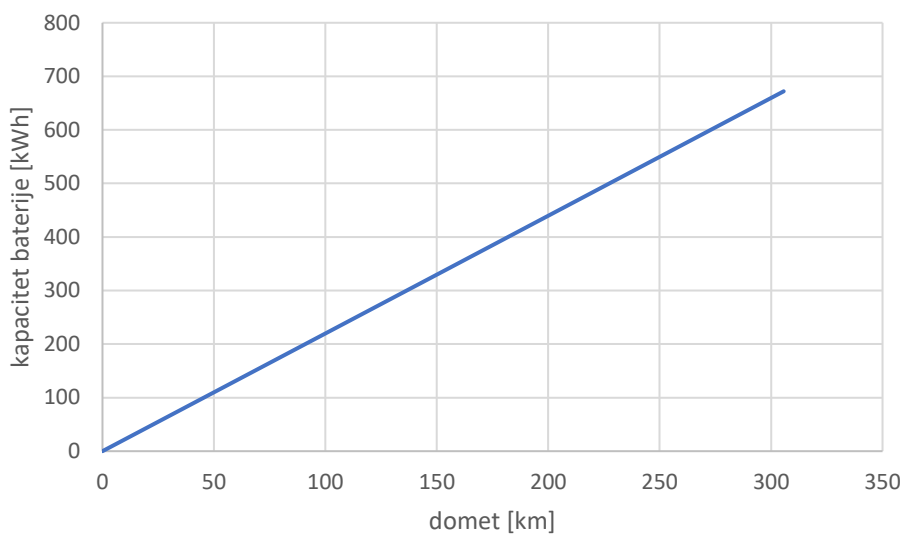
Vozni ciklus	Potrošnja energije po kilometru	Ukupna potrošnja po voznom ciklusu
9 h	1,539 kWh/km	975 kWh
4,5 h	1,539 kWh/km	487,5 kWh
3 h	1,539 kWh/km	325 kWh
1,5 h	1,539 kWh/km	162,5 kWh

Na slici 31. prikazana je ovisnost kapaciteta baterije o dometu za puni tegljač. Iz dijagrama je vidljivo koliki je potreban kapacitet baterije da BEV tegljač s poluprikolicom odvozi 720 km odnosno svih 9 h bez nadopunjavanja. Ukoliko se uključi nadopunjavanje moguće je smanjiti taj kapacitet baterije.



Slika 31. Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu u VECTO ciklusu

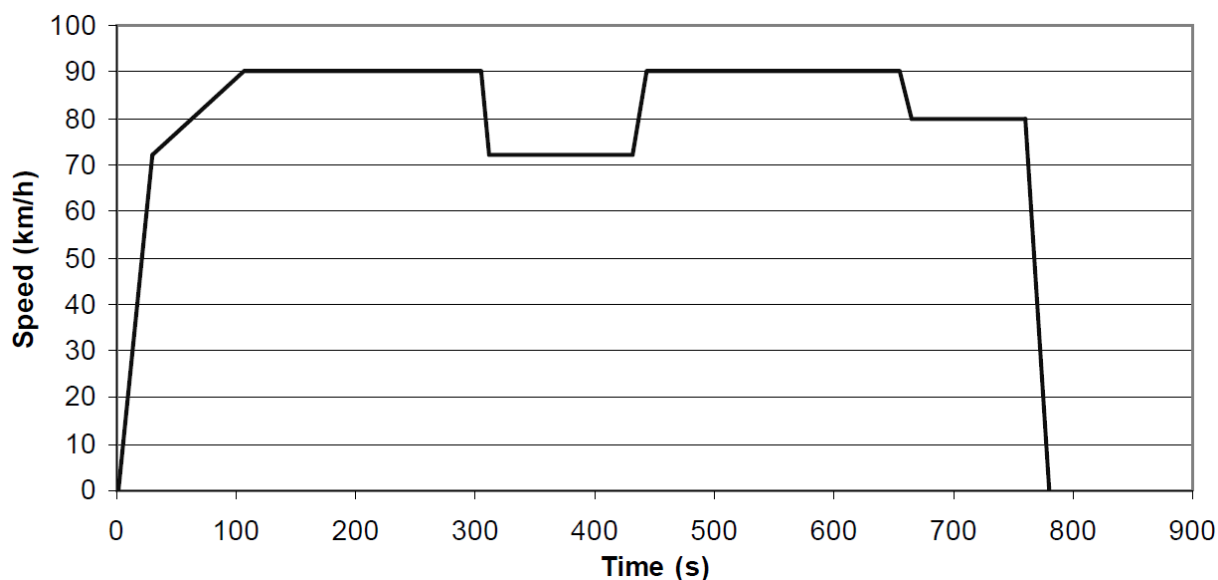
Ukoliko se razmatraju kapaciteti koji su trenutačno na tržištu dobije se koliki je moguć domet što je prikazano na slici 32. S kapacitetom baterije od 672 kWh nije moguće odvoziti svih 9 h odnosno 720 km bez nadopunjavanja. S tim kapacitetom također nije moguće odvoziti ni 4,5 h odnosno 360 km bez nadopunjavanja, ali je moguće voziti 305 km.



Slika 32. Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu u VECTO ciklusu

3.6. Millbrook ciklus

Millbrook je testni ciklus razvijen za mjerenje emisija teških teretnih vozila i autobusa. Ciklus traje 780 sekundi, a prijeđeni put iznosi 17903,33 m. Na slikama 33. i 34. prikazani su Millbrook ciklus i njegovi parametri.



Slika 33. Millbrook ciklus [8]

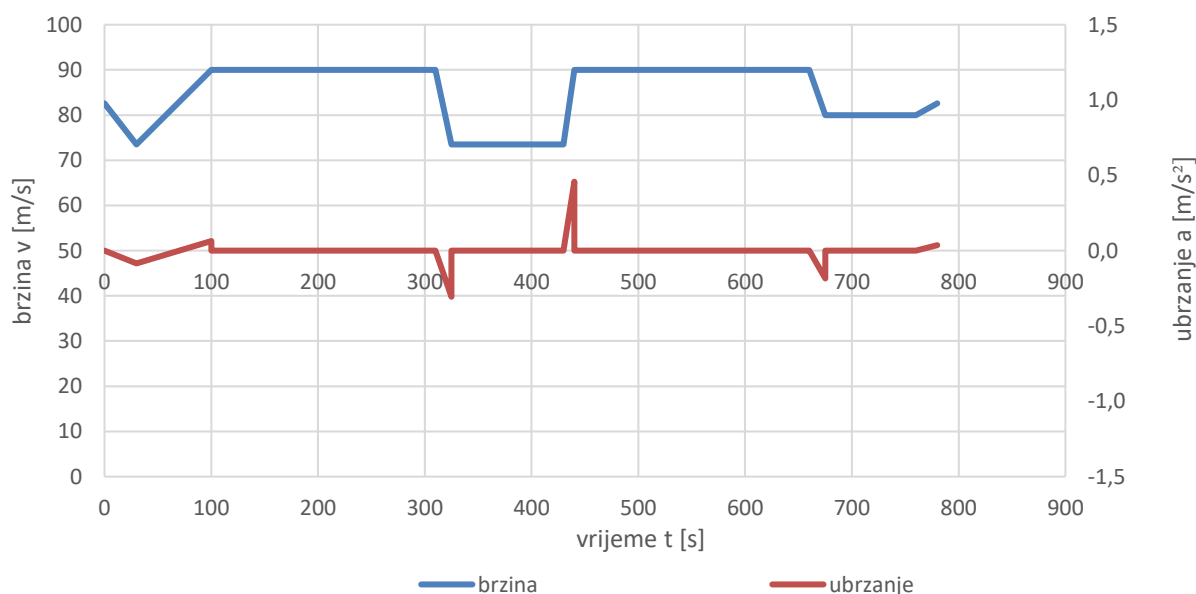
ART.KINEMA parameters

Total distance	17903.33 m	Average negative acceleration	-0.235 m/s ²
Total time	780 s	Standard deviation of accel.	0.425 m/s ²
Driving time	780 s	Standard dev. of positive accel.	0.288 m/s ²
Drive time	635 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.216 m/s ²
Drive time spent accelerating	30 s	Number of accelerations	1
Drive time spent decelerating	115 s	Accelerations per km	0.056 /km
Time spent braking	20 s	Number of stops	0
Standing time	0 s	Stops per km	0 /km
% of time driving	100.00 %	Average stop duration	N/A s
% of cruising	81.41 %	Average distance between stops	N/A m
% of time accelerating	3.85 %	Relative positive acceleration	0.0151 m/s ²
% of time decelerating	14.74 %	Positive kinetic energy	0.615 m/s ²
% of time braking	2.56 %	Relative positive speed	0.288
% of time standing	0.00 %	Relative real speed	1.000
Average speed (trip)	82.6 km/h	Relative square speed	23.767 m/s
Average driving speed	0.94 km/h	Relative positive square speed	6.366 m/s
Standard deviation of speed	77.94 km/h	Relative real square speed	23.767 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	90 km/h	Relative cubic speed	568.69 m ² /s ²
Maximum speed	90 km/h	Relative positive cubic speed	142.51 m ² /s ²
Average acceleration	-0.001 m/s ²	Relative real cubic speed	568.69 m ² /s ²
Average positive acceleration	0.201 m/s ²	Root mean square of acceleration	0.041 m/s ²

Slika 34. Parametri Millbrook ciklusa [8]

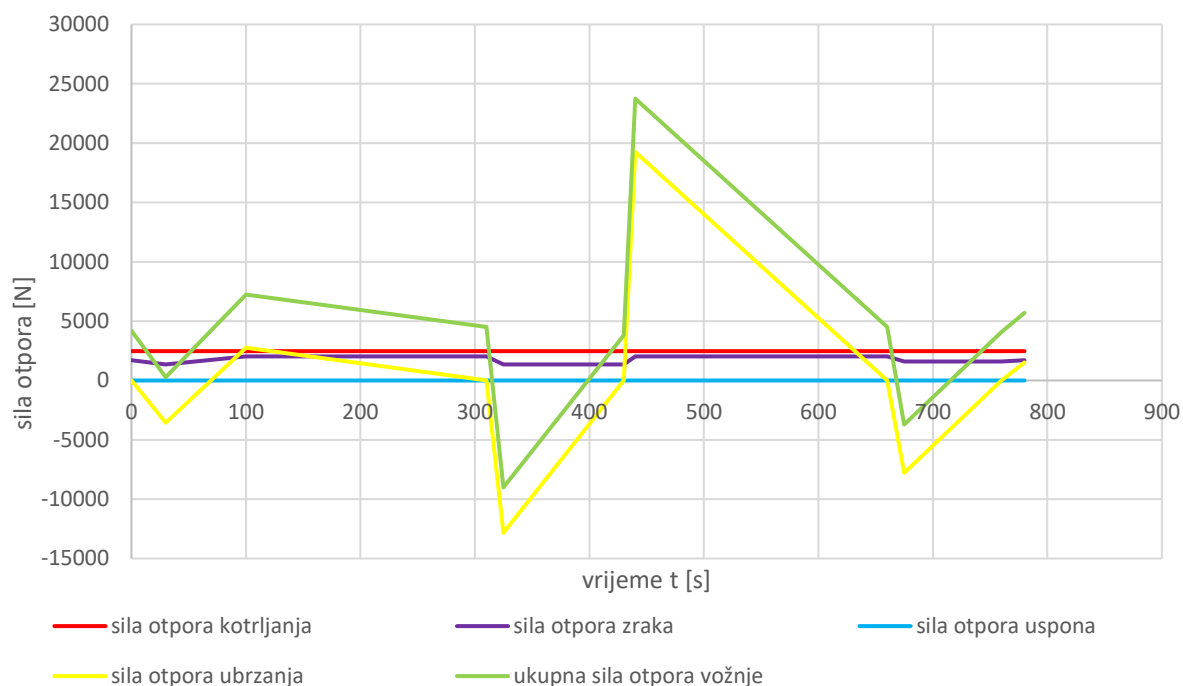
Kao i kod FIGE ciklusa, Millbrook ciklus potrebno je prilagoditi jer je vožnja na autoputu manje dinamična, bez toliko ponovnih ubrzanja vozila 0-80 km/h ni potpunih zaustavljanja.

Na slici 35. prikazane su ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu za prilagođeni Millbrook ciklus.

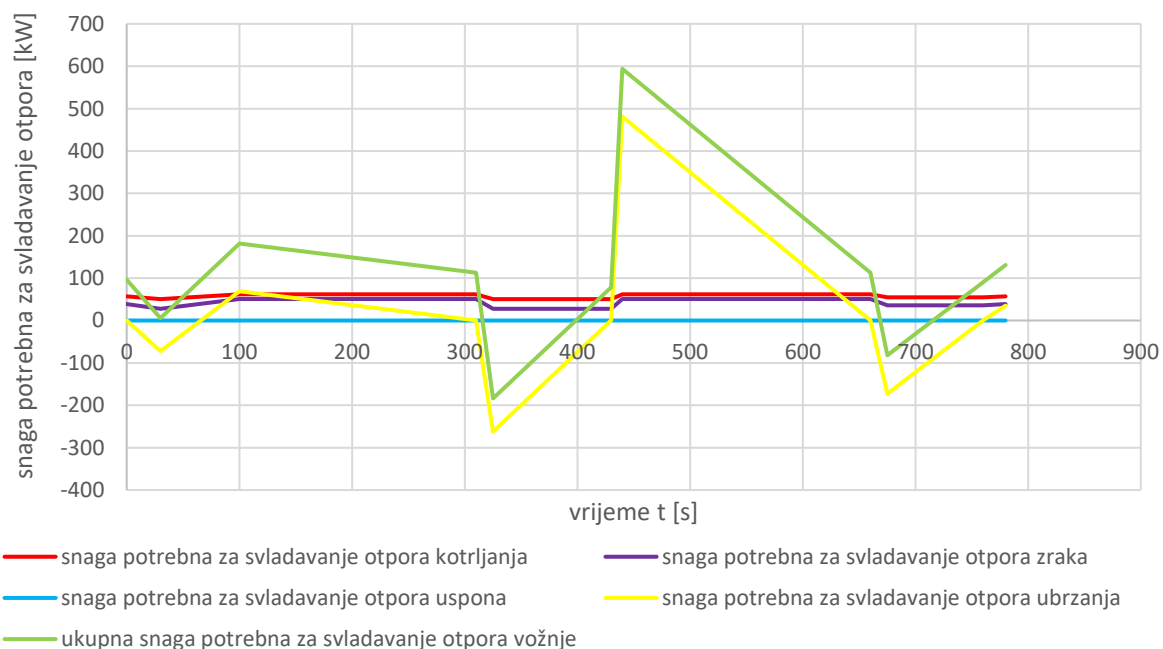


Slika 35. Prikaz ovisnosti brzine i ubrzanja o vremenu za Millbrook ciklus

Na slikama 36. i 37. prikazane su ovisnosti pojedinih sila i snaga otpora vožnje o vremenu za Millbrook ciklus.

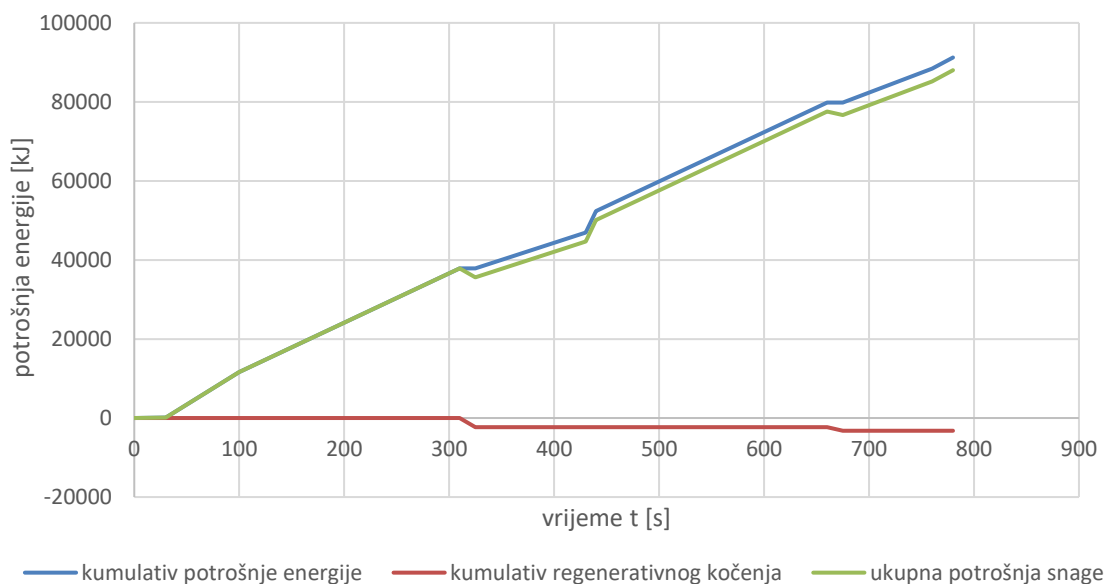


Slika 36. Prikaz pojedinih sila otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za Millbrook ciklus



Slika 37. Prikaz pojedinih snaga otpora vožnje u ovisnosti o vremenu za Millbrook ciklus

Na slici 38. prikazana je potrošnja energije u Millbrook ciklusu. Plava linija prikazuje kumulativ potrošnje energije prilikom vožnje, a crvena linija kumulativ regenerativnog kočenja odnosno energiju koja se regenerira prilikom kočenja te će ona umanjiti ukupnu potrošnju energije koja je prikazana zelenom linijom.



Slika 38. Prikaz kumulativa potrošnje energije za Millbrook ciklus

U tablici 12. prikazani su rezultati prilagođenog Millbrook ciklusa u kojem prosječna brzina iznosi 82,6 km/h, te nema potpunog zaustavljanja i ponovnog pokretanja u svakom ciklusu.

Tablica 12. Rezultati prilagođenog Millbrook ciklusa

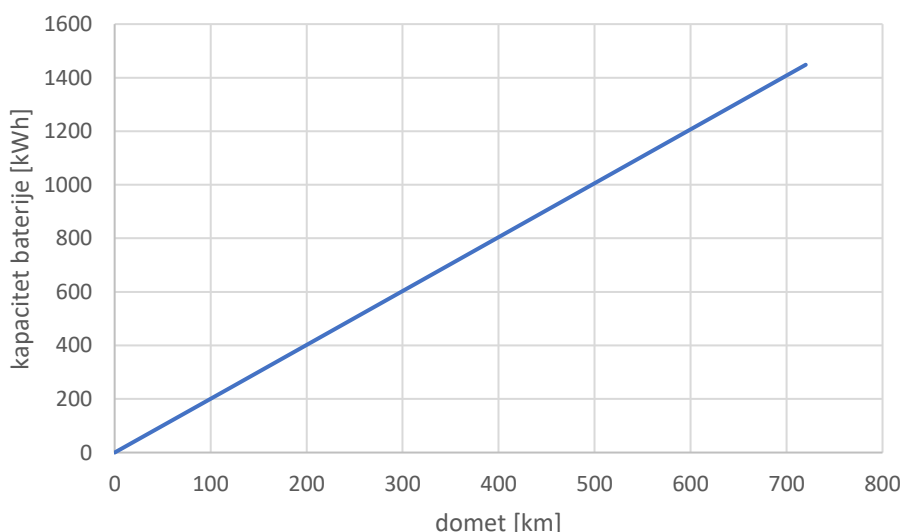
Potrošnja energije u 1 Millbrook ciklus	25,209 kWh
Potrošnja energije u 600 sekundi	19,392 kWh
Potrošnja energije po km	1,408 kWh/km

U tablici 13. prikazani su rezultati kapaciteti baterija za pojedini vozni ciklus u Millbrook ciklusu.

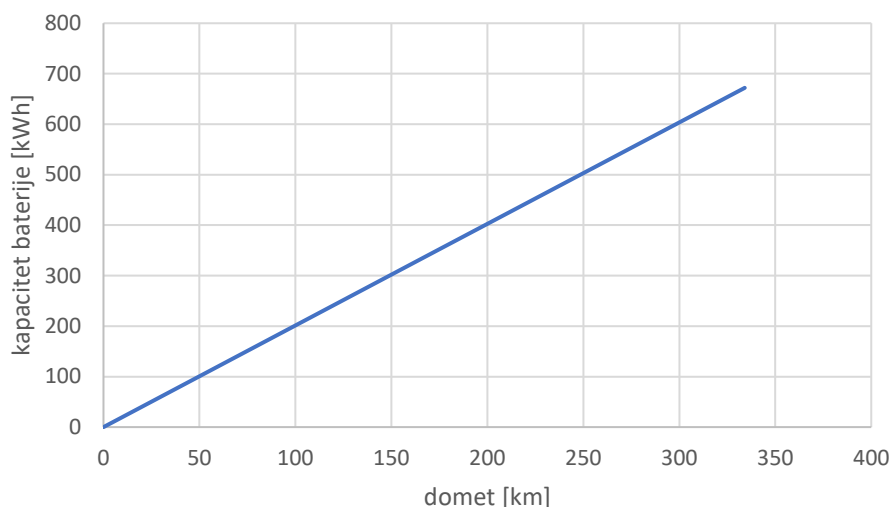
Tablica 13. Rezultati kapaciteta baterija za pojedini vozni ciklus u Millbrook ciklusu

Vozni ciklus	Potrošnja energije po kilometru	Ukupna potrošnja po voznom ciklusu
9 h	1,408 kWh/km	1050 kWh
4,5 h	1,408 kWh/km	525 kWh
3 h	1,408 kWh/km	350 kWh
1,5 h	1,408 kWh/km	175 kWh

Na slici 39. prikazana je ovisnost kapaciteta baterije o dometu. Iz dijagrama je vidljivo koliki je potreban kapacitet baterije da BEV tegljač s poluprikolicom odvozi 720 km odnosno svih 9 h bez nadopunjavanja. Ukoliko se uključi nadopunjavanje moguće je smanjiti taj kapacitet baterije.

**Slika 39. Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o određenom dometu u Millbrook ciklusu**

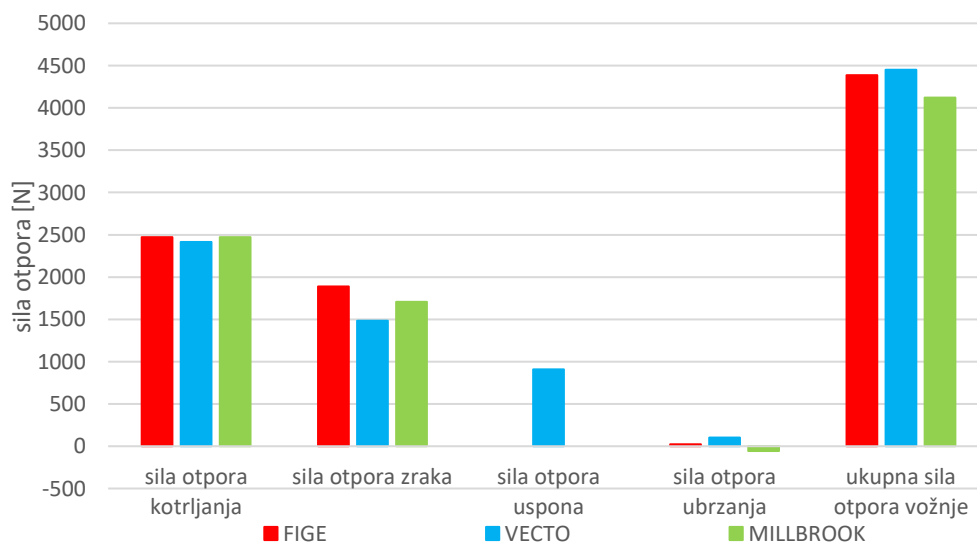
Ukoliko se razmatraju kapaciteti koji su trenutno na tržištu dobije se koliki je moguć domet što je prikazano na slici 40. S kapacitetom baterije od 672 kWh nije moguće odvoziti svih 9 h odnosno 720 km bez nadopunjavanja. S tim kapacitetom također nije moguće odvoziti ni 4,5 h odnosno 360 km bez nadopunjavanja, ali je moguće voziti 334 km.



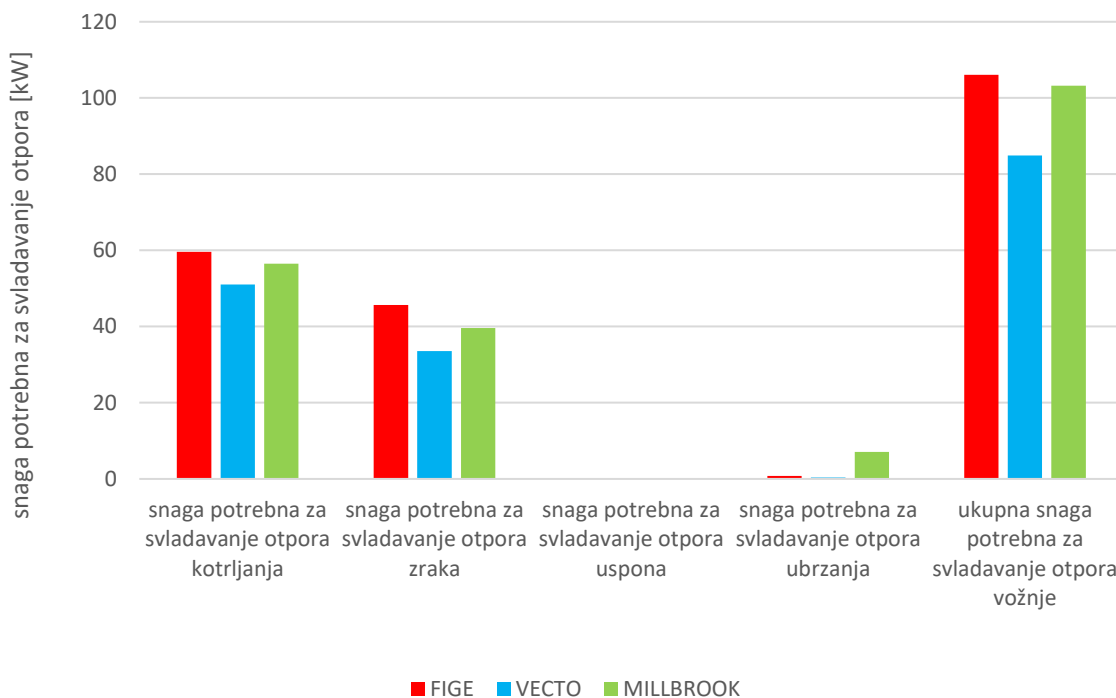
Slika 40. Prikaz trenutačnih kapaciteta baterije u ovisnosti o dometu u Millbrook ciklusu

3.7. Usporedba FIGE, VECTO i Millbrook ciklusa

Na slikama 41. i 42. prikazane su usporedbe iznosa sila otpora i snaga potrebnih za svladavanje otpora za sva tri ciklusa. Vrijednosti kod VECTO ciklusa za sile otpora kotrljanja i otpora zraka nešto su niže nego za ostale cikluse zbog manje prosječne brzine. Sila otpora uspona kod FIGE i Millbrook ciklusa ne postoji.

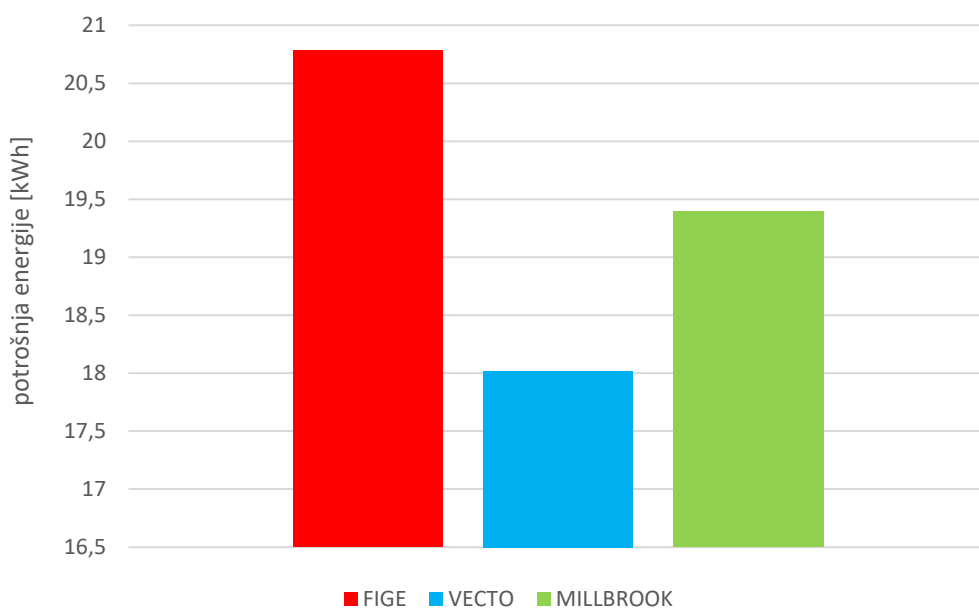


Slika 41. Usporedba sila otpora u pojedinim ciklusima



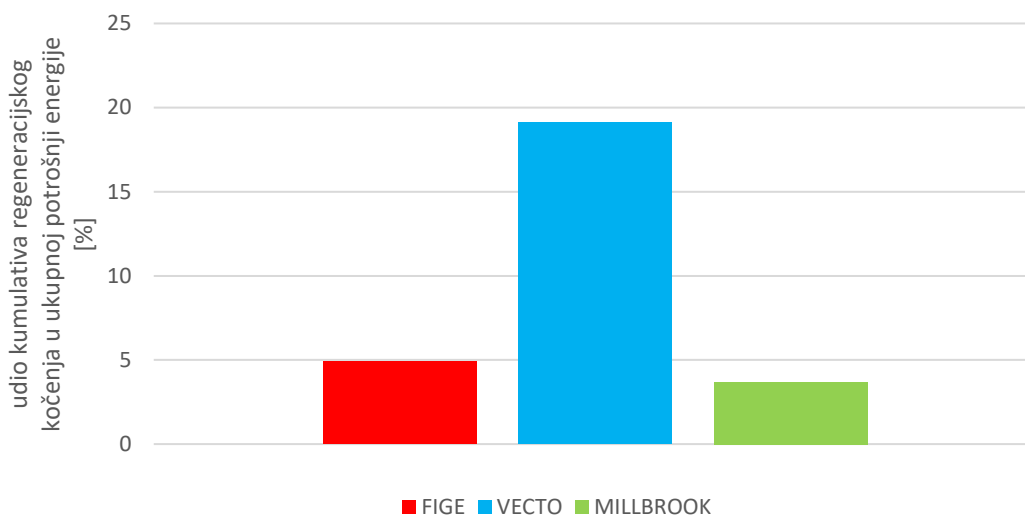
Slika 42. Usporedba snaga otpora u pojedinim ciklusima

Na slici 43. prikazana je usporedba potrošnje energije svedenih na 600 sekundi za sva tri ciklusa.



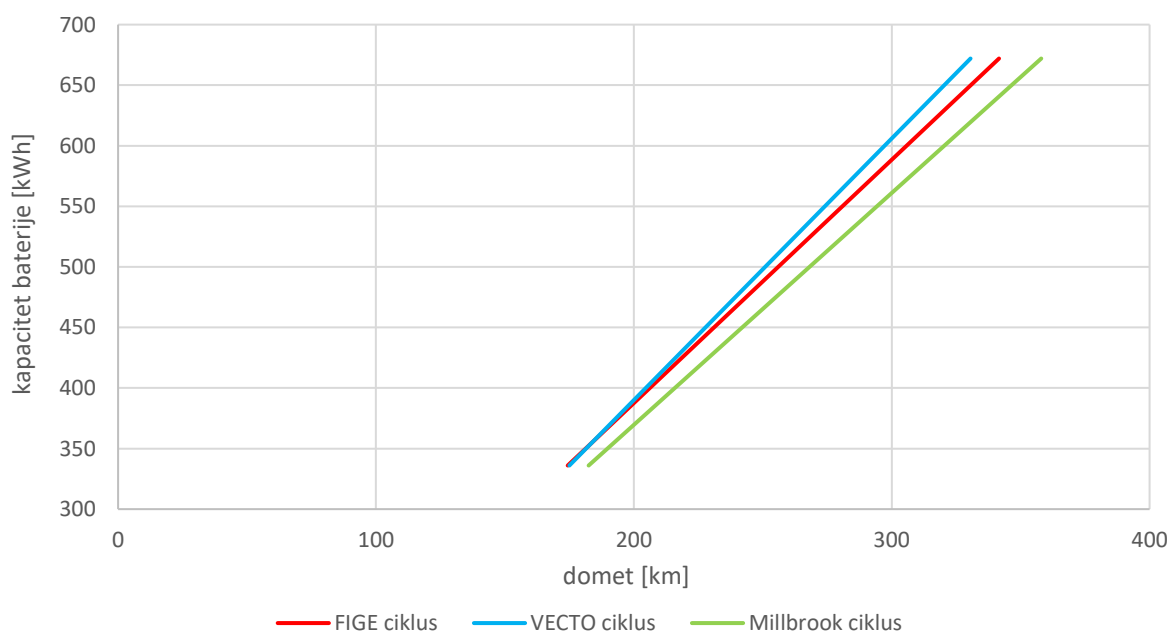
Slika 43. Usporedba potrošnje energije po kilometru u pojedinom ciklusu

Na slici 44. prikazana je usporedba udjela kumulativa regeneracijskog kočenja u ukupnoj potrošnji energije za pojedini ciklus,



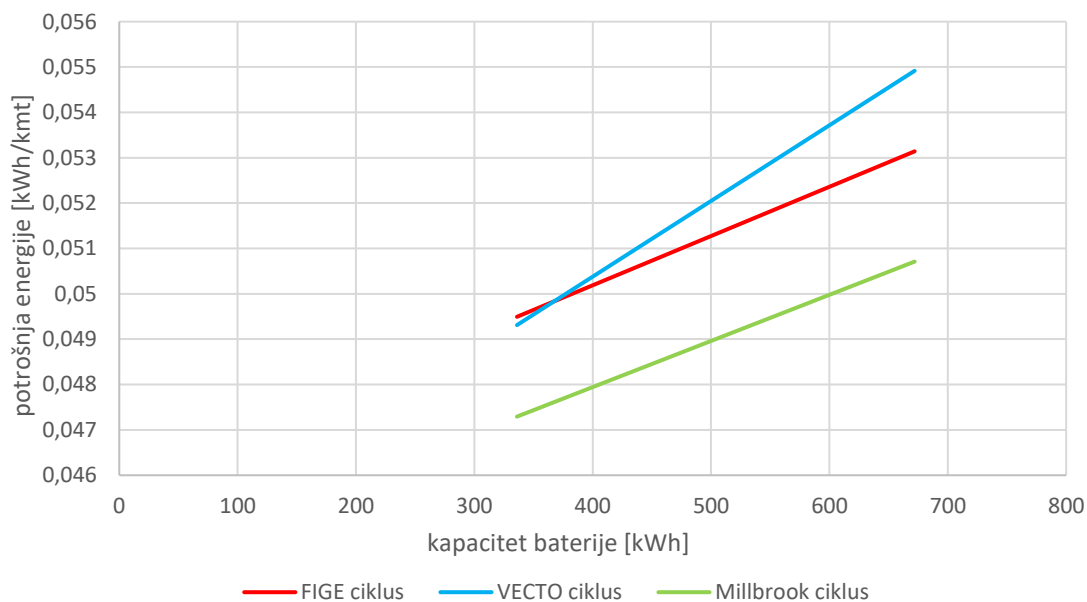
Slika 44. Usporedba udjela kumulativa regeneracijskog kočenja u ukupnoj potrošnji energije za pojedini ciklus

Na slici 45. je prikazana ovisnost kapaciteta baterije o dometu za pojedini ciklus na temelju čega su vidljive razlike u rezultatima. Prikazani su realni kapaciteti baterija od 336 do 672 kWh s fiksnom masom tereta od 21 t. Promjenjiva varijabla je masa odnosno kapacitet baterije gdje je i s kapacitetom baterije od 672 kWh ukupna masa vozila manja od 42 t.



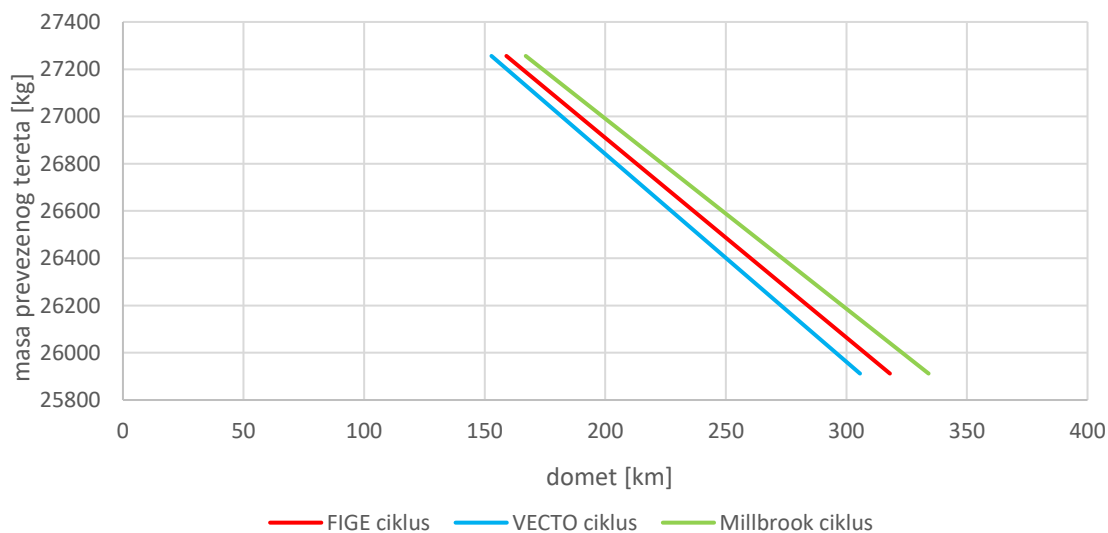
Slika 45. Prikaz ovisnosti kapaciteta baterije o dometu za pojedini ciklus

Na slici 46. prikazana je ovisnost potrošnje energije po kilometru i toni o kapacitetu baterije za pojedine cikluse. Ovdje je također fiksirana masa tereta od 21 t. Zbog povećanog mjerila razlike izgledaju velike.



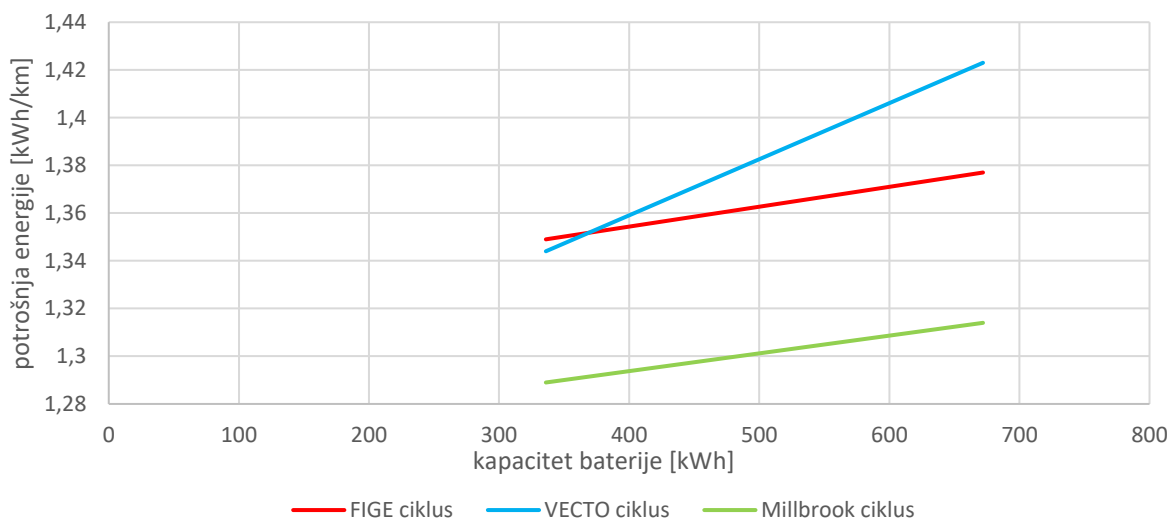
Slika 46. Prikaz ovisnosti potrošnje energije po kilometru i toni o kapacitetu baterije za pojedine cikluse

Na slici 47. prikazana je ovisnost mase prevezenog tereta o dometu za pojedini ciklus. Konstantna varijabla je ukupna masa vozila koja iznosi 42 t, a promjenjiva je masa baterije zbog čega je promjenjiva i masa prevezenog tereta. Ukoliko se poveća kapacitet baterije, smanji se masa mogućeg prevezenog tereta, ali se poveća domet.



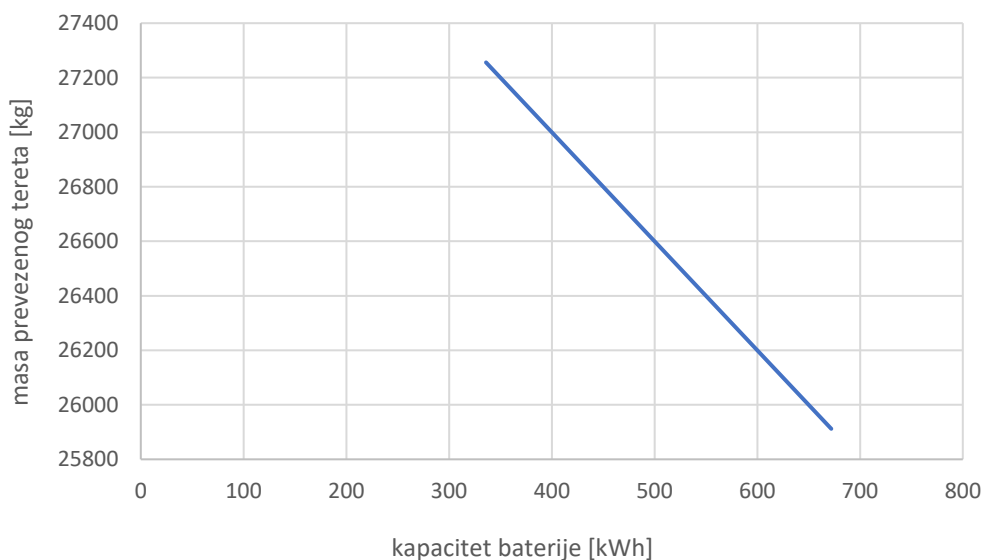
Slika 47. Prikaz ovisnosti mase prevezenog tereta o dometu za pojedine cikluse

Na slici 48. prikazana je ovisnost potrošnje energije po kilometru i toni o kapacitetu baterije za pojedini ciklus. Ovdje je također uvećano mjerilo zbog čega razlika između rezultata izgleda veliko.



Slika 48. Prikaz ovisnosti potrošnje energije po kilometru o kapacitetu baterije za pojedine cikluse

Na slici 49. prikazana je ovisnost mase prevezenog tereta o kapacitetu baterije koja je jednaka za sva tri ciklusa.



Slika 49. Prikaz ovisnosti mase prevezenog tereta o kapacitetu baterije

VECTO ciklus pokazuje kod računanja potrošnje najviše vrijednosti iz razloga jer ovaj ciklus uključuje uspon iako su i ostali ciklusi ne odstupaju previše odnosno u samo nekoliko posto.

4. UTJECAJ TEHNOLOGIJA BATERIJA

Najvažniji faktor BEV tegljača s poluprikolicom je baterija jer o njoj ovise sve ostale karakteristike kao što su domet, maksimalna masa korisnog tereta i brzina punjenja. Litij-ionske baterije su se pokazale kao dobar odabir za BEV tegljače zbog visoke gustoće energije baterije, dugog životnog vijeka i niske stope samopražnjenja u odnosu na ostale tehnologije baterija. Dostupne su različite vrste Li-ion baterija kao što su litij-nikal-mangan-kobaltna baterija (NMC), litij-nikal-kobalt-aluminijska baterija (NCA) i litij-željezo-fosfatne baterije (LFP). U tablici 14. prikazane su kemije Li-ion katoda koje su dostupne za BEV tegljače s poluprikolicom te njihove glavne značajke. Životni vijek baterije se razmatra sve dok baterije mogu dosegnuti 80 % originalnog kapaciteta punjenja.

Tablica 14. Prikaz dostupnih kemija Li-ion katoda za BEV tegljače s poluprikolicom [4]

	NMC	NCA	LFP
Gustoća energija ćelija (Wh/kg)	~200 - 300	~250 - 300	~200 - 220
GCTPR %	55-65	55-65	80-90
Životni ciklus (ciklusi sa 80 % kapaciteta)	~ 2000 - 2500	~ 1000 - 1500	~ 2500 - 3000
Cijena ćelije (\$/kWh)	70-90	70-80	65-80

4.1. NMC baterije

NMC baterije su najčešće korištena vrsta Li-ion baterija koja se primjenjuje kod BEV tegljača s poluprikolicom. Sastoje se od katode koja se sastoji od nikla, mangana i kobalt oksida te anode od grafita. Karakteristike baterije uvelike ovisi o omjerima sastava. Najčešće se primjenjuju NMC baterije jednakih omjera nikla, mangana i kobalt oksida što omogućuje dobru ravnotežu gustoće energije, toplinske stabilnosti i cijene. Katode bogate niklom imaju povećavanu gustoću energije i smanjenu cijenu zbog manjeg sadržaja skupog kobalta, ali i negativan utjecaj na životni vijek baterije. Katode bogate manganom će biti toplinski stabilnije i jeftinije. NMC baterije s grafitnom anodom imaju veliku gustoću energije što se može dodatno poboljšati

ukoliko se anodi doda silicij. Većina proizvođača BEV tegljača s poluprikolicom kao što su Daimler, MAN, Volvo i Renault koristi ovu tehnologiju baterije.

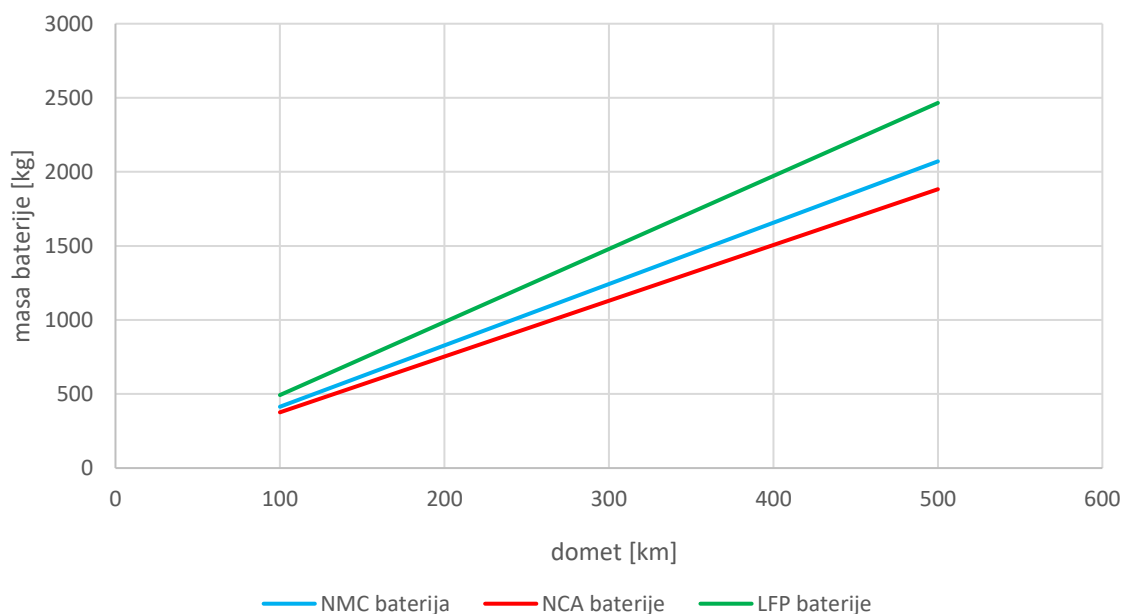
4.2. NCA baterije

NCA baterije su slične NMC baterijama po njihovoj gustoći energije i trajnosti, ali imaju nešto višu cijenu. Njihove karakteristike je također moguće mijenjati ovisno o omjerima sastava. NCA baterije bogate niklom imaju veću gustoću energije dok one bogate aluminijem imaju manju masu i jeftinije su, ali imaju slabiju toplinsku stabilnost.

4.3. LFP baterije

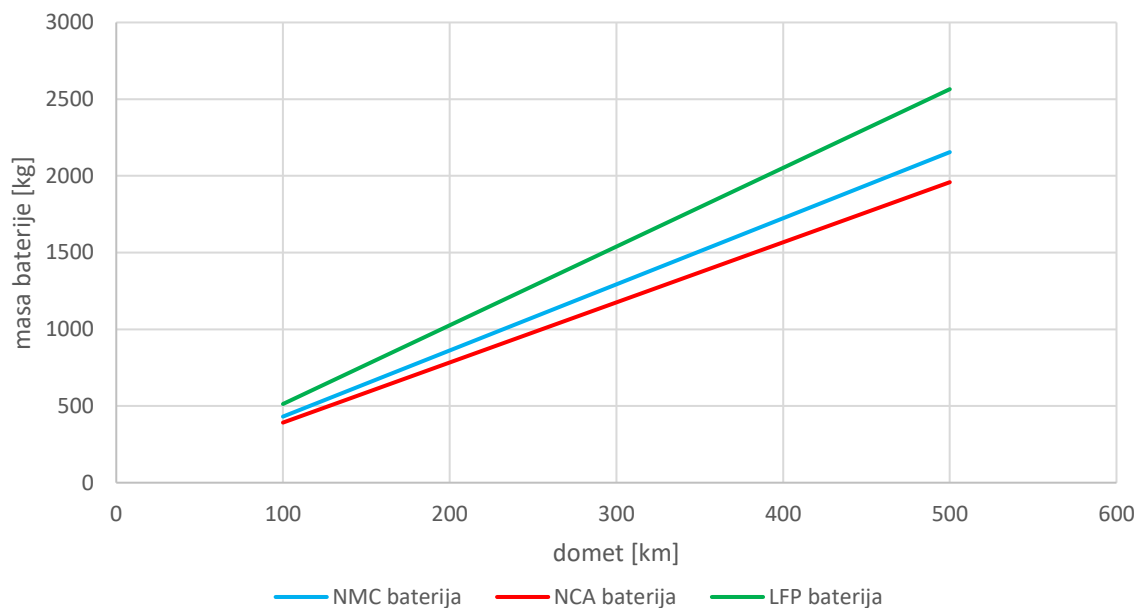
LFP su novija vrsta Li-ion baterija. Imaju manju gustoću energije zbog čega su teže i veće te zauzimaju više prostora, ali imaju duži životni vijek u odnosu na NMC i NCA baterije. Jeftinije su jer ne sadrže kobalt, te imaju jednostavniju integraciju s obzirom da imaju veću toplinsku stabilnost. Europski proizvođači koji ih koriste su DAF i VDL.

Na slici 51. prikazane su mase baterija u ovisnosti o dometu za pojedine tehnologije baterija kod punog opterećenja u FIGE ciklusu. Slike 49., 50. i 51. vrijede samo ako je fiksirana ukupna masa vozila koja iznosi 42 t s čime je fiksirana i potrošnja energije po kilometru. Povećanjem mase baterije smanjuje se masa tereta.



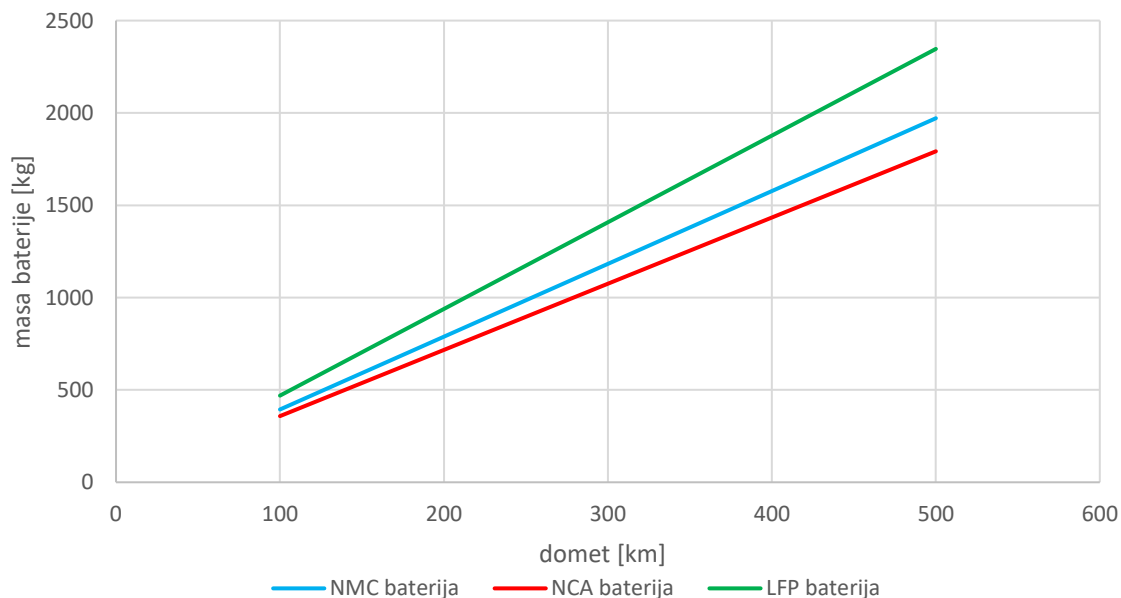
Slika 50. Usporedba različitih tehnologija baterija za puno opterećenje u FIGE ciklusu

Na slici 51. prikazane su mase baterija u ovisnosti o dometu za pojedine tehnologije baterija kod punog opterećenja u VECTO ciklusu.



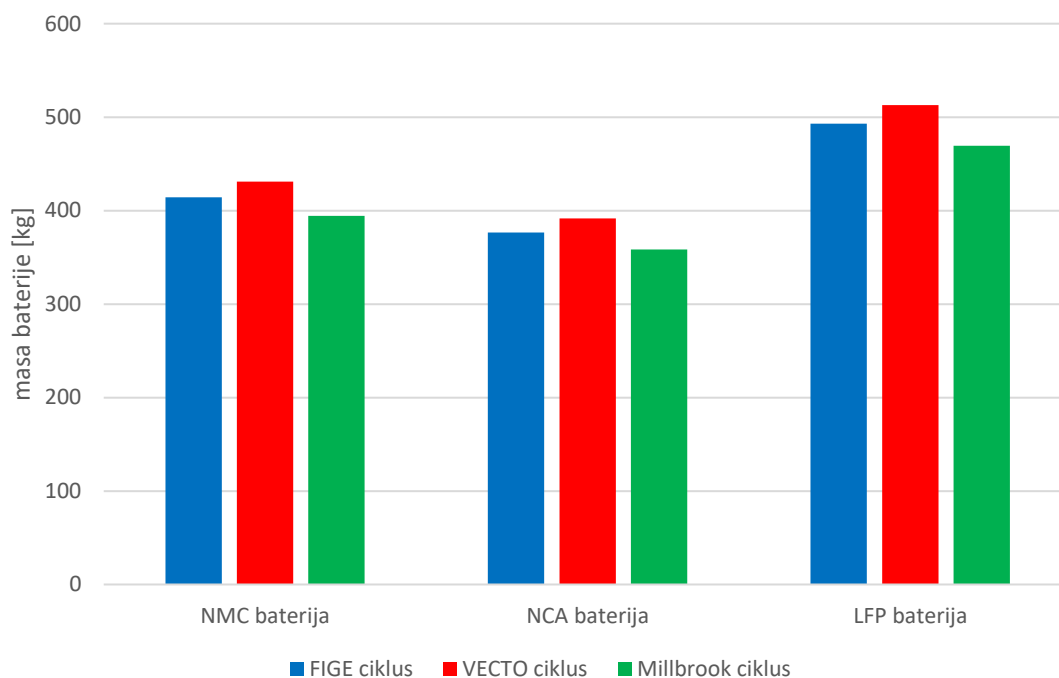
Slika 51. Usporedba različitih tehnologija baterija u VECTO ciklusu

Na slici 52. prikazane su mase baterija u ovisnosti o dometu usporedno za pojedine tehnologije baterija u Millbrook ciklusu.



Slika 52. Usporedba različitih tehnologija baterija u Millbrook ciklusu

Rezultati između FIGE i VECTO ciklusa se razlikuju za 4 %, a između FIGE i Millbrook ciklusa 5 %. Na slici 53. su prikazane usporedbe masa za različite tehnologije baterija u različitim ciklusima s dometom od 100 km.



Slika 53. Usporedba masa baterija za različite tehnologije i različite cikluse

5. ENERGETSKA UČINKOVITOST

U ovom poglavlju će se razmatrati energetska učinkovitost i emisije CO₂ BEV tegljača s poluprikolicom.

5.1. Emisije CO₂

Kako bi se dobio što realniji uvid u stvarno smanjenje emisija CO₂ BEV tegljača s poluprikolicom u odnosu na tegljače s Dieselovim motorom potrebno je razmatrati emisiju od izvora goriva odnosno njegove proizvodnje (engl. *Well-to-tank*, *WTT*) pa do njegove potrošnje u vozilu (engl. *Tank-to-wheel*, *TTW*).

5.1.1. Diesel tegljači

Za izračun ukupne emisije CO₂ za tegljač s Dieselovim motorom prvo je potrebno izračunati emisiju prilikom izgaranja goriva u motoru, a zatim emisiju od izvora goriva do dolaska u motor. Emisija CO₂ po kilogramu dizelskog goriva je uvijek jednaka i iznosi:

$$E_{\text{CO}_2} = 0,875 \frac{\text{kg}_C}{\text{kg}_G} \cdot 3,667 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_C} = 3,21 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_G} \quad (5.1)$$

Masa dizelskog goriva se računa prema izrazu:

$$m_{\text{G100}} = \rho_G \cdot V_{\text{G100}} \quad (5.2)$$

gdje je:

m_{G100} – masa dizelskog goriva po 100 km [kg_G/100 km]

$\rho_G = 0,84 \frac{\text{kg}_G}{\text{L}}$ – gustoća dizelskog goriva [kg/L]

$V_{\text{G100}} = 34,4 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}}$ – potrošnja dizelskog goriva [L/100 km]

Što iznosi:

$$m_{\text{G100}} = 0,84 \frac{\text{kg}_G}{\text{L}} \cdot 34,4 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}} = 28,9 \frac{\text{kg}_G}{100 \text{ km}} \quad (5.3)$$

Emisija CO₂ po km se dobije pomoću izraza:

$$e_{\text{CO}_2} \left[\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{km}} \right] = m_G \cdot E_{\text{CO}_2} \left[\frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_G} \right] \quad (5.4)$$

Uvrštavanjem izraza 5.2 i 5.3 u 5.4 dobije se:

$$e_{\text{CO}_2} = 927,69 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{km}} \quad (5.5)$$

Potrošnja energije po kilometru iznosi 3,37 kWh/km. Prema sljedećem izrazu dobije se ukupna emisija CO₂ po kWh energije prilikom izgaranja goriva u motoru:

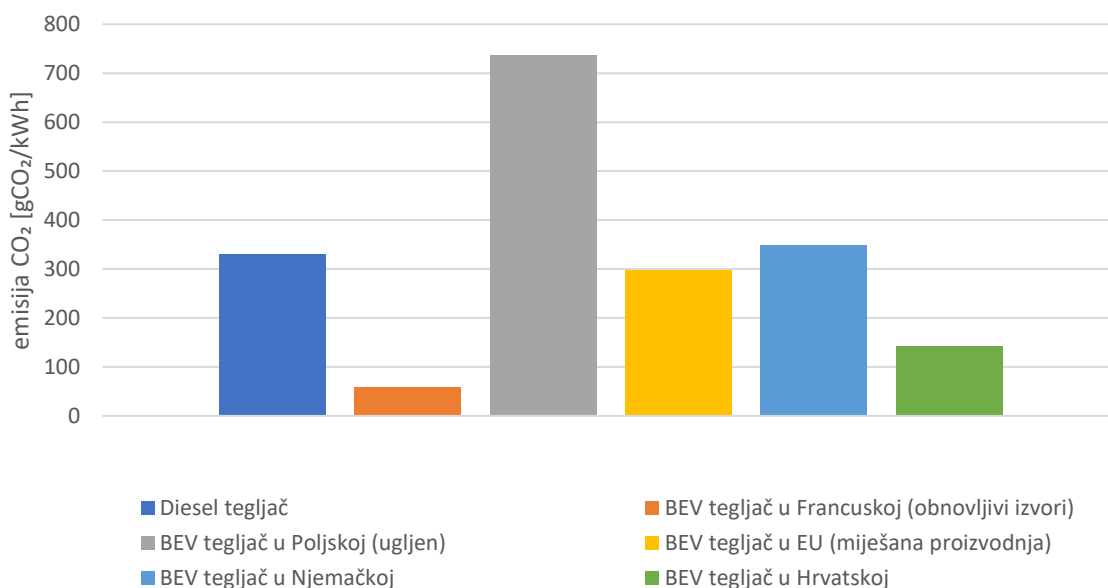
$$e_{\text{CO}_2} = \frac{\text{emisija CO}_2 / \text{km}}{\text{potrošnja energije/km}} = \frac{927,69}{3,37} = 275,3 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{kWh} \quad (5.6)$$

Emisija CO₂ od izvora goriva do njegovog dolaska u motor iznosi 55 g_{CO₂} / kWh .

Ukupna CO₂ emisija od izvora do izgaranja dizelskog goriva iznosi 330,3 g_{CO₂} / kWh .

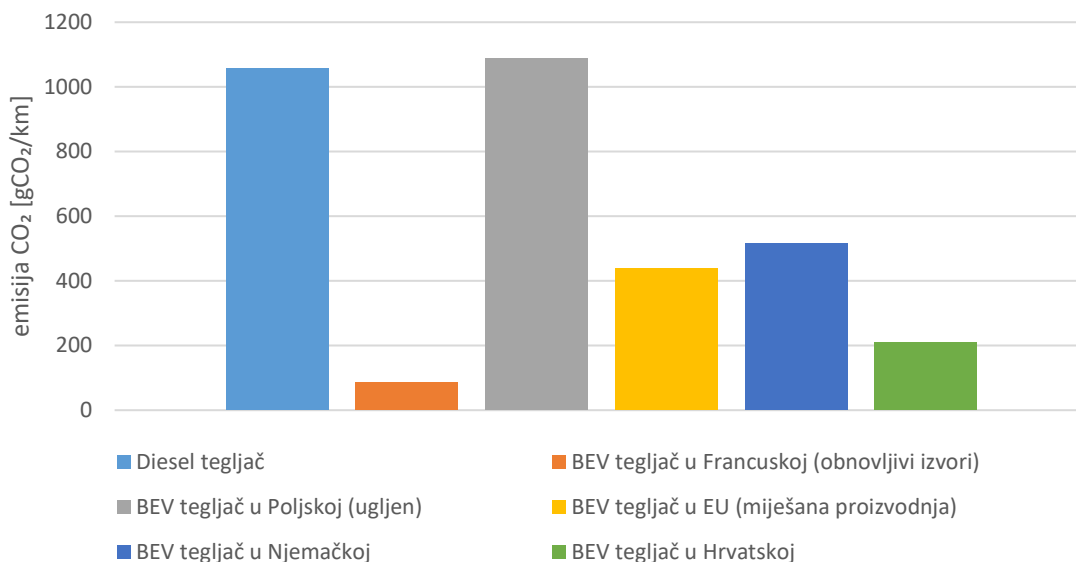
5.1.2. BEV tegljači

Emisija CO₂ kod BEV tegljača postoji jedino prilikom proizvodnje energije. Ukoliko se energija dobiva iz obnovljivih izvora emisija je minimalna, a ukoliko se dobiva iz neobnovljivih izvora kao što je ugljen ona iznosi znatno više. Prosječna emisija CO₂ po proizvedenom kWh energije u EU iznosi oko 296 g_{CO₂}/kWh. S obzirom da se u nekim državama energija dobiva većinom iz ugljena, na primjer Poljska, emisija po proizvedenom kWh energije iznosi 736 g_{CO₂}/kWh. Francuska je primjer države u kojoj se većina energije dobiva iz nuklearne energije te emisija prilikom proizvodnje energije iznosi 58 g_{CO₂}/kWh. U Hrvatskoj prilikom proizvodnje električne energije emitira se 142 g_{CO₂}/kWh, a u Njemačkoj 349 g_{CO₂}/kWh [10]. Na slici 54. prikazana je usporedba emisija CO₂ po potrošnji energije za tegljač s Diesellovim motorom te BEV tegljač s obzirom na mjesto odnosno način proizvodnje energije. Dijagrami kod BEV tegljača s poluprikolicom su napravljeni za potrošnju energije po kilometru za puno opterećenje u VECTO ciklusu gdje je fiksna ukupna masa vozila od 42 t.



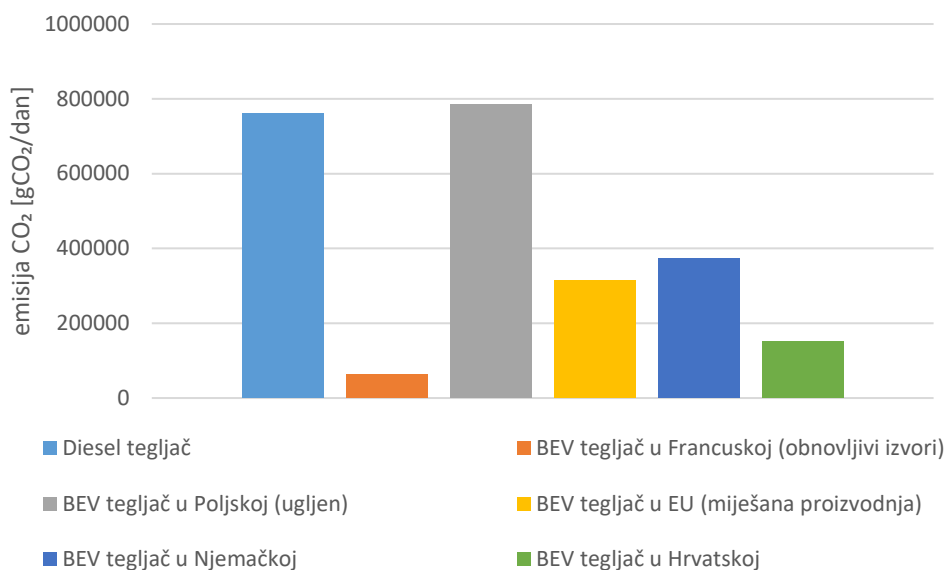
Slika 54. Usporedba emisija CO₂ po kWh energije za Diesel i BEV tegljač

Na slici 55. prikazana je usporedba emisija CO₂ po kilometru za tegljač s Dieslovim motorom te BEV tegljač s obzirom na mjesto odnosno način proizvodnje energije.



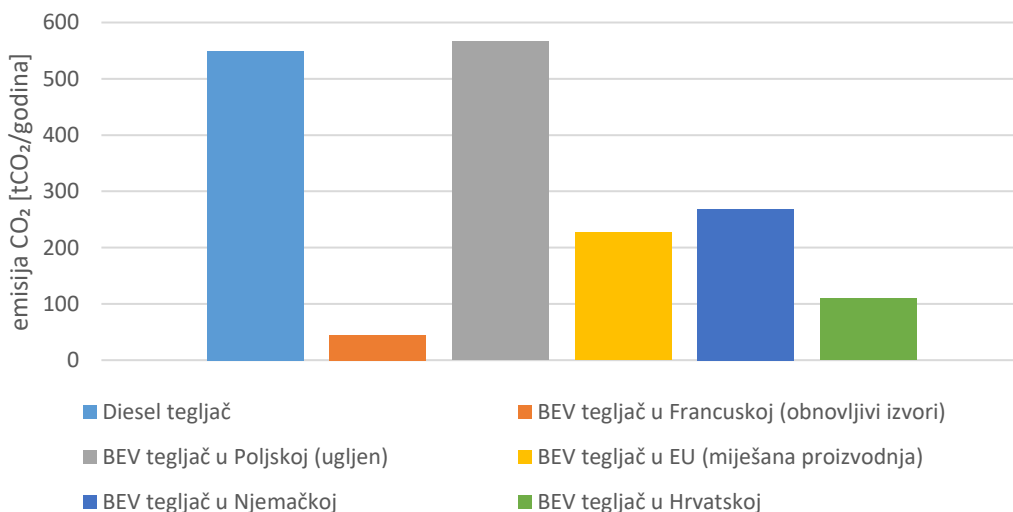
Slika 55. Usporedba emisija CO₂ po odvoženom kilometru za Diesel i BEV tegljač

Na slici 56. prikazana je usporedba emisija CO₂ po odvoženim kilometrima u danu odnosno po dnevnoj kilometraži jednog vozača za tegljač s Dieslovim motorom te BEV tegljač s obzirom na mjesto odnosno način proizvodnje energije.



Slika 56. Usporedba emisija CO₂ po danu za Diesel i BEV tegljač

Na slici 57. prikazana je usporedba emisija CO₂ u tonama po odvoženim kilometrima godišnje odnosno po godišnjoj kilometraži jednog vozača za tegljač s Dieslovim motorom te BEV tegljač s obzirom na mjesto odnosno način proizvodnje energije.



Slika 57. Usporedba emisija CO₂ po godini za Diesel i BEV tegljač na godišnjoj razini

Na temelju slika 54.-57. vidljivo je da ukoliko se električna energija proizvodi iz ugljena odnosno nije iz obnovljivih izvora neće se smanjiti emisija CO₂ uporabom BEV tegljača s poluprikolicom umjesto onih s Dieslovim motorom.

6. UTJECAJ VREMENA I SNAGE PUNJENJA BATERIJE

Zahtjevi za proširenjem mreže punionica i njihovim snagama se povećavaju. BEV tegljači s poluprikolicom, s obzirom na njihove duge rute, zahtijevaju punionice veće snage kako bi se mogle koristiti baterije manjih kapaciteta i masa koje bi se napunile tijekom vozačeve pauze od 45 minuta, a da masa prevezenog tereta ne bi naglo pala.

6.1. Punjenje tijekom pauze od 45 minuta

U voznom ciklusu koji će se promatrati vozač vozi 4,5 h, radi pauzu od 45 minuta zatim opet nastavlja voziti 4,5 h. Tijekom te pauze potrebno je omogućiti punjenje baterije gotovo u potpunosti odnosno dovoljno da vozač može odvoziti još 4,5 h. Kako bi se to postiglo potrebne su punionice snage od preko 350 kW odnosno 700-1000 kW. Trenutačno to nije moguće postići s obzirom da je Europi jakost struje ograničena na 500 A, a napon bi trebao iznositi 2000 V. Razvijen je novi standard u kojem se koristi struja jakosti 1000-3000 A, a napon od 1250 V s čime je moguće postići snagu punjenja i do 4 MW. U Hrvatskoj većina punjača su DC punjači od 50 kW, ali ima i jačih od 175 kW i nekoliko od 350 kW s kojima trenutačno nije moguće napuniti BEV tegljač s poluprikolicom u 45 minuta. S punjačem od 1 MW moguće je napuniti eActros LongHaul s baterijom kapaciteta 600 kWh za 45 minuta.

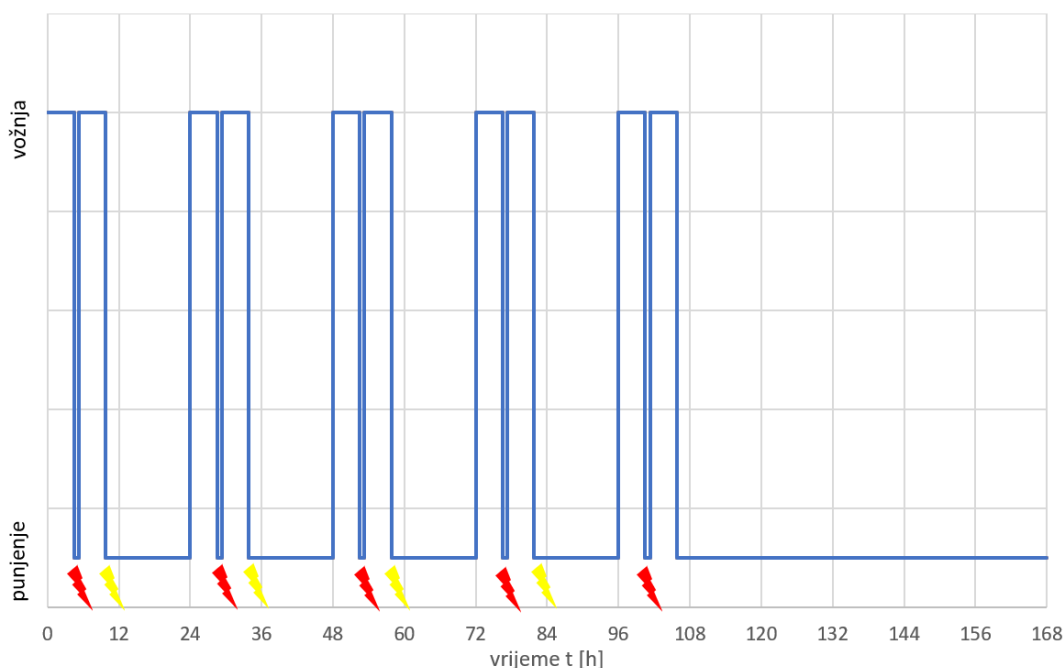


Slika 58. Prototip Siemensova "Megawatt charging" punjača [11]

6.2. Noćno punjenje u skladištu/garaži/odmorištu

Ukoliko jedan vozač vozi jedan BEV tegljač s poluprikolicom nakon odrađene smjene vozača vozilo miruje u skladištu/garaži/odmorištu sve do iduće smjene, a pauza iznosi 11 h. Kako je noćna električna energija jeftinija i manje je opterećenje na mrežu, a vrijeme dostupno za punjenje je veće moguće je koristiti punjače snage 50-100 kW. Ukoliko BEV tegljač s poluprikolicom dnevno voze dva vozača, pauza do ponovne smjene prvog vozača manja je od 11 h odnosno 4 h. U tom slučaju su potrebni punjači nešto manjih snaga od 700 kW.

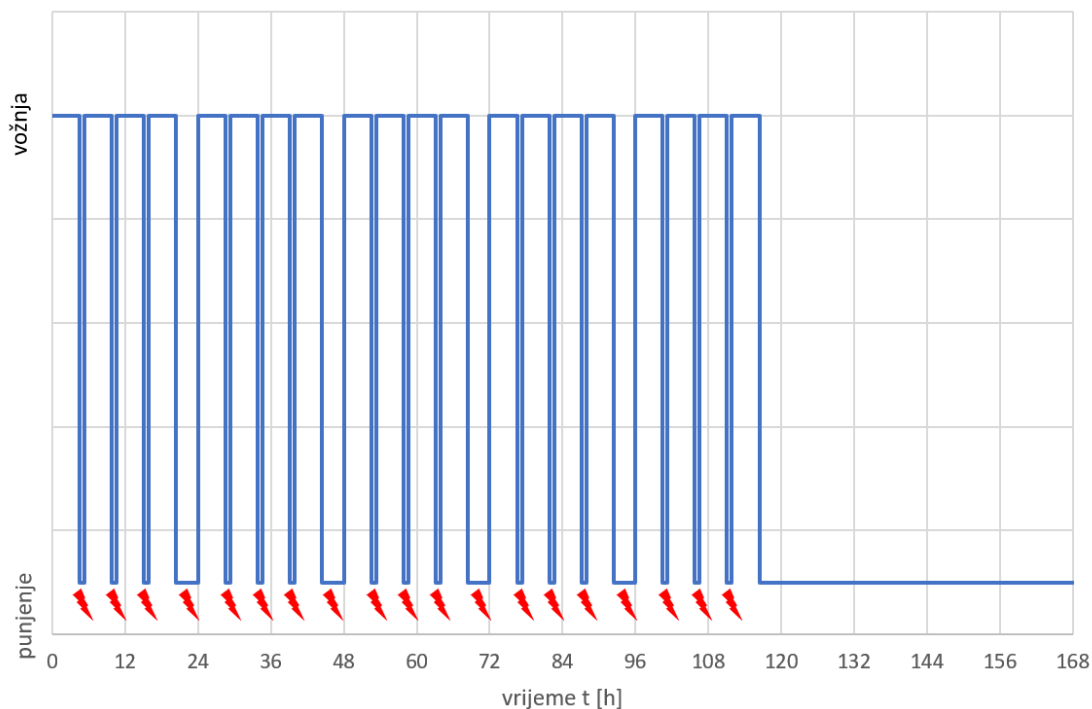
Na slici 59. prikazane su sekvence vožnji i punjenja ukoliko se vozi 5 dana u tjednu. Vozač vozi 4,5 h nakon čega se puni baterija 45 minuta, zatim opet slijedi vožnja od 4,5 h. Nakon toga slijedi punjenje tijekom 11 h pauze do idućeg voznog ciklusa. Ako nisu dostupni brzi punjači, tada se gotovo svih 9 h odnosno 720 km treba izvoziti s početnim kapacitetom baterije koji bi trebao iznositi 1585 kWh, što ima utjecaj na masu korisno prevezenog tereta i potrošnju.



Slika 59. Sekvence vožnji i punjenja u tjednu za jednog vozača

Na slici 60. prikazane su sekvence vožnji i punjenja ukoliko dva vozača voze isti BEV tegljač s poluprikolicom 5 dana u tjednu. Prvi vozač vozi 4,5 h nakon čega se puni baterija 45 minuta, zatim opet slijedi vožnja od 4,5 h. Nakon njegove smjene vozilo se puni 45 minuta te ga preuzima drugi vozač i vozi 4,5 h. Radi pauzu od 45 minuta tijekom koje puni bateriju i nastavlja vožnju još 4,5 h. Nakon toga slijedi punjenje od nekih 4 h odnosno do idućeg voznog

ciklusa prvog vozača. Moguća je i opcija u kojoj punjenje između prvog i drugog vozača traje dva sata prilikom čega bi ostalo oko 2,5 sata za punjenje između smjene drugog i prvog vozača.



Slika 60. Sekvence vožnji i punjenja u tjednu za dva vozača

6.3. Životni vijek baterije s obzirom na broj ciklusa punjenja/pražnjenja

Ukoliko je dostupan brzi punjač moguć je scenarij s dva vozača jednog BEV tegljača s poluprikolicom dnevno gdje svaki vozi 9 sati s pauzom od 45 minuta nakon 4,5 sata. Tijekom jednog radnog dana potrebna su 4 ciklusa punjenja/pražnjenja baterije vozila. Na tjednoj razini ako se vozi 5 dana to iznosi 20 ciklusa, a na godišnjoj razini gdje se vozi 52 tjedna po 5 dana to iznosi 1040 ciklusa punjenja/pražnjenja. Ukoliko se uspoređi s tablicom 14. moguće je dobiti koliki je životni vijek baterije s obzirom na vrstu tehnologije baterije i broj punjenja/pražnjenja dnevno odnosno dobije se vijek pri kojem baterija ima 80 % kapaciteta.

Tablica 15. Životni vijek baterije s obzirom na vrstu tehnologije

NMC baterija (2250 ciklusa)	2,16 godina
NCA baterija (1250 ciklusa)	1,2 godine
LFP baterija (2750 ciklusa)	2,64 godine

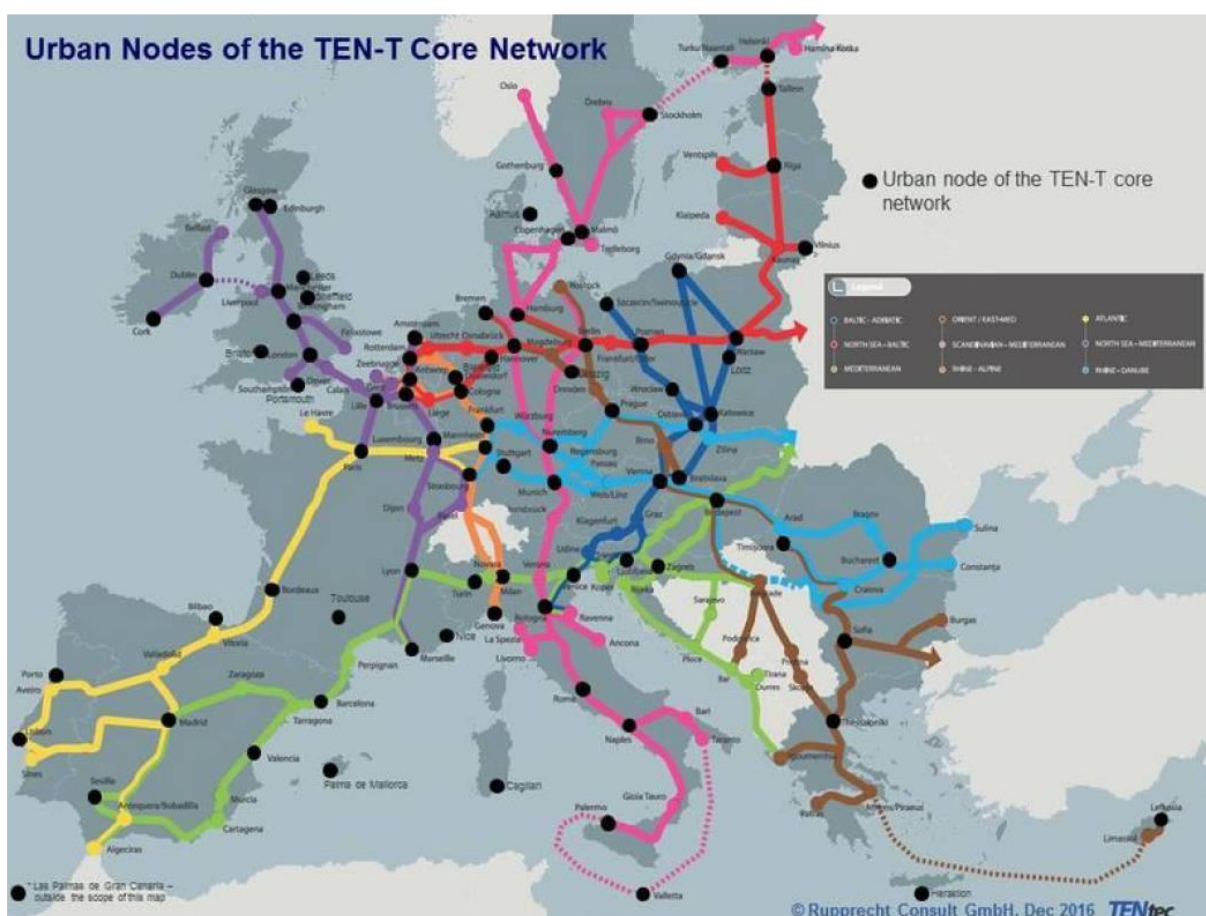
U tablici 16. su prikazana vremena punjenja ukoliko se puni 80 % kapaciteta pojedinih baterija s raznim snagama punjača. Na temelju ove tablice i slika 59. i 60. može se zaključiti da se baterija može napuniti u pauzi od 45 min isključivo ako se koristi brzi punjač odnosno punjač snage od 1 MW. Ako vozilo vozi jedan vozač, tijekom pauze od 11 h moguće je napuniti bateriju s punjačem snage od 100 kW, ali ukoliko vozilo voze dva vozača tijekom pauze između smjene drugog vozača i prvog vozača u novom danu moguće je puniti bateriju sa snagom od 350 kW ili većom. Žutom bojom su označene snage punjača s kojima se mogu napuniti baterije tijekom pauza koje imaju žutu strelicu na slikama 59. i 60., a crvenom bojom su označeni oni punjači koji mogu puniti pauze označene crvenim strelicama.

Tablica 16. Vremena punjenja 80 % kapaciteta za pojedine snage punjača

Snaga punjača \ Kapacitet baterije	336 kWh	448 kWh	672 kWh
100 kW	2 h i 42 min	3 h i 36 min	5 h i 23 min
350kW	48 min	1 h i 2 min	1 h i 33 min
1 MW	16,2 min	21,6 min	34 min

7. BRZINA TRANSPORTA

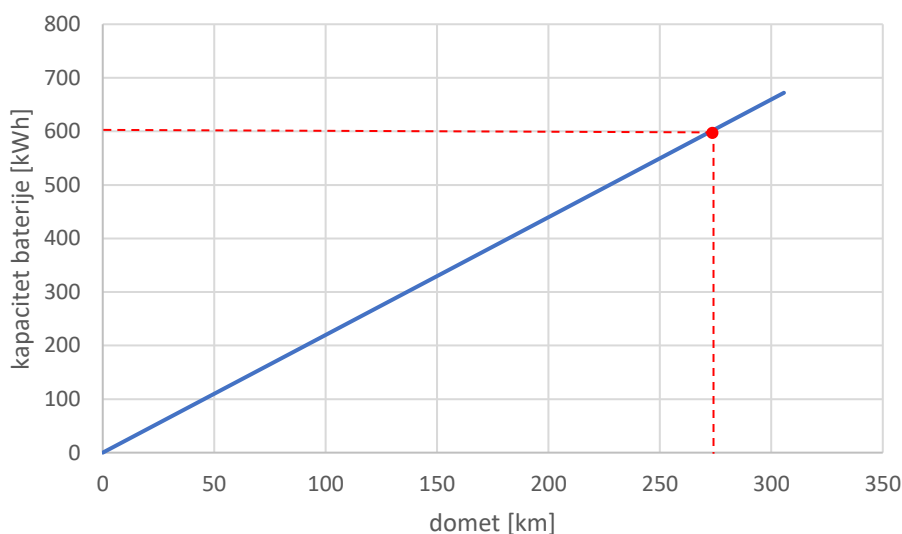
U ovom poglavlju razraditi će se dva moguća scenarija vožnje kako bi se analizirala brzina transporta BEV tegljača s poluprikolicom. U jednom scenariju nije dostupna uporaba brzog punjača, a u drugom se koriste brzi punjači. Kod uporabe tegljača s Dieselovim motorom s prosječnom brzinom od 80 km/h moguće je u 9 h odvoziti 720 km. Za BEV tegljač s poluprikolicom to nije tako jednostavno za razmotriti s obzirom da domet ovisi o kapacitetu baterije, snazi punjača odnosno brzini punjenja te vremenu dostupnom za punjenje.



Slika 61. Primjeri glavnih čvorišta u Europi [12]

I. SCENARIJ: NEDOSTUPAN BRZI PUNJAČ

Na temelju slike 62. za VECTO ciklus može se vidjeti koliki je moguć domet bez nadopunjavanja odnosno bez brzog punjenja s obzirom da je bateriju moguće samo djelomično napuniti, te je li uopće moguće preći jednaku kilometražu tijekom 9 h vožnje kao tegljač s Dieselovim motorom.



Slika 62. Trenutačni kapaciteti baterija u ovisnosti o dometu za scenarij bez i sa brzim punjačem

S baterijom kapaciteta 600 kWh koju će imati eActros LongHaul, moguće je postići domet od oko 275 km bez nadopunjavanja što znači da neće moći odvoziti 4,5 h tijekom kojih bi trebao prijeći 360 km ukoliko vozi brzinom od 80 km/h, zbog čega je već u zaostatku za tegljačem s Dieslovim motorom koji u istom vremenu može odvoziti 360 km. Ukoliko nema brzog punjača od 1 MW, za punjenje baterije s punjačem 50-100 kW potrebno je 6-12 sati što nije moguće jer pauza traje samo 45 minuta. S obzirom da se baterija ne bi napunila do kraja, u slijedećih 4,5 h vožnje ne bi bilo moguće odvoziti ni 275 km nego puno manje. Na temelju toga je vidljivo da ukoliko se ne koriste brzi punjači BEV tegljač s poluprikolicom kapaciteta baterije 600 kWh neće moći odvoziti jednak broj sati kao tegljač s Dieslovim motorom. Moguće bi bilo ako će se ići na veći kapacitet baterije od 600 kWh, ali s time bi se smanjila masa prevezenog tereta. U ovom slučaju bi bilo dobro koristiti princip "brze poštanske kočije" s obzirom da bi maksimalna udaljenost čvorišta za kapacitet baterije 600 kWh mogla biti 275 km. Kako bi se teret što dalje dostavio na tim čvorovima bi se mijenjale poluprikolice. Jedan BEV tegljač s poluprikolicom bi u čvoru zamijenio poluprikolicu s drugim tegljačem nakon čega bi se svaki vratio u početni čvor. Tegljači bi u svojim početnim čvorovima ponovo zamijenili poluprikolice s trećim i četvrtim tegljačima koji bi opet vozili nazad u svoja početna čvorišta i tako dalje. S ovakvim pristupom bi se teret mogao prevesti na puno veće udaljenosti nego što bi to postigao s jednim tegljačem.

II. SCENARIJ: DOSUPAN BRZI PUNJAČ

Ukoliko se koristi brzi punjač prilikom punjenja način vožnje bio bi puno jednostavniji. Kako bi se moglo usporediti sa scenarijem bez brzog punjača koristiti će se isti podaci prema slici 62. odnosno kapacitet baterije od 600 kWh i domet od 275 km. Razmatrati će se opcije s jednim ili više vozača kako bi se maksimalno iskoristio tegljač u danu.

a) 1 vozač

Ako se razmatra slučaj u kojem jedan vozač vozi jedan BEV tegljač s poluprikolicom on će provesti u vožnji 9 sati odnosno nešto manje od 10 sati s uračunatom pauzom od 45 minuta. Do iduće smjene vozač mora odmarati 11 sati. Iskoristivost vozila je 42 % u odnosu na broj sati u danu. Ista stvar je i kod tegljača s Diesellovim motorom samo što u 9 sati vožnje on može prijeći svih 720 km dok BEV tegljač može samo 550 km.

b) 2 vozača

Za slučaj u kojem jedan tegljač voze dva vozača on će provesti uz vožnji 18 h odnosno s pauzama će to iznositi 20 h i 15 minuta nakon čega će imati 3 h i 45 minuta za punjenje do nove smjene prvog vozača. U ovom slučaju iskoristivost vozila je 81 % u odnosu na broj sati u danu. Za tegljač s Diesellovim motorom nije potrebno imati punjenje od 45 minuta između smjena dva vozača nego je odmah moguće voziti. I ovdje će tegljač s Diesellovim motorom biti u prednosti u odnosu na BEV tegljač jer će moći odvoziti veći broj kilometara.

c) 3 vozača

Slučaj u kojem tegljač voze tri vozača nije moguć za BEV tegljač jer ako se između svakog vozača baterija puni 45 minuta, treći vozač moći će odvoziti samo 3 h u tom danu što nema smisla. Kod tegljača s Diesellovim motorom to ima puno više smisla s obzirom da nema gubitaka vremena tijekom punjenja nego odmah može voziti. U jednom danu uspjelo bi se odvoziti 22,5 sata prilikom čega bi se prešao put od 1800 km. Iskoristivost tog vozila u odnosu na broj sati u danu iznosi 100 %.

Na temelju toga moguće je zaključiti da ukoliko se ne poveća kapacitet baterije tegljač s Diesellovim motorom će uvijek biti u prednosti nad BEV tegljačem s obzirom na domet koji može prijeći tijekom 9 h vožnje vozača. Kako bi BEV tegljač odvezio 360 km bez punjenja potreban mu je kapacitet baterije od 790 kWh koji bi se mogao napuniti za 80 % u pauzi od 45 minuta, te bi on mogao konkurirati tegljaču s Diesellovim motorom.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je odrediti optimalni kapacitet baterije BEV tegljača s poluprikolicom kako bi se reducirale emisije CO₂. U sklopu rada analizirani su propisi rada i odmora vozača te su prikazani razni primjeri raspodjele prekida vožnje s obzirom na udaljenosti čvorova. Nakon toga je određena maksimalna masa tereta koja je ograničena dopuštenim osovinskom opterećenjem i najvećom ukupnom masom od 42 t koju vozilo može imati. Na temelju toga je određeno da ona može iznositi 22,5 t s time da je moguće povećati kapacitet baterije na 1200 kWh kako se i dalje ne bi narušilo osovinsko opterećenje. U radu su razmatrana tri ciklusa vožnje, FIGE, VECTO i Millbrook na temelju kojih su dobivene potrošnje energije iz čega je zaključeno da je najrealniji ciklus VECTO s obzirom da su u njemu razmotreni i usponi. Nakon toga su analizirani utjecaji različitih tehnologija Li-ion baterije kao što su NMC, NCA i LFP. Na temelju analize energetske učinkovitosti vidljivo je da na emisiju CO₂ uvelike ima utjecaj način proizvodnje električne energije odnosno proizvodi li se ona iz obnovljivih izvora ili ne. Ako se koristi iz obnovljivih izvora BEV tegljač ima veliku prednost odnosno puno manju emisiju CO₂ u odnosu na tegljač s Dieslovim motorom, ali ako se električna energija proizvodi iz ugljena to više nije slučaj. Unutar analize brzine transporta zaključeno je da ukoliko se koriste baterije kapaciteta 600 kWh nije moguće odvoziti jednak broj kilometara kao što može tegljač s Dieslovim motorom. A s dostupnim brzim punjačem od 1 MW bio bi dostatan kapacitet baterije od 790 kWh da bi se mogla voziti dva ciklusa po 4,5 h s punjenjem od 45 min u pauzi.

LITERATURA

- [1] <https://trans.info/en/electric-trucks-in-europe-to-keep-an-eye-on-in-2021-244840>, 20.10.2022.
- [2] <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/scr/1663236463000/52033036v-1tv3m3/52033036.jpg> , 20.10.2022.
- [3] <https://www.hgk.hr/documents/info-o-radnom-vremenu-i-vremenu-odmora-vozaca-krapina57b6ef76cf485.pdf> , 20.10.2022.
- [4] Basma H., Beys Y., Rodriguez F., Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis, ICCT, 2021.
- [5] Šagi G., Ilinčić P., Lulić Z., KNVIPV – izborni: Provjera osovinskog opterećenja vozila, Zagreb, 2021./2022.
- [6] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0053&from=FR> , 01.11.2022.
- [7] <https://dieselnet.com/standards/cycles/etc.php> , 10.01.2023.
- [8] Barlow T. J., Latham S., McCrae I. S., Boulter P. G., A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, TRL, 2009.
- [9] https://theicct.org/sites/default/files/Fontaras%20ICCT_presentation.pdf, 10.01.2023.
- [10] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921012149>, 15.02.2023.
- [11] [Snaga punjenja od 1 do 3,75 MW \(zemobility.hr\)](#), 23.01.2023.
- [12] Simon S., Mathieu L., Unlocking electric trucking in the EU: recharging along highways, Transport & Environment, 2021.