

Procjena isplativosti hibridizacije pogona šumskog zglobnog traktora

Karlušić, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:499759>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Juraj Karlušić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.
Doc. dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing.

Student:

Juraj Karlušić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svim djelatnicima fakulteta na prenesenom znanju i ugodnoj atmosferi tijekom ovog studija. Posebno bih se zahvalio mentorima prof. dr. sc. Željku Šitumu i doc. dr. sc. Mihaelu Cipeku na stručnim savjetima, velikom trudu, pomoći i lijepoj suradnji tijekom pisanja ovog rada. Zahvalio bih se i prof. Marijanu Šušnjaru sa Šumarskog fakulteta čiji je projekt Razvoj hibridnog skidera – HiSkid (KK.01.1.1.04.0010) bio motivacija za ovaj rad. Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima koji su mi uljepšali i upotpunili ovo životno razdoblje.

Juraj Karlušić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JURAJ KARLUŠIĆ** Mat. br.: 0035199094

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena isplativosti hibridizacije pogona šumskog zglobnog traktora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Benefit assessment of skidder powertrain hybridization**

Opis zadatka:

Sve su veći zahtjevi u smislu smanjenja troškova rada gospodarskih izvan cestovnih vozila zajedno s regulatornim pritiscima za niže emisije ispušnih plinova i buke, što dovodi u pitanje budućnost konvencionalnih rješenja kod kojih se koristi motor s unutarnjim izgaranjem kao jedini pogonski izvor snage. S obzirom na to kako tijekom posljednja dva desetljeća raste trend uvođenja hibridnih pogona kod cestovnih vozila radi smanjenja potrošnje goriva i emisija stakleničkih plinova uz zadržavanje autonomije u pogledu dometa, očekivano je uvođenje hibridnih pogona za gospodarska izvan cestovna vozila. Imajući to u vidu, ovaj zadatak predlaže analizu isplativosti zamišljene konverzije postojećeg rješenja konvencionalnog pogona šumskog zglobnog traktora (tzv. skidera) u njegovu hibridnu inačicu podjednkih voznih karakteristika.

U radu je potrebno:

- izraditi kvazi-statički simulacijski model konvencionalnog skidera prema inačici koju je trenutno moguće naći na tržištu,
- preinačiti model konvencionalnog skidera u hibridni dodavanjem akumulacijskog sustava za pohranu energije paralelno s odgovarajućom strategijom upravljanja te odgovarajuće dimenzionirati komponente kako bi se ostvarile usporedive sile vuče i snage,
- napraviti usporednu analizu glavnih karakteristika pojedine inačice pogona za scenarij vožnje koja uključuje realistične nagibe terena,
- prema dobivenim rezultatima komentirati moguće prednosti predložene hibridizacije pogona u pogledu smanjenja potrošnje goriva i pripadajućih emisija CO₂, uz istovremeno razmatranje troškova hibridizacije,
- izvesti zaključak.

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

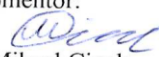
Zadatak zadan:
16. siječnja 2020.

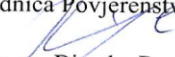
Rok predaje rada:
19. ožujka 2020.

Predvideni datum obrane:
23. ožujka do 27. ožujka 2020.

Zadatak zadao:

 prof. dr. sc. Željko Šitum

Komentor:

 dr. sc. Mihael Cipek

Predsjednica Povjerenstva:

 prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	2
POPIS TABLICA	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK	7
SUMMARY	8
1. UVOD	9
2. MODEL KONVENCIONALNOG VOZILA	11
2.1. Opis skidera EcoTrac 120V	11
2.2. Pogonski sklop skidera.....	13
2.2.1. Dizelski motor	14
2.2.2. Mjenjač i razvodnik pogona	17
2.2.3. Vitlo	19
3. OPTEREĆENJA I VOZNE RUTE.....	22
3.1. Opterećenja.....	22
3.2. Vozni ciklusi.....	25
4. SIMULACIJSKI MODEL KONVENCIONALNOG SKIDERA.....	29
4.1. Model vozača.....	30
4.2. Odabir referentne brzine vozila	31
4.3. Odabir stupnja prijenosa	34
5. ANALIZA RADA KONVENCIONALNOG SKIDERA.....	36
5.1. Rezultati pojedine vožnje	36
5.2. Prvi radni dan	39
5.3. Drugi radni dan.....	43
6. ODABIR STRUKTURE HIBRIDNOG POGONA.....	46
6.1. Odabir elektromotora.....	47
6.2. Odabir baterije	49
6.3. Upravljanje hibridnim pogonom	51
6.3.1. Punjenje baterije	52
6.3.2. Dodatni moment od elektromotora	53
6.3.3. Regenerativno kočenje	54
7. ANALIZA RADA HIBRIDNOG SKIDERA	55
7.1. Rezultati pojedine vožnje	55
7.2. Rezultati hibridnog vozila za prvi radni dan	56
7.3. Rezultati hibridnog vozila za drugi radni dan	58
8. ANALIZA TROŠKOVA	61
9. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.	Emisija stakleničkih plinova za industrijska vozila [2].....	9
Slika 2.	PONSEE Ergo [3]	10
Slika 3.	Logset 12H GTE [4].....	10
Slika 4.	Šumski traktor EcoTrac 120V [7]	11
Slika 5.	Bočne dimenzije skidera [8]	12
Slika 6.	Prednje dimenzije i zakret prednjeg mosta [8]	13
Slika 7.	Shema pogonskog sklopa skidera	13
Slika 8.	Krivulje momenta i snage motora [9].....	14
Slika 9.	Momentne karakteristike za različite položaje papučice gasa	15
Slika 10.	Mapa ovisnosti momenta motora o brzini vrtnje i papučici gasa	15
Slika 11.	Mapa specifične potrošnje goriva	16
Slika 12.	Mapa potrošnje goriva	17
Slika 13.	Pogonski moment na kotaču u ovisnosti o brzini vozila	18
Slika 14.	Povezivanje trupaca sa sajlama [14]	19
Slika 15.	Mjesto na kojem vozilo sa teretom proklizuje [15]	20
Slika 16.	Privlačenje tereta vitlom [15].....	20
Slika 17.	Shematski prikaz vitla i tereta na kosini	21
Slika 18.	Sile koje djeluju na vozilo u vožnji niz kosinu (gornji prikaz) i uz kosinu (donji prikaz) [16]	22
Slika 19.	Opterećenja za razne mase tereta u ovisnosti o nagibu terena.....	23
Slika 20.	Opterećenje praznog vozila za razne faktore kotrljanja	24
Slika 21.	Vozne rute za prvi radni dan.....	25
Slika 22.	Nadmorska visina i nagib terena rute broj dva (a) i tri (b)	26
Slika 23.	Vozne rute za drugi radni dan.....	27
Slika 24.	Nadmorska visina i nagib terena rute broj šest (a), pet (b) i četiri (c).....	28
Slika 25.	Shema konvencionalnog modela vozila	29
Slika 26.	P regulator (vozač)	30
Slika 27.	Određivanje stupnja prijenosa.....	31
Slika 28.	Ovisnost stupnja prijenosa o masi tereta i nagibu terena	32
Slika 29.	Referentna brzina	33
Slika 30.	Referentna brzina nakon uporabe filtra	34
Slika 31.	Mijenjanje brzina	35
Slika 32.	Rezultati vožnje po stazi dva	37
Slika 33.	Rezultati vožnje po stazi tri	38
Slika 34.	P2 hibridna struktura	46
Slika 35.	Momentna karakteristika (a) i krivulja snage (b) AF130 elektromotora [22]	48
Slika 36.	Ekvivalentni strujni krug (a), naponska karakteristika (b) i otpor baterije (c)	49
Slika 37.	Shema strategije hibridnog upravljanja	51
Slika 38.	Logika za punjenje	52
Slika 39.	Logika za uključivanje elektromotora.....	53
Slika 40.	Logika za regenerativno kočenje	54
Slika 41.	Rezultati hibridnog vozila.....	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Gabaritne dimenzije i masa skidera [6]	12
Tablica 2. Prijenosni omjeri i maksimalne brzine [9].....	17
Tablica 3. Vrijednosti referentne brzine	33
Tablica 4. Parametri rute 2.....	36
Tablica 5. Parametri rute 3.....	38
Tablica 6. Pregled vožnji za prvi radni dan	39
Tablica 7. Operacija vitlom za prvi radni dan.....	40
Tablica 8. Rezultati za prvi radni dan.....	42
Tablica 9. Vožnje za drugi radni dan.....	43
Tablica 10. Operacije vitlom za drugi radni dan.....	44
Tablica 11. Rezultati za drugi radni dan.....	45
Tablica 12. Ukupni podaci za oba radna dana	45
Tablica 13. Režimi rada hibridnog pogona.....	47
Tablica 14. Karakteristike elektromotora AF130 [22]	48
Tablica 15. Vožnje prvog radnog dana hibridnog vozila	56
Tablica 16. Stanje baterije pri radu vitla za prvi radni dan.....	57
Tablica 17. Rezultati za prvi radni dan hibridnog vozila.....	58
Tablica 18. Stanje baterije pri radu vitla za drugi radni dan.....	58
Tablica 19. Vožnje drugog radnog dana hibridnog vozila.....	59
Tablica 20. Rezultati za drugi radni dan hibridnog vozila.....	60
Tablica 21. Usporedba troškova rada skidera	61
Tablica 22. Troškovi komponenti	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m/s^2	Ubrzanje vozila
d	$^{\circ}$	Geografska dužina
f		Faktor kotrljanja
F_b	N	Sila kočenja
F_o	N	Opterećenje vozila
F_{tr}	N	Sila trenja
F_{uk}	N	Ukupna sila koja djeluje na vozilo
F_v	N	Sila vitla
G	N	Težina skidera
g_b	g/kWh	Specifična potrošnja goriva
g_{ciklus}	l	Ukupno potrošeno gorivo za jedan ciklus
$g_{\check{c}}$	l	Potrošeno gorivo za vrijeme čekanja
g_{dod}	l	Dodatno potrošeno gorivo zbog proklizavanja
g_h	l	Ukupna potrošnja hibridnog vozila
g_l	l	Potrošeno gorivo u litrama
g_t	kg	Masa potrošenog goriva
g_v	l	Gorivo potrošeno tijekom rada vitla
$g_{vožnje}$	l	Gorivo potrošeno tijekom vožnje
i_{bat}	A	Struja baterije
i_{uk}		Ukupni prijenosni omjer mjenjača i diferencijala
i_v		Ukupni prijenosni omjer vitla
k		Raspored težine trupaca
K_V		Pojačanje P regulatora
l	km	Pređeni put
l_s	km	Duljina staze
l_t	m	Udaljenost između dvije točke
l_v	m	Duljina privitlavanja
m_{bat}	kg	Masa baterije
M_{em}	Nm	Moment elektromotora
m_{em}	kg	Masa elektromotora
M_k	Nm	Moment dizelskog motora na kotaču
M_m	Nm	Moment dizelskog motora
M_o	Nm	Moment opterećenja
m_t	t	Masa tereta
m_v	kg	Masa skidera
M_v	Nm	Moment vitla
n	min	Opis oznake

N		Broj ćelija u bateriji
O_k	m	Opseg kotača skidera
P_{bat}	kW	Snaga baterije
P_{em}	kW	Snaga elektromotora
P_m	kW	Snaga dizelskog motora
P_v	kW	Snaga vitla
Q	N	Težina trupaca
Q_{maks}	Ah	Kapacitet baterije
r_b	m	Radius bubnja vitla
R_{bat}	Ω	Otpor baterije
r_k	m	Polumjer kotača skidera
s	$^\circ$	Geografska širina
SoC	%	Stanje napunjenost baterije
T_{ciklus}	s	Vrijeme trajanja jednog ciklusa vožnje
$t_{\check{c}}$	s	Vrijeme čekanja u praznom hodu
t_{dod}	s	Dodatno vrijeme zbog proklizavanja vozila
U_{bat}	V	Ukupni napon baterije
U_o	V	Napon otvorenog strujnog kruga
v	km/h	Brzina skidera
v_{ref}	km/h	Referentna brzina
v_v	m/s	Brzina privitlavanja
α	$^\circ$	Nagib terena
η_v		Korisnost vitla
μ_p		Faktor privlačenja
ρ_d	kg/m ³	Gustoća dizelskog goriva

SAŽETAK

Tema ovog rada je procjena isplativosti uvođenja hibridnog pogona na postojeći traktor predviđen za izvlačenja trupaca, takozvani „skider“. Na početku su prikazana neka od postojećih izvedbi hibridnih vozila namijenjena za rad s trupcima u šumskim područjima. Zatim je predstavljen postojeći šumski zglobni traktor (eng. Skidder) EcoTrac 120V sa svojim osnovnim značajkama prema kojima je izrađen jednostavni kvazistatički modela za procjenu potrošnje goriva. Uz dostupnu literaturu te internet, definirano je nekoliko specifičnih ruta koje su raspoređene po radnim danima. Provedena je simulacija modela vozila te su rezultati prikazani u tablicama na kraju poglavlja. Na temelju rezultata konvencionalnog pogona i predloženih zahtjeva za načine vožnje odabrana je hibridna konfiguracija i dimenzije hibridnih komponenti. Na kraju je provedena usporedna analiza potrošnje goriva i troškova uvođenja hibridnog pogona i izveden zaključak.

Ključne riječi: skider, P2 hibrid, EcoTrac 120V, električni hibrid, potrošnja goriva, isplativost hibridizacije

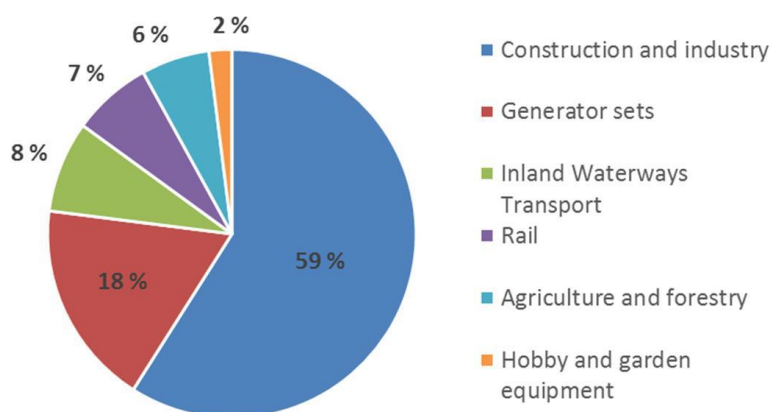
SUMMARY

The subject of this work is the investigation of hybridization benefits of the existing tractor used for log extraction, commonly known as the “skidder”. Some of the existing hybrid vehicles used for log manipulating in forest areas are described in the initial overview. EcoTrac 120V is presented with its basic features according to which simple quasi-static model for fuel consumption estimation is derived. Based on the available literature and Internet, few specific driving routes divided by work days are defined. Simulation of conventional vehicle is carried out and results are shown in tables at the end of the chapter. According to results obtained for the conventional vehicle and proposed work modes, hybrid configuration and its components dimensions are chosen. Comparative analysis of fuel consumption and hybridization price and conclusion are shown in the end.

Key words: skidder, P2 hybrid, EcoTrac 120V, electric hybrid, fuel consumption, hybridization profitability

1. UVOD

Ubrzano globalno zagrijavanje potiče znanost i industriju na istraživanja i promjene tehnologije u cilju smanjenja emisije stakleničkih plinova i zagađenja okoliša. Javnost je već dobro upoznata s elektrifikacijom i hibridizacijom osobnih automobila, ali isto vrijedi i za ne-cestovna vozila. Ona obuhvaćaju sva vozila čija primarna namjena nije osobni prijevoz, od traktorskih kosilica pa sve do velikih rovokopača. Zajedničko obilježje im je da su sva namijenjena za intenzivnu i većinom profesionalnu upotrebu u specifičnim uvjetima. Iako osobnih automobila ima puno više, oni se u prosjeku koriste tek koji sat dnevno, dok se industrijska vozila često koriste i po više sati, a neka mogu biti i u 24-satnim smjenama. Industrijska vozila su dizajnirana za određenu svrhu prilikom koje je vođena briga o maksimizaciji performansi i efikasnosti, odnosno profita, a zbog njihovog dugog te često zahtjevnog rada utjecaj na ukupnu svjetsku potrošnju goriva i emisije štetnih plinova je značajan. Ona mogu biti podijeljena prema njihovoj primarnoj namjeni: transport, manipulacija teretom i kontinuirani zadaci koji zahtijevaju veliku snagu [1]. Na slici 1. se može vidjeti udio emisije stakleničkih plinova za različite skupine industrijskih vozila.



Slika 1. Emisija stakleničkih plinova za industrijska vozila [2]

Inače traktori i poljoprivredni strojevi također spadaju pod ne-cestovna industrijska vozila, a kako je vidljivo iz slike 1. vozila namijenjena za rad u poljoprivredi i šumarstvu čine 6% ukupne emisije štetnih plinova kod industrijskih vozila.

Kako se u posljednje vrijeme u svrhu smanjenja emisija na tržištu pojavljuje sve više hibridnih vozila u električnoj i hidrauličkoj izvedbi koja su namijenjena radu u šumarstvu i poljoprivredi, procjena isplativosti hibridizacije šumskog zglobnog traktora za izvlačenje trupaca, takozvanog „skidera“ bit će prikazana kroz ovaj rad.

U nastavku su dani neki primjeri hibridnih šumskih vozila. Na slici 2. je prikazan „cut to length“ šumski traktor koji služi za rušenje i rezanje stabala. Zbog kratkotrajnih opterećenja koja traju tek nekoliko sekundi navedeno vozilo je izvedeno kao hidraulički hibrid.



Slika 2. PONSSE Ergo [3]

Primjer električnog hibridnog „harvestera“ vidljiv je na slici 3. Kao pohrana električne energije koriste se superkondenzatori koji mogu dati veliku snagu u kratkom vremenu.



Slika 3. Logset 12H GTE [4]

Hibridizacija omogućuje tri glavne prednosti: smanjena potrošnja goriva, povećane performanse i smanjenje emisije štetnih plinova i čestica [5], a dobro poznavanje režima rada i namjene industrijskog vozila je ključno prilikom dizajniranja i odabira hibridnog sustava. Također osim navedenih prednosti, nužno je da hibridni sustav ne zahtjeva prevelike i skupe proizvodne preinake već jednostavnu nadogradnju na postojeći pogon, što je u ovome radu uzeto u obzir prilikom njenog odabira.

2. MODEL KONVENCIONALNOG VOZILA

U ovom poglavlju je dan opis postojećeg skidera te njegove osnovne karakteristike.

2.1. Opis skidera EcoTrac 120V

Skider EcoTrac 120V je šumski zglobni traktor koji služi za privlačenje porušenih stabala te njihov prijevoz od mjesta eksploatacije do krajnjeg odredišta po nepovoljnom terenu koji u većini slučajeva čine šume na brdovitim područjima. Proizvod je Bjelovarske tvrtke „Hittner“ specijalizirane za proizvodnju raznih vrsta traktora, priključaka i svih vrsta rezervnih dijelova za njih. Skider je opremljen dvobubanjnim vitlom koje mu služi za privlačenje trupaca, prednjom odrivnom i stražnjom sidreno-zaštitnom daskom za probijanje kroz prepreke na putu, kao zaštita od udaraca trupaca prilikom prevoženja te mu svojim ukopavanjem pružaju dodatnu stabilnost [6]. Na slici 4 je prikazan EcoTrac 120V skider te su na njoj vidljive prednje i stražnje daske i vitlo.



Slika 4. Šumski traktor EcoTrac 120V [7]

Skider je opremljen s pogonom na sve kotače koji je neizbježan kod vozila ovakve primjene. Snaga motora se prenosi preko mjenjačke kutije i razvodnika pogona preko kardanskih vratila na prednje i stražnje kotače vozila. Mostovi su opremljeni hidrauličkim kočnicama i blokadama diferencijala. Upravljanje vozilom se odvija preko zgloba oko kojega se šasija lomi, odnosno zakreće oko Z osi vozila. Zglob se nalazi na sredini međuosovinskog razmaka kako bi prednji i stražnji kotači prilikom skretanja prelazili isti put te ne bi dolazilo do dodatnog proklizavanja. Za ostvarivanje dovoljno velike sile koja omogućuje zakret koristi se hidraulički sustav s

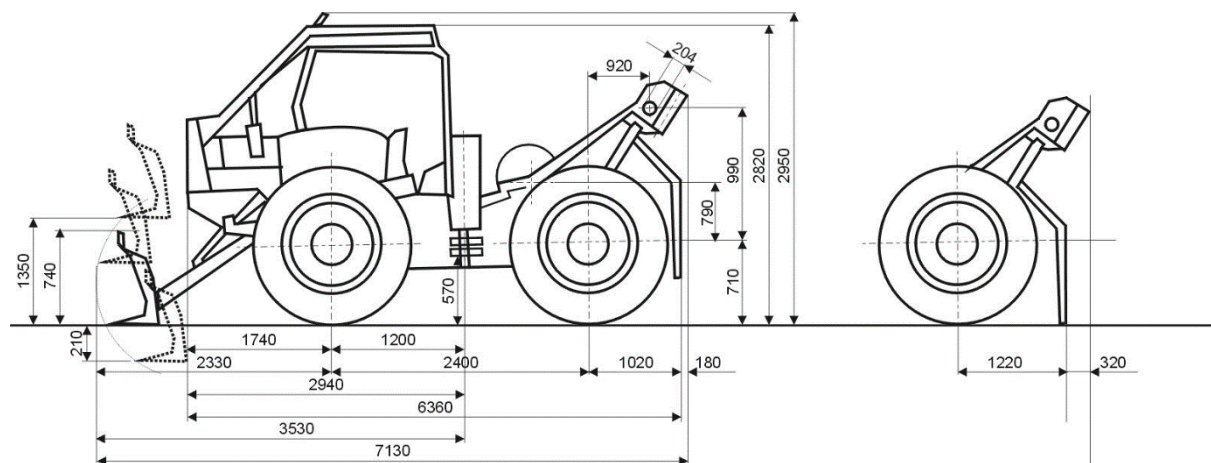
cilindrima. Stražnji most je kruto pričvršćen na šasiju dok se prednji može prilagođavati terenu preko zgloba (rotacija mosta oko uzdužne osi traktora) [6].

Gabaritne dimenzije, masa skidera i raspored opterećenja mostova prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Gabaritne dimenzije i masa skidera [6]

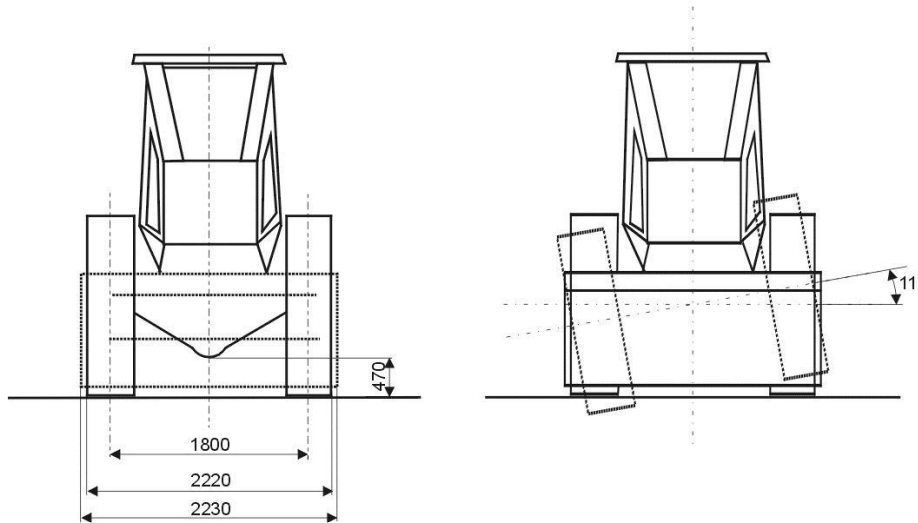
Dužina	7130 mm
Širina	2200 mm
Visina	2950 mm
Prohodnost	570 mm
Ukupna masa m_v	7200 kg
Polumjer kotača r_k	0.71 m
Raspored opterećenja prednji-zadnji most	59:41

Osnovne dimenzije vidljive s bočne strane vozila kao i veličine prilikom spuštanja prednje i stražnje zaštitne daske su vidljive na slici 5.



Slika 5. Bočne dimenzije skidera [8]

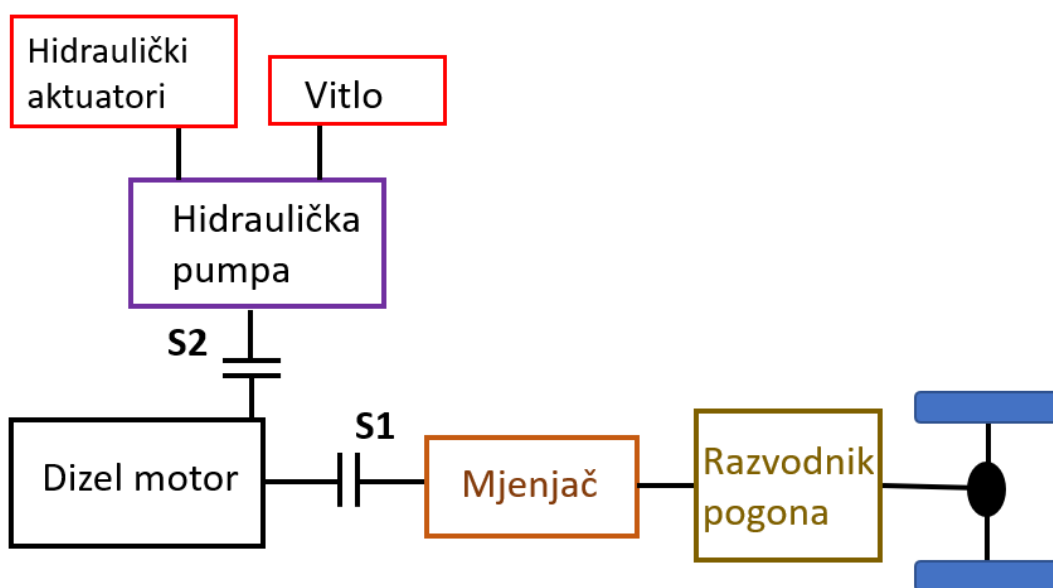
Na slici 6. su prikazane dimenzije skidera vidljive s prednje strane, razmak između vanjskih krajeva kotača i najveći mogući zakret prednjeg mosta.



Slika 6. Prednje dimenzije i zakret prednjeg mosta [8]

2.2. Pogonski sklop skidera

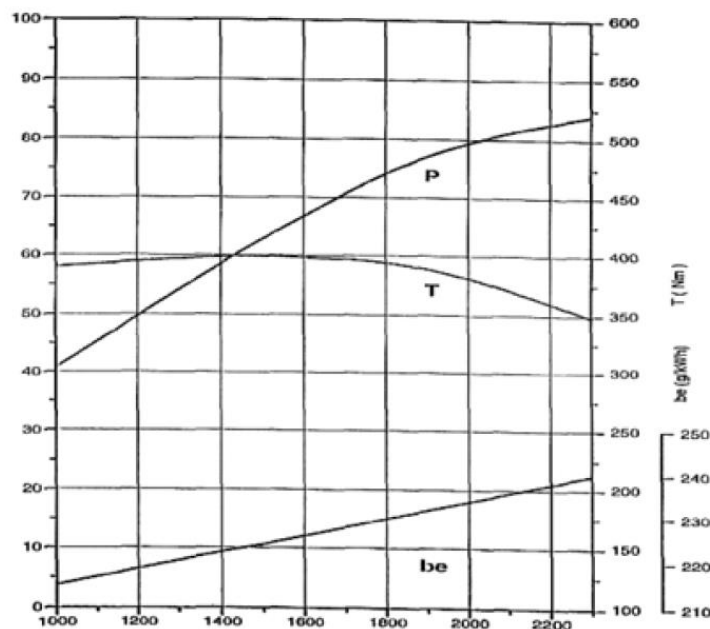
Funkcionalna shema pogonskog sklopa skidera je prikazana na slici 7. Dizelski motor služi za pokretanje vozila i pogon hidrauličkih pumpi. Od mjenjačke kutije je odvojen spojkom S1 kojom upravlja vozač. Izlazno vratilo iz mjenjačke kutije ulazi u razvodnik pogona koji raspodjeljuje snagu na prednji i stražnji most vozila. Hidraulička pumpa koja je od motora odvojena spojkom S2 pokreće vitlo i hidrauličke aktuatori pod koje spadaju cilindri za zakret vozila i pogon prednje i stražnje odrivne daske [6].



Slika 7. Shema pogonskog sklopa skidera

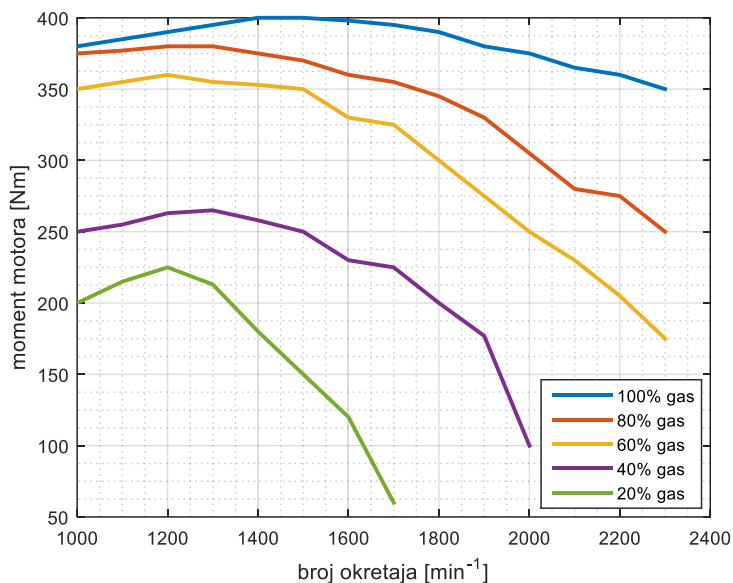
2.2.1. Dizelski motor

Skider je pogonjen dizelskim motorom Deutz F6L-914, hlađen zrakom. Obujam motora iznosi 6472 cm^3 i sastoji se od šest cilindara u rednom rasporedu. Maksimalna snaga iznosi 84 kW pri 2300 min^{-1} , a maksimalni moment 400 Nm pri 1500 min^{-1} [6]. Momentna karakteristika i krivulja snage prikazane su na slici 8.



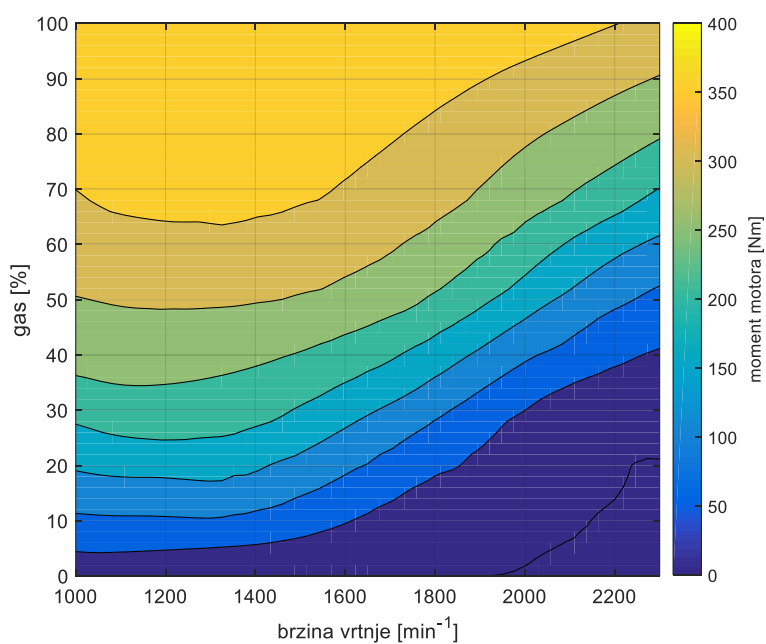
Slika 8. Krivulje momenta i snage motora [9]

Momentna karakteristika, ali isto tako i krivulja snage prikazana na slici 8. predstavljaju vrijednosti koje motor može postići pri maksimalno pritisutoj papučici gasa odnosno maksimalno otvorenoj zaklopci. Kroz cijeli ovaj rad će se za izraz pritisutost papučice gasa koristiti samo termin gas ili papučica gasa. Potrebno je odrediti krivulje momenta i snage motora ovisno i o ostalim položajima papučice gasa. U službenom dokumentu od proizvođača motora koji je bio dostupan [10] ne postoje takve krivulje te su one proizvoljno definirane po uzoru na dostupne grafove za slične tipove motora na internetu [11] te su prikazane na slici 9. za pet različitih položaja papučice gasa.



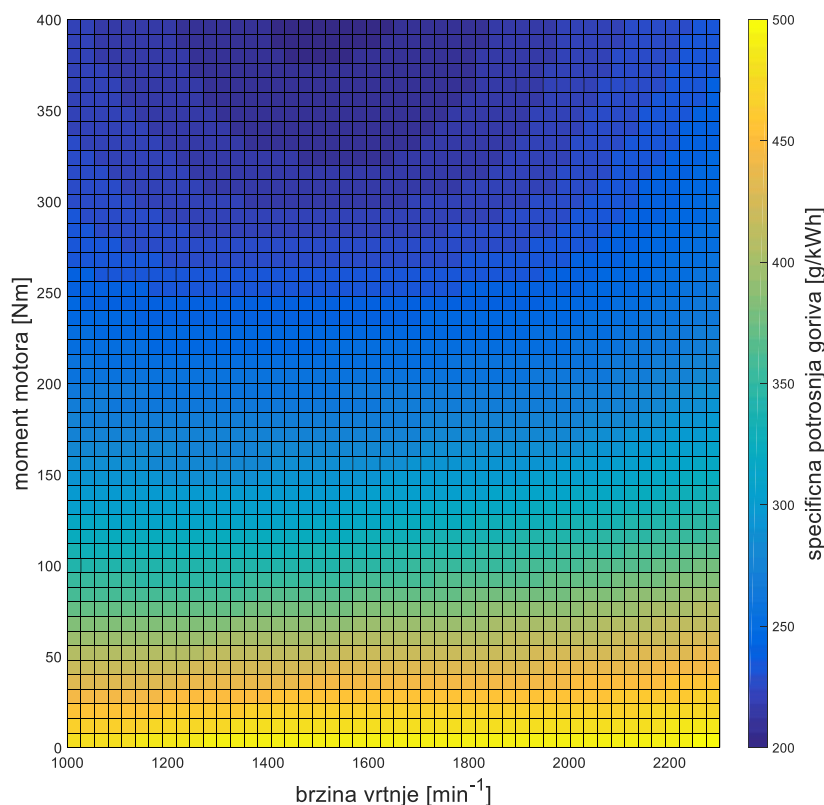
Slika 9. Momentne karakteristike za različite položaje papučice gasa

U stvarnosti je kod većine vozila ovakvog tipa papučicu gasa moguće pritisnuti na „beskonačni“ broj različitih položaja te će ona moći zauzeti neki od položaja između 0 i 100%. Isto tako će funkcionirati i vozač u obliku regulatora te je potrebno definirati momentne karakteristike za sve te položaje. Provlačenjem površine kroz postojeće krivulje dobivamo mapu iz koje se za svaku kombinaciju broja okretaja motora i gasa dobiva moment motora. Mapa dobivena provlačenjem površine između krivulja sa slike 9. prikazana je na slici 10.



Slika 10. Mapa ovisnosti momenta motora o brzini vrtnje i papučici gasa

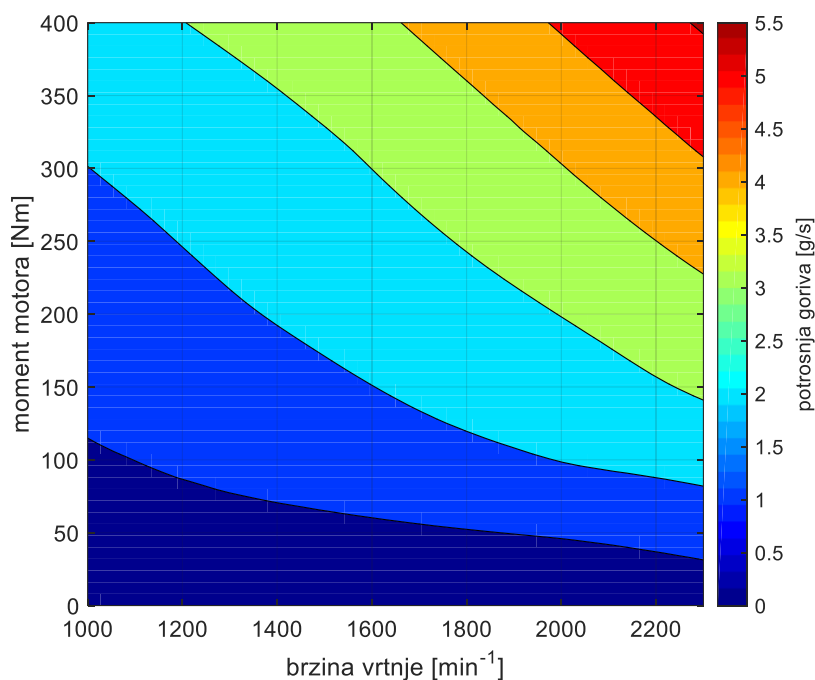
U dokumentaciji dizelskog motora [10] ne postoji mapa potrošnje goriva već samo njena vrijednost pri nazivnoj snazi, stoga je mapa potrošnje izrađena prilagođavanjem mapa motora sličnih karakteristika, koje su dostupne na Internetu [12]. Na slici 11. se vidi mapa specifične potrošnje goriva u ovisnosti o brzini vrtnje i momenta motora.



Slika 11. Mapa specifične potrošnje goriva

Optimalno područje rada motora je smješteno od 1300 do 1800 min⁻¹ pri vrijednosti oko 360 Nm. Specifična potrošnja goriva na tome mjestu iznosi između 200 i 214 g/kWh. Specifična potrošnja raste kako i raste brzina vrtnje motora i njegovo opterećenje.

Mapa trenutne potrošnje goriva u ovisnosti o brzini vrtnje i momentu motora prikazana je na slici 12., a dobiva se množenjem vrijednosti specifične potrošnje goriva s trenutnom snagom, Iako je najveća trenutna potrošnja goriva kod maksimalnog momenta te raste s brzinom vrtnje, karakteristika specifične potrošnje goriva govori kako efikasnost motora drastično opada kako opada moment motora.



Slika 12. Mapa potrošnje goriva

2.2.2. Mjenjač i razvodnik pogona

Ručni mjenjač sadrži brzi i spori hod od koji svaki ima pet stupnjeva prijenosa naprijed i jedan u natrag. Ukupni prijenosni omjeri za sporohodni način vožnje i maksimalne brzine vozila prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Prijenosni omjeri i maksimalne brzine [9]

Stupanj prijenosa s [-]	Ukupni prijenosni omjer i_{uk} [-]	Brzina vozila pri brzini vrtnje motora od 2300 min^{-1} [km/h]
1	213	2.9
2	116	5.3
3	70	8.7
4	44	14.1
5	29	21.1

Poznavajući ukupni prijenosni omjer za svaki stupanj prijenosa i_{uk} i brzinu vozila v pri maksimalnom broju okretaja motora n možemo izračunati ovisnost okretnog momenta na kotaču M_k i brzine vozila za svaki prijenosni omjer. Za izračunavanje brzine vozila potrebno je

poznavati opseg kotača iz kojeg će se preko ukupnog prijenosnog omjera i brzine vrtnje motora dobiti brzina vozila. Opseg kotača računamo prema formuli:

$$O_k = 2 \cdot r_k \cdot \pi, \quad (1)$$

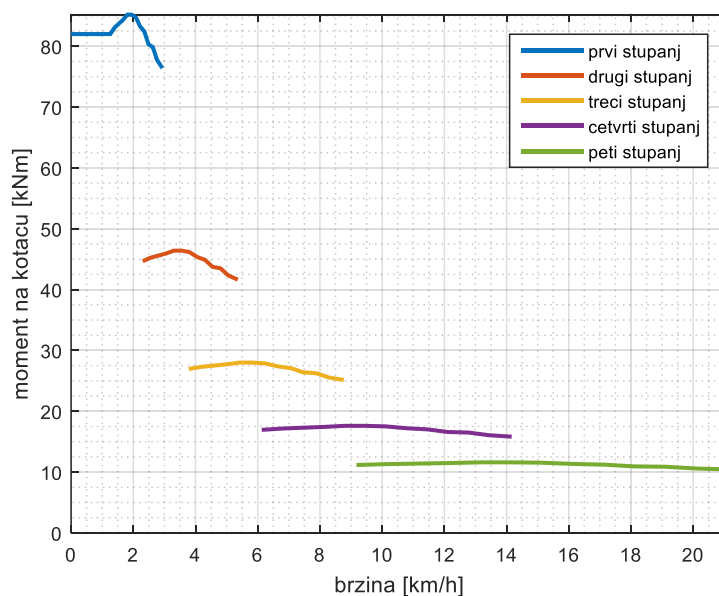
gdje je r_k polumjer kotača, a O_k opseg kotača. Računamo brzinu vozila s obrzirom na stupanj prijenosa i brzinu vrtnje motora:

$$v = \frac{n}{i_{uk,i} \cdot 60} \cdot O_k, \quad (2)$$

gdje je n brzina vrtnje motora, v brzina vozila, a $i_{uk,i}$ ukupni prijenosi omjer u i -tom stupnju prijenosa. Konačno uz podatke iz momentne karakteristike motora sa slike 8. ukupnom prijenosnom omjeru te brzini vozila računamo okretni moment na kotaču za svaki prijenosni omjer u ovisnosti o brzini kretanja vozila:

$$M_{k,i} = M_m \cdot i_{uk,i}, \quad (3)$$

gdje je $M_{k,i}$ moment na kotaču u i -tom stupnju prijenosa, a M_m moment motora na određenom broju okretaja. Uz momentnu karakteristiku očitavamo moment za svaki broj okretaja motora. Prolazeći kroz petlju uz pomoć izraza (3) računamo moment na kotaču za svaki stupanj prijenosa te naposljetku dobivamo ovisnost pogonskih momenata o brzini vozila i stupnju prijenosa koja je prikazana na slici 13.



Slika 13. Pogonski moment na kotaču u ovisnosti o brzini vozila

Iz slike 13. možemo uočiti kako ne dolazi do preklapanja krivulja što objašnjavamo velikim razlikama u prijenosnim omjerima za svaki stupanj. Ravni dio krivulje za prvi stupanj je

područje gdje spojka proklizava, a radi jednostavnosti je stavljen konstantan moment, jednak onom koji je postignut pri 1000 min^{-1} .

2.2.3. Vitlo

Skider je opremljen dvobubanjским vitlom, čija je maksimalna duljina izvlačenja 70 m, a brzina privlačenja 1.26 m/s [13]. Prilikom dolaska na mjesto eksploatacije radnici privezuju trupce sajlama vitla, a skider se usidri na nekom sigurnom mjestu kako ne bi došlo do pomicanja. Skider je cijelo vrijeme uključen, a mjenjač mu se nalazi u neutralnom položaju. Primjer povezivanja trupaca sajlama je prikazan na slici 14.



Slika 14. Povezivanje trupaca sa sajlama [14]

Trupci se privlače vitlom sve dok se ne približe zaštitnoj dasci skidera. Prilikom svakog dolaska na mjesto eksploatacije uzimat će se nasumična vrijednost za udaljenost privlačenja te se izračunavati potrošnja goriva za tu radnju.

Pregledavanjem snimki s interneta uočeno je puno situacija u kojima skider ne uspijeva izvući teret zbog loših uvjeta na stazi. Jedan takav primjer je vidljiv na slici 15. gdje je prikazano mjesto na kojem skider zbog nepovoljnog terena proklizava i ne uspijeva izvući teret.



Slika 15. Mjesto na kojem vozilo sa teretom proklizuje [15]

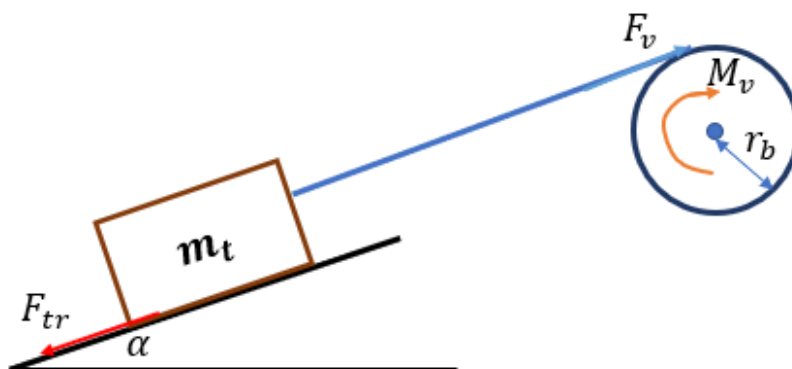
U tom slučaju vozač otpušta kočnicu vitla te samim time i teret te prolazi taj dio staze bez tereta. Nakon što vozilo dođe do ravnog i sigurnog dijela ponovno privlači teret. Opisana situacija se može vidjeti na slici 16.



Slika 16. Privlačenje tereta vitlom [15]

Ovaj slučaj će se također uvrstiti u ukupnu potrošnju goriva, a njegova učestalost će biti definirana u kasnijim poglavljima.

Vitlo se modelira kao masa na kosini sa trenjem privezana na koloturu čija je skica prikazana na slici 17.



Slika 17. Shematski prikaz vitla i tereta na kosini

Iz rastava sila na kosini računamo normalnu silu pa zatim silu trenja. Sila vitla F_v će biti jednaka sili trenja:

$$F_v = F_{tr}, \quad (4)$$

$$F_{tr} = F_N \cdot \mu_p, \quad (5)$$

$$F_{tr} = m_t \cdot \cos \alpha \cdot g \cdot \mu_p, \quad (6)$$

gdje su F_{tr} sila trenja, F_N normalna sila, g gravitacijsko ubrzanje, α nagib kosine, a μ_p koeficijent trenja, isti onaj koji se koristi pri računanju sile vuče trupaca.

Iz radijusa bubnja r_b računamo moment M_v potreban za izvlačenje tereta:

$$M_v = F_v \cdot r_b. \quad (7)$$

Prijenos snage se vrši preko pužnog prijenosnika sa redukcijom $i_v = \frac{41}{2}$ dok je korisnost vitla $\eta_v = 0.86$ [13]. Poznavajući te podatke dobivamo ukupni moment motora M_m potreban za izvlačenje tereta pomoću vitla:

$$M_m = M_v \cdot \eta_v \cdot \frac{1}{i_v}. \quad (8)$$

Snagu vitla računamo iz izraza:

$$P_v = F_{tr} \cdot v_v, \quad (9)$$

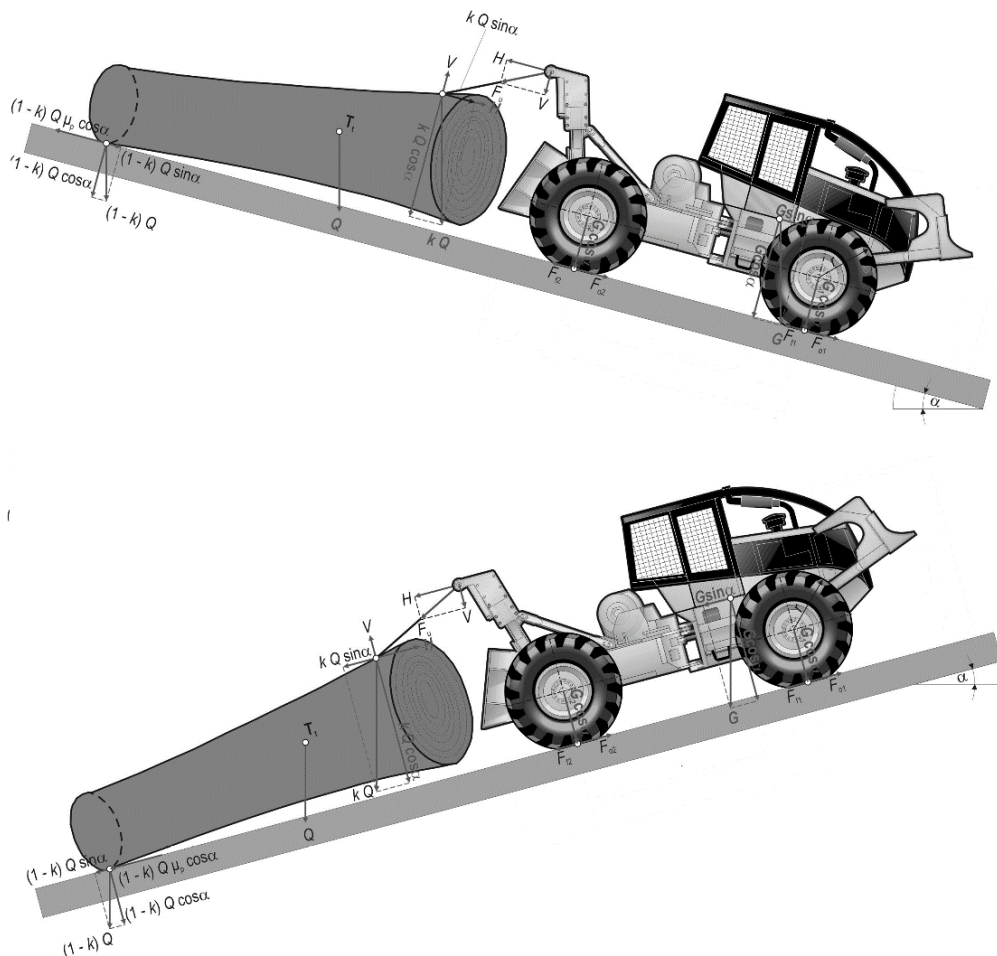
gdje je P_v snaga vitla, a v_v brzina privlačenja.

3. OPTEREĆENJA I VOZNE RUTE

U ovom poglavlju su definirane sile koje djeluju na vozilo prilikom vožnje i vozne rute po kojima se vuče teret.

3.1. Opterećenja

Tijekom kretanja skidera na njega djeluju razna opterećenja. Za potrebe ovog rada u obzir se uzimaju otpori kotrljanja kotača i sile koje se javljaju prilikom vuče trupaca. Zbog malih brzina kretanja vozila otpori zraka se mogu zanemariti. Radi jednostavnosti masa cijelog skidera je koncentrirana u jednu točku. U radu [12] definirana su tri parametra koji uz težine skidera i tereta utječu na ukupno opterećenje. Oni se koriste za izračun opterećenja i u ovom radu. To su faktor kotrljanja f koji predstavlja otpore prilikom kotrljanja kotača, raspored težine tereta k koji označuje odnos između horizontalne i vertikalne komponente sile u užetu i faktor privlačenja tereta μ_p koji označava trenje između tereta i podloge. Skice skidera sa teretom i sile koje se javljaju prilikom vožnje su vidljive na slici 18.



Slika 18. Sile koje djeluju na vozilo u vožnju niz kosinu (gornji prikaz) i uz kosinu (donji prikaz) [16]

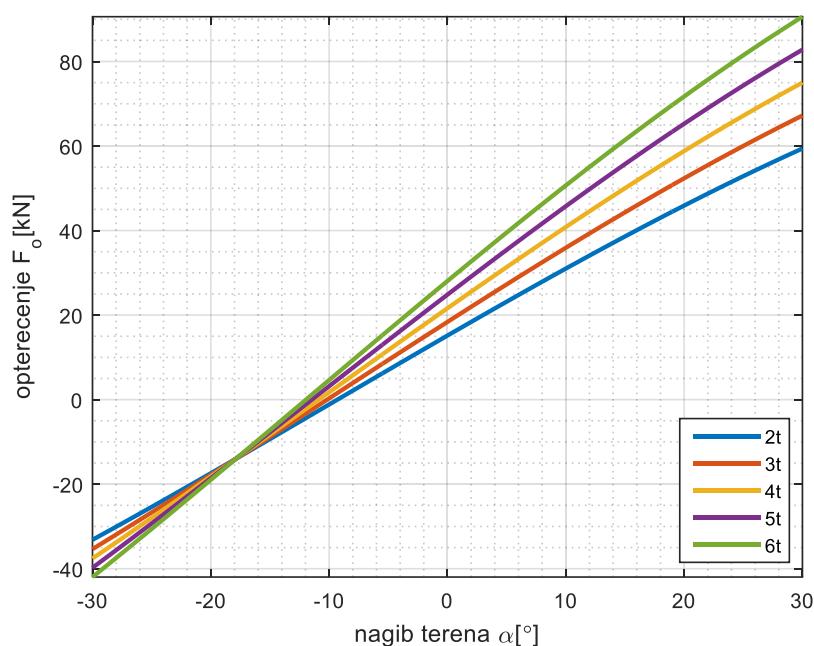
Postavljanjem ravnoteže sila u smjeru vodoravnom na smjer kretanja vozila dolazimo do izraza za ukupno opterećenje prilikom vuče tereta:

$$F_o = (1 - k) \cdot Q \cdot \mu_p \cdot \cos(\alpha) - (1 - k) \cdot Q \cdot \sin(\alpha) + G \cdot f \cdot \cos(\alpha) - G \cdot \sin(\alpha) + k \cdot Q \cdot f \cdot \cos(\alpha) - k \cdot Q \cdot \sin(\alpha), \quad (10)$$

gdje je F_o ukupno opterećenje, Q težina trupca, G težina skidera i α nagib terena. Ovisno o predznaku nagiba terena dobivamo izraze za vuču uzbrdo i nizbrdo te ukoliko je nagib jednak nuli onda za vožnju po ravnom.

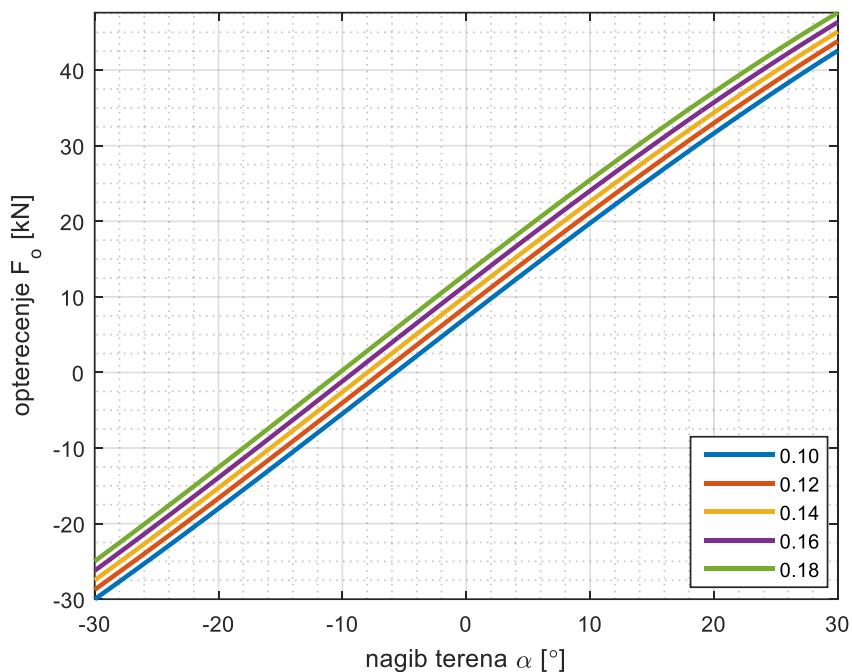
Za potrebe analize u ovome radu vrijednosti težine tereta varirat će se do maksimalne koja iznosi oko šest tona [17]. Ostale vrijednosti parametara terena će se također varirati oko srednjih vrijednosti ($f = 0.12, k = 0.48, \mu_p = 0.51$) [17].

Slikom 19. možemo prikazati promjenu opterećenja ovisno o različitim masama tereta za iste parametre terena.



Slika 19. Opterećenja za razne mase tereta u ovisnosti o nagibu terena

Za slučaje vožnje bez tereta jedina varijabla koja utječe na opterećenje je faktor kotrljanja f . Ovisnost opterećenja o nagibu terena i različitim faktorima kotrljanja je prikazana na slici 20. Opterećenje raste gotovo linearno o kutu dok su krivulje za različite faktore kotrljanja paralelne i međusobno odmaknute.

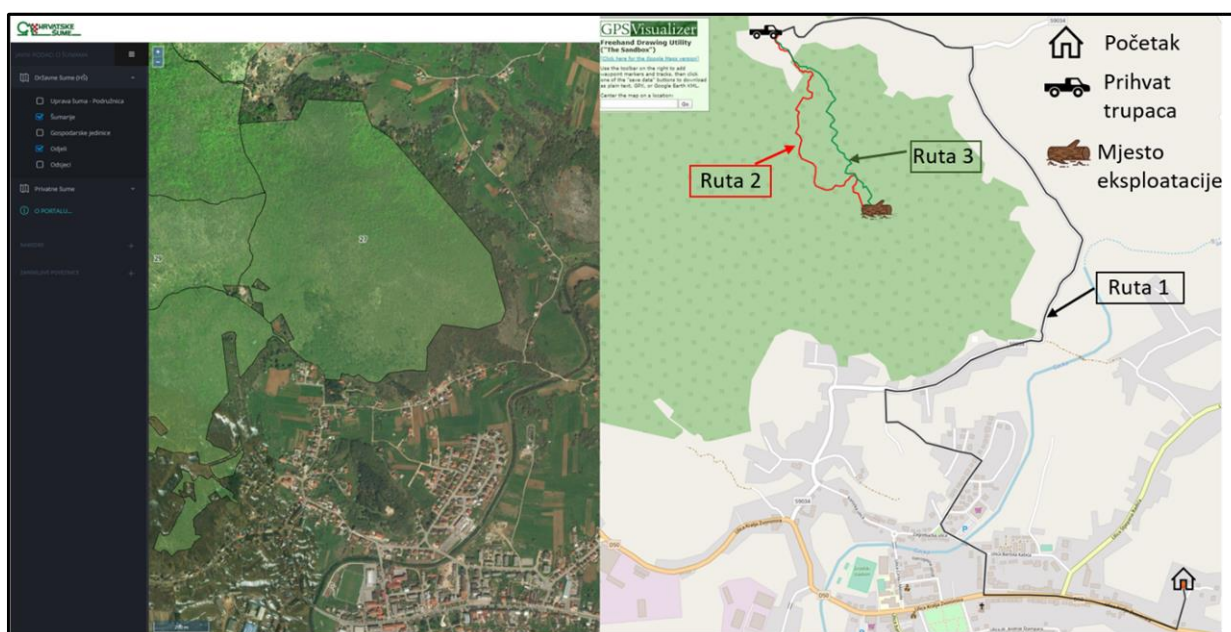


Slika 20. Opterećenje praznog vozila za razne faktore kotrljanja

3.2. Vozni ciklusi

Odabrano je 5 različitih ruta za koje će se računati ukupna potrošnja goriva i vrijeme potrebno za njihovo prolaženje. Šume i vozne rute su odabrane uz pomoć internetskih stranica („Hrvatske šume“ i „GPS Visualiser“) i sve se nalaze u bliskoj okolici grada Otočca.

Ukupno radno vrijeme skidera je podijeljeno na dva različita radna dana. Skider se najviše koristi na kraćim rutama gdje je i najefikasniji [18] te će se stoga scenarij prvog radnog dana koji je okarakteriziran kraćim rutama obavljati dvostruko više puta. Prvi radni dan se sastoji od 3 rute prikazane na slici 21.



Slika 21. Vozne rute za prvi radni dan

Prvi radni dan skider započinje od spremišta označenog kućicom te se vozi rutom 1 do mjesta prihvata označenog kamionom. U jednom radnom danu on tu rutu prolazi samo dva puta, stoga se ove vožnje ne razmatraju u analizi potrošnje goriva. Crvena i zelena staza označuju dvije rute po kojima će skider prevoziti trupce. On se vozi do mjesta eksploatacije označenog drvetom gdje zakači trupac te ga prevozi do mjesta prihvata označenog kamionom gdje ga predaje vozilu predviđenom za njihov transport. Rute prvog radnog dana se nalaze u gospodarskoj jedinici „Kompoljski vrh“ gdje većim dijelom prevladava šuma bukve.

Staze su se napravile pomoću internetske stranice *GPSVisualizer* i sastoje se od međusobno povezanih točaka proizvoljne gustoće. Geografska širinu, dužina i nadmorska visinu je poznata za svaku točku s kojom je staza napravljena.

Potrebno je još odrediti udaljenost između točaka za što će nam poslužiti Haversinova formula kojom se računa udaljenost između dvije točke na površini sfere:

$$l_{t,i} = 2R \cdot \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{s_{i+1} - s_i}{2} \right) + \cos(s_i) \cdot \cos(s_{i+1}) \cdot \sin^2 \left(\frac{d_{s+1} - d_s}{2} \right)} \right), \quad (11)$$

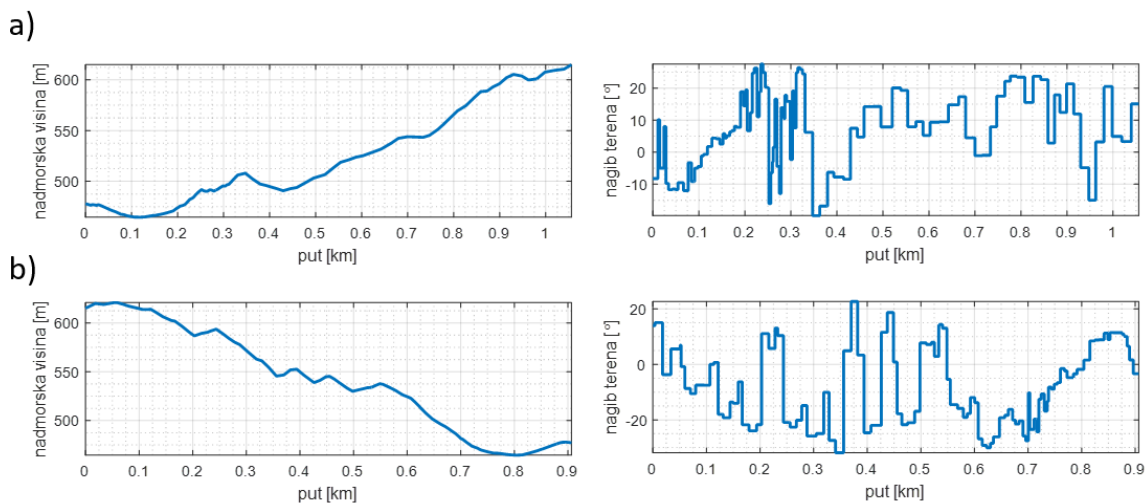
gdje su $l_{t,i}$ udaljenost između dvije točke, R radijus Zemlje koji iznosi 6371 km, s_i geografska širina i -te točke, a d_i geografska dužina i -te točke.

Pomoću petlje prolazimo kroz sve točke i računamo njihovu udaljenost od početne. Poznavajući udaljenosti svake točke te njihovu nadmorsku visinu računamo nagib između dvije susjedne točke:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{a_{i+1} - a_i}{l_{i+1} - l_i} \right), \quad (12)$$

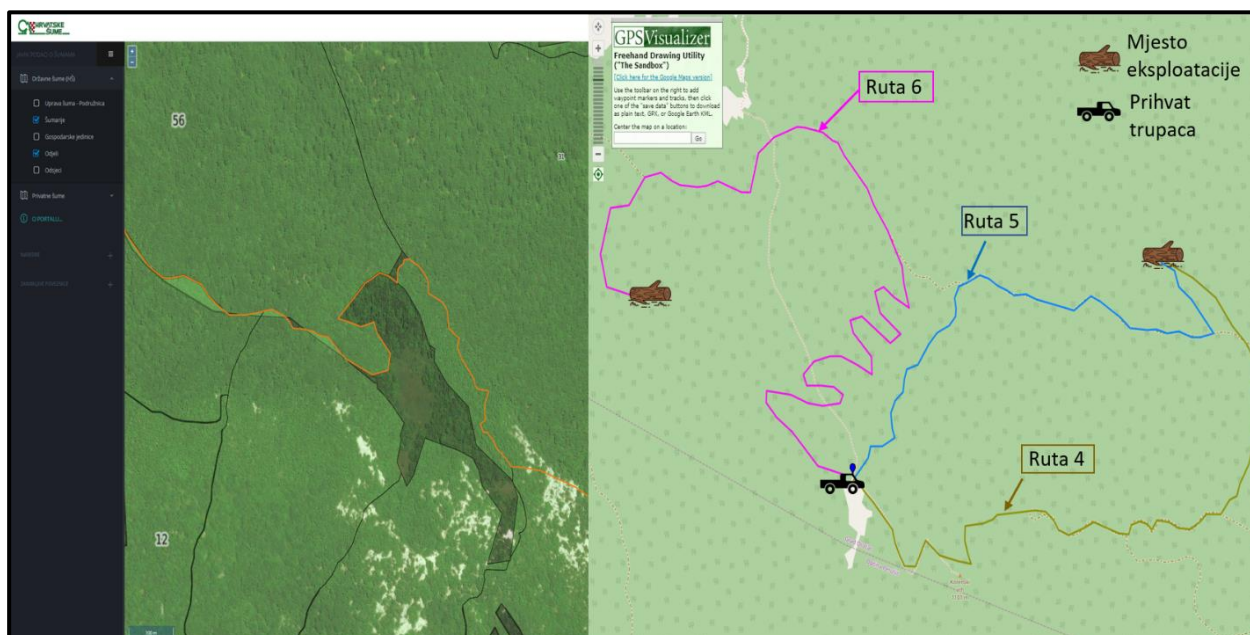
gdje je α_i nagib i -tog poligona i a_i nadmorska visina i -te točke.

Nakon što su nam poznate međusobne udaljenosti točaka i njihove nadmorske visine možemo nacrtati grafove koji prikazuju ovisnost nadmorske visine i nagiba u odnosu na put. Rute su rađene spajanjem točaka po karti te je dobivena ruta podijeljena sa poligonima, a izgled nagiba terena u ovisnosti o putu je stepeničast (slika 22). Kako je i ranije spomenuto, ruta koja predstavlja cestovnu vožnju pod brojem jedan neće biti prikazana jer ne utječe na završno mjerenje.



Slika 22. Nadmorska visina i nagib terena rute broj dva (a) i tri (b)

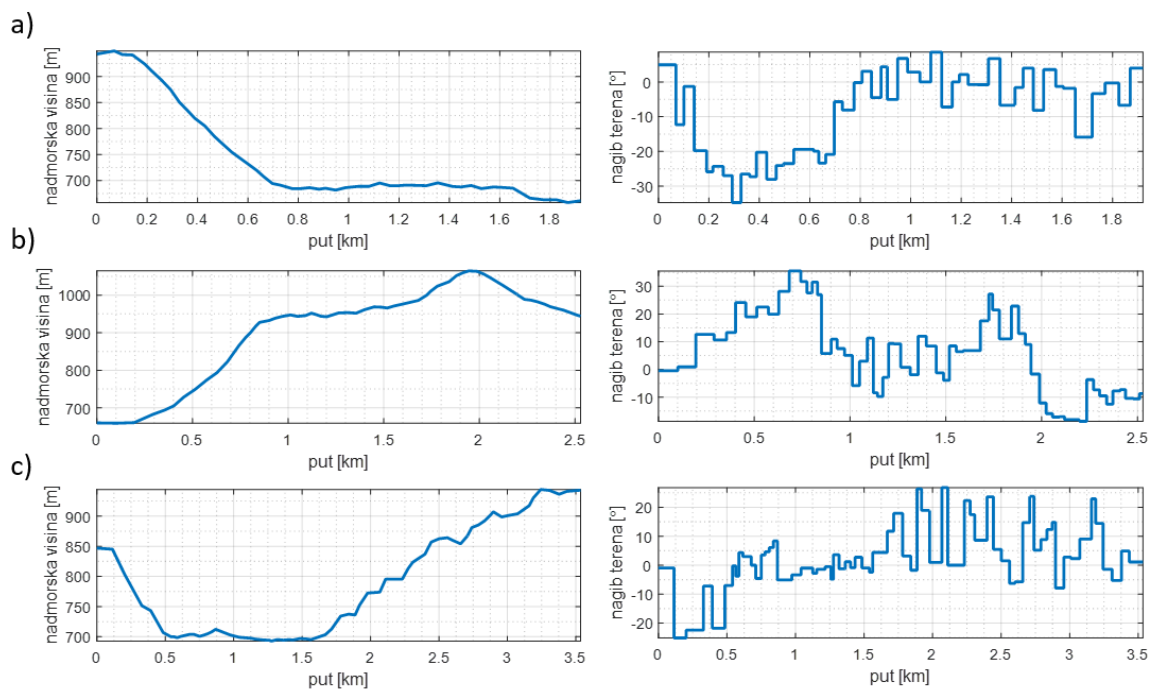
Drugi radni dan je prikazan na slici 23. Odabrane su tri različite rute i dva mjesta eksploatacije koja se ovaj put nalaze na nižem dijelu brda u odnosu na mjesto prihvata trupaca koje je na samom vrhu.



Slika 23. Vozne rute za drugi radni dan

Ruta šest se nalazi u gospodarskoj jedinici „Rastovka-Kuterevske Kose“ u kojoj prevladavaju šume bukve. Rute četiri i pet prolaze kroz gospodarsku jedinicu „Crno jezero – Matković Rudine“ gdje je šuma jele.

Na slici 24. su prikazane ovisnosti nadmorske visine i nagiba o putu za rute drugog radnog dana.



Slika 24. Nadmorska visina i nagib terena rute broj šest (a), pet (b) i četiri (c)

Rute drugog radnog dana su duže i većinom prate šumske puteve. Također se i pojavljuju veći nagibi. Pogotovo kod šeste i pete gdje na nekim mjestima dostižu i 35° . Iako su na slikama 22. i 24. prikazane rute u samo jednom smjeru, skider će po njima voziti u oba smjera, a razlikovat će se po nazivu uzbrdo i nizbrdo.

4. SIMULACIJSKI MODEL KONVENCIONALNOG SKIDERA

Simulacijski model konvencionalnog skidera prikazan je na slici 25. Vozač koji je na slici označen iscrtkanom linijom daje signal pedale gasa koji ulazi u mapu momentne karakteristike (Slika 10) te signal kočnice koji djeluje na mapu kočenja. Dobiveni moment se množi sa stupnjem prijenosa i daje moment na kotaču M_k . Za izračunavanje ubrzanja vozila potrebno nam je poznavati ukupnu silu koje na njega djeluje:

$$F_{uk} = \sum_i^n F_i, \quad (13)$$

gdje je F_{uk} ukupna sila koja djeluje na vozilo, a F_i sve pojedinačne sile (vidi točku zbrajanja na slici 25). To su sila motora na kotaču F_k , opterećenje F_o i sila kočenja F_b . Silu motora na kotaču računamo iz momenta motora M_m , prijenosnog omjera i_{uk} i polumjera kotača prema izrazu:

$$F_k = \frac{M_m}{r_k} \cdot i_{uk}. \quad (14)$$

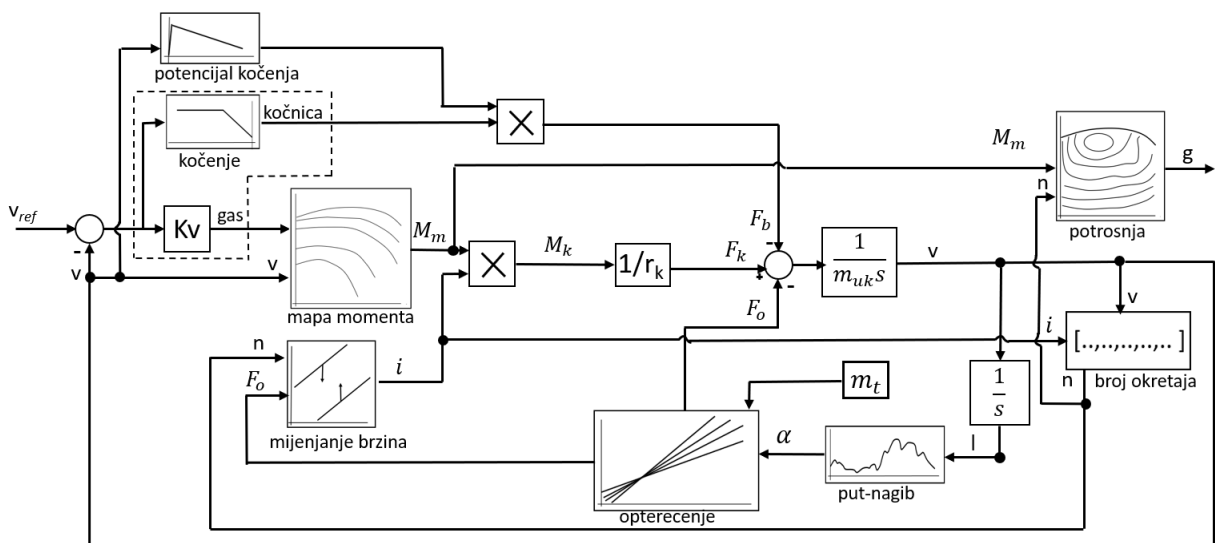
Iz drugog Newtonovog zakona računamo ubrzanje vozila:

$$a = \frac{F_{uk}}{m_{uk}}, \quad (15)$$

gdje je a akceleracija vozila, a m_{uk} ukupna masa vozila koja se sastoji od mase vozila m_v i tereta m_t ,

$$a = \frac{F_m - F_o - F_b}{m_v + m_t}. \quad (16)$$

Nakon što je poznata akceleracija njenim integriranjem (integral je na slici 25. prikazan blokom 1/s) dolazimo do brzine vozila v . Integriranjem brzine dobivamo pređeni put vozila l .



Slika 25. Shema konvencionalnog modela vozila

Potršnja goriva se očitava pomoću mape. Izlaz iz mape je specifična potrošnja goriva. Za pretvorbu u potrošnju u vremenu služimo se izrazom:

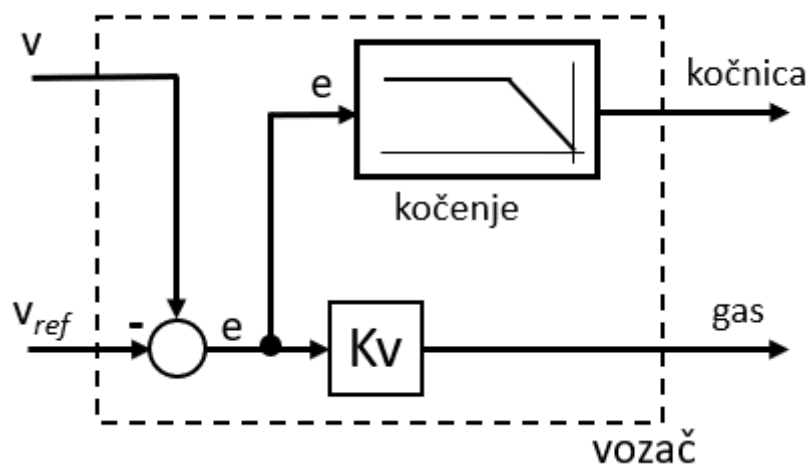
$$g_t = \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \int_0^t g_b \cdot P_m \cdot dt, \quad (17)$$

gdje je g_b specifična potrošnja goriva, a P_m snaga motora. Dobivamo koliko kilograma goriva je potrošeno na cijelom putu. Uz gustoću dizelskog goriva $\rho_d = 832 \text{ kg/m}^3$ [19] računamo potrošnju u litrama:

$$g_l = \frac{g_t}{\rho_d}. \quad (18)$$

4.1. Model vozača

Radi jednostavnosti i zadovoljavajućih mogućnosti kao vozač se koristi P regulator. Ulaz u njega je referentna i stvarna brzina vozila, a izlaz pedala gasa i kočnice. Pedala gasa se računa na temelju razlike referentne i stvarne brzine. U sklop vozača uključena je i pedala kočnice čiji je ulaz također razlika referentne i stvarne brzine. Na slici 26. je prikazan shematski prikaz P regulatora gdje su e razlika brzina, K_v pojačanje regulatora, v brzina vozila i v_{ref} referentna brzina. Pojačanje regulatora K_v je određeno heuristički i ono je postavljeno na 250 jer je tada ostaver zadovoljavajući odziv sustava. Kočnica se aktivira kada je e manj od nule te raste linearno sa pojačanjem 220 do maksimalne vrijednosti 1 koja predstavlja 100% kočenja.



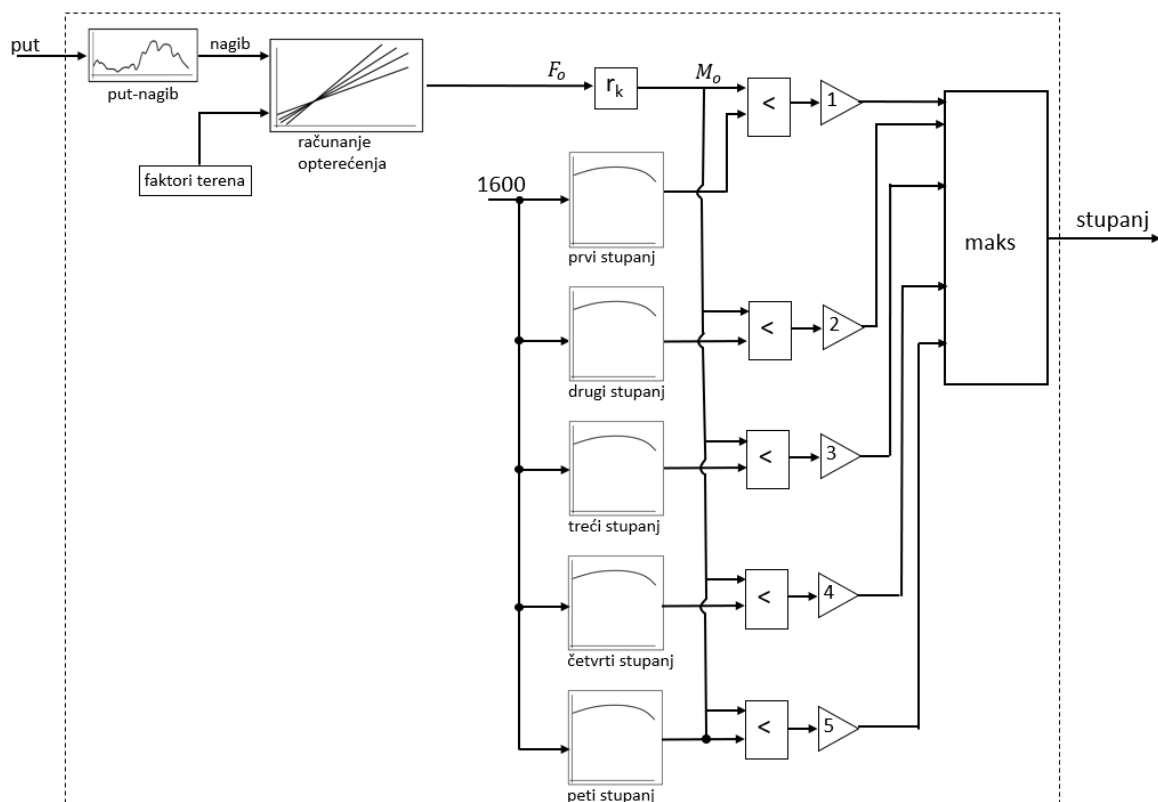
Slika 26. P regulator (vozač)

4.2. Odabir referentne brzine vozila

Za odabir referentne brzine razmatrana su tri pristupa. Kod prvog se referentna brzina određivala s obzirom na nagib terena gdje je ona proporcionalno opadala kako je apsolutna vrijednost nagiba rasla.

Kod drugog načina se referentna brzina postavljala na fiksnu vrijednost koja je bila blizu maksimalne vrijednosti kojom se vozilo može kretati u petom stupnju prijenosa.

S obzirom na to kako su prva dva rezultirala sa scenarijem nerealne vožnje gdje je vozač naglo kočio i ubrzavao, odabran je treći pristup gdje se referentna brzina definira prema stupnju prijenosa. Prije pokretanja simulacije za svaku vožnju se izračunava maksimalni stupanj prijenosa u kojem se može nalaziti vozilo, a da je u mogućnosti svladati nagib uz zadanu težinu tereta i ostale faktore terena. Logika za izračun maksimalnog stupnja prijenosa s obzirom na nagib i faktore terena te teret prikazana je na slici 27.



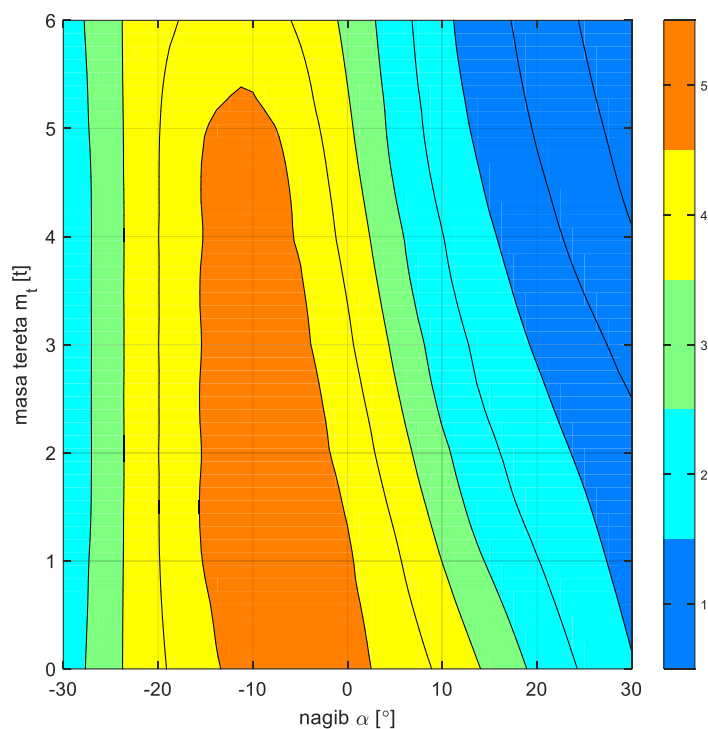
Slika 27. Određivanje stupnja prijenosa

Za svaki nagib koji se pojavljuje u određenoj vožnji se računa opterećenje F_o . Množenjem s radijusom kotača r_k dobivamo moment opterećenja M_o . Moment opterećenja se uspoređuje s

momentima koje motor može dati na kotaču pri 1600 min^{-1} u svih pet stupnjeva prijenosa. Ako je moment motora u određenom stupnju veći od opterećenja izabire se maksimalni stupanj od onih koji zadovoljavaju.

Također je postavljen uvjet gdje se u slučaju nagiba manjeg od -22° vozilo zadržava u trećem stupnju prijenosa, a manjeg od -18° u četvrtom jer iako bi se ono moglo gibati u većem stupnju prijenosa to nema smisla jer će u stvarnosti vozač zbog sigurnosti ograničavati svoju brzinu.

Iz sklopa prikazanog na slici 27. dobivamo mapu s odgovarajućim stupnjem prijenosa ovisno o masi tereta i nagibu koja je prikazana na slici 28.



Slika 28. Ovisnost stupnja prijenosa o masi tereta i nagibu terena

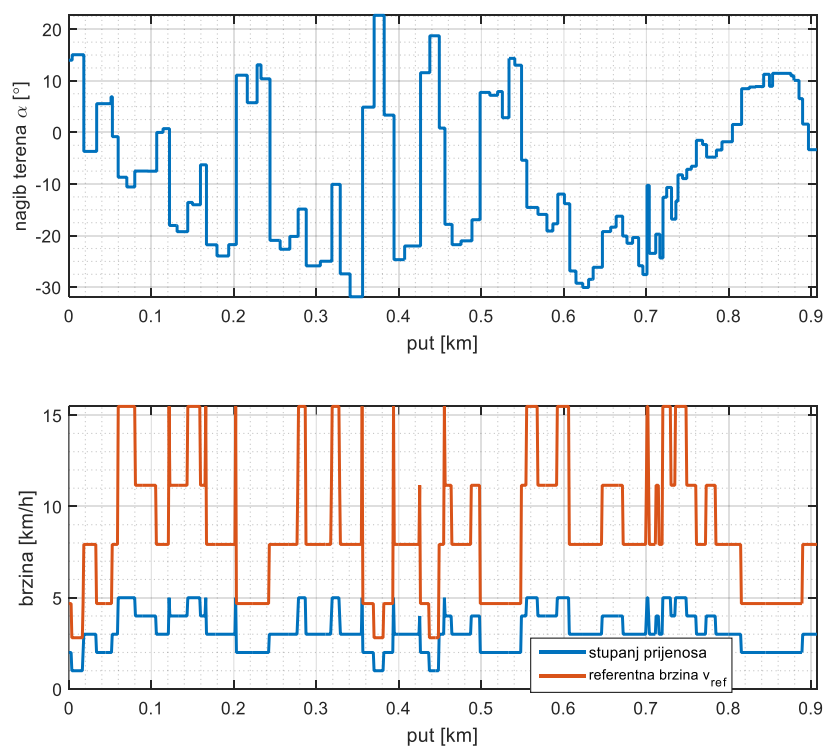
Za određene stupnjeve prijenosa za svaku točku na putu vozila, dajemo vrijednosti referentnoj brzini. Vrijednost referentne brzine za svaki stupanj prijenosa prikazana je u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti referentne brzine

Stupanj prijenosa	Referentna brzina [km/h]
1	2.8
2	4.7
3	7.9
4	11.2
5	15.5

Kako bi dobili što realniji prikaz vožnje, u četvrtom i petom stupnju prijenosa referentna brzina je postavljena na vrijednost koja otprilike odgovara 1600 min^{-1} motora. Kod ostalih stupnjeva prijenosa vrijednosti referentne brzine su postavljene da odgovaraju većim brzinama vrtnje motora. Na taj se način tijekom vožnje obuhvaća veće radno područje motora, s dijelovima većeg i manjeg opterećenja.

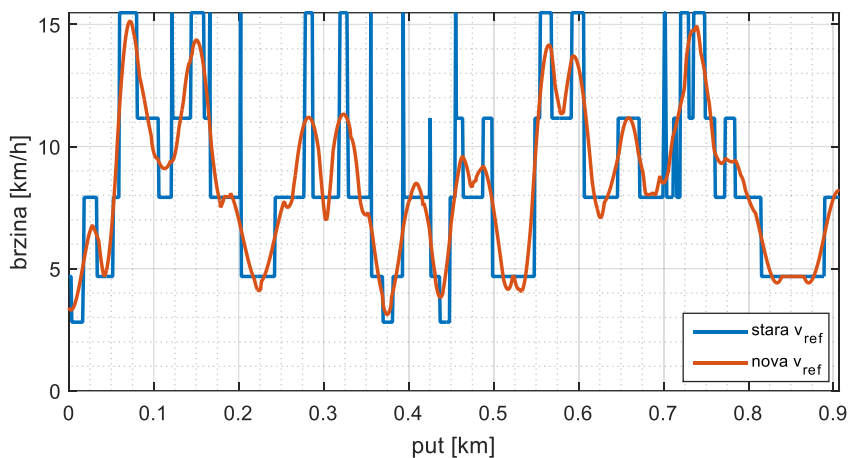
Referentna brzina sa maksimalnim stupnjem prijenosa je prikazana na slici 29.



Slika 29. Referentna brzina

Problem predstavljaju nagli skokovi referentne brzine koji su vidljivi na slici 29. Na tim mjestima dolazi do naglih kočenja odnosno ubrzavanja, a kako bi se izbjegli upotrebljavamo Savitzky-Golay filter kako bi „izgladili“ skokovite promjene i dobili konačni oblik referentne brzine.

Konačna referentna brzina prikazana je na slici 30. Prijelazi brzina između promjene stupnja prijenosa su blaži.



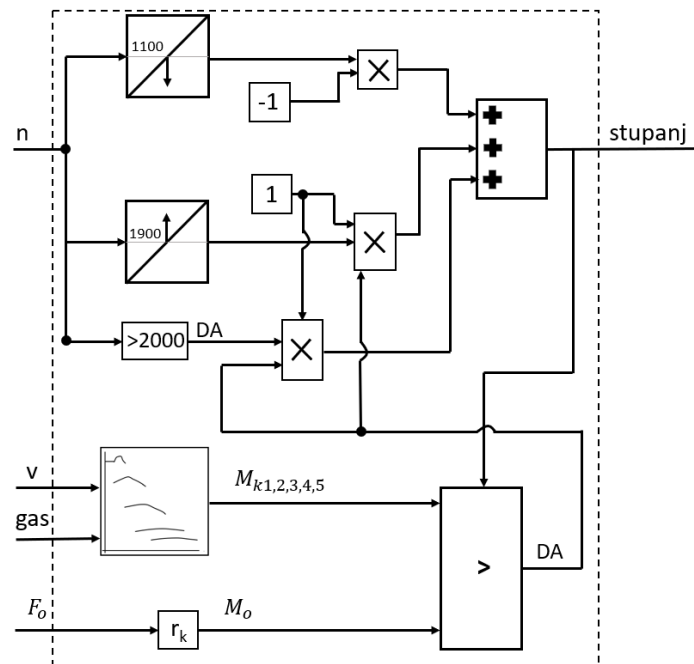
Slika 30. Referentna brzina nakon uporabe filtra

4.3. Odabir stupnja prijenosa

Još nam preostaje za odrediti način na koji će vozač mijenjati stupanj prijenosa. Kako bi pristup bio što bliži realnosti stupnjevi prijenosa se mijenjaju ovisno o broju okretaja motora. U slučaju da broj okretaja motora prođe 1900 min^{-1} prebacuje se u viši, a da padne ispod 1100 min^{-1} u niži stupanj prijenosa. U svakom trenutku se provjerava jeli moment u višem stupnju prijenosa veći od trenutnog opterećenja. Ako je taj uvjet zadovoljen te su okretaju prešli 1900 min^{-1} prebacuje se u viši stupanj.

U slučaju da broj okretaja pređe 1900 min^{-1} , a moment u višem stupnju je manji od opterećenja, vozač ostaje u trenutnom stupnju prijenosa, a na integrator se postavlja ograničenje brzine. Ograničenja brzine na integratoru su postavljena tako da se motor vozila u tim trenucima nalazi iznad 2000 min^{-1} .

Dodatni uvijet je da u slučaju kada je broj okretaja veći od 2000 te ako je moment u sljedećem stupnju veći od opterećenja, izvršit će se prebacivanje u sljedeći stupanj prijenosa. Sklop koji služi za mijenjanje stupnjeva prijenosa prema opisanoj logici je prikazan na slici 31.



Slika 31. Mijenjanje brzina

5. ANALIZA RADA KONVENCIONALNOG SKIDERA

U nastavku su prikazani detaljni vremenski dijagrami za dvije vožnje dok se rezultati za sve provedene vožnje nalaze u tablicama. Vremenski dijagrami svih izračunatih vožnji se nalaze u dodatku. Glavne varijable korištene u analizi su ukupna potrošnja goriva i trajanje svake vožnje. Od rezultata na dijagramima su prikazana brzina i stupanj prijenosa, nagib terena, gas i kočnica vozača, broj okretaja te moment motora.

5.1. Rezultati pojedine vožnje

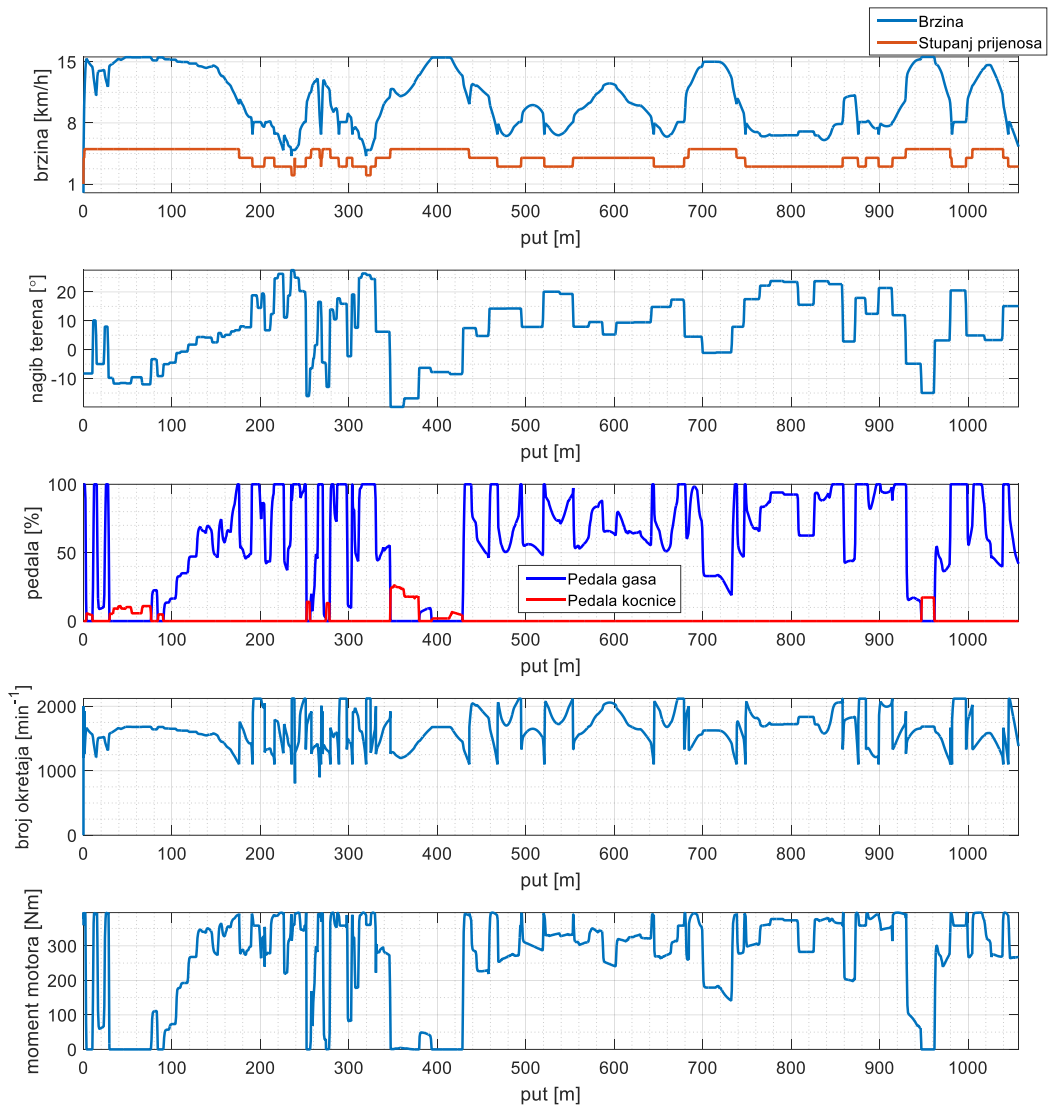
Skider se vozi rutom dva uzbrdo bez tereta, od mjesta prihvata do mjesta eksploatacije čiji su parametri prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Parametri rute 2

Staza 2	l [m]	m_t [t]	k	f	μ_p
	1056	0	0	0.12	0

Jedini faktor koji uz nagib utječe na opterećenje je faktor kotrljanja f . Veći dio vožnje predstavljaju usponi uz tek manje nizbrdice koje su ujedno i jedina mjesta kočenja. Maksimalni uspon iznosi 27° . Vozač je umjeren na gasu, većinu puta uspijeva svladati u četvrtom stupnju prijenosa dok je samo na većim nagibima prisiljen prebaciti sve do drugog. Mjesta najvećeg momenta motora se očekivano nalaze na najvećim usponima.

Rezultati za vožnju bez tereta uz parametre prikazane u tablici 4. su prikazani na slici 32.



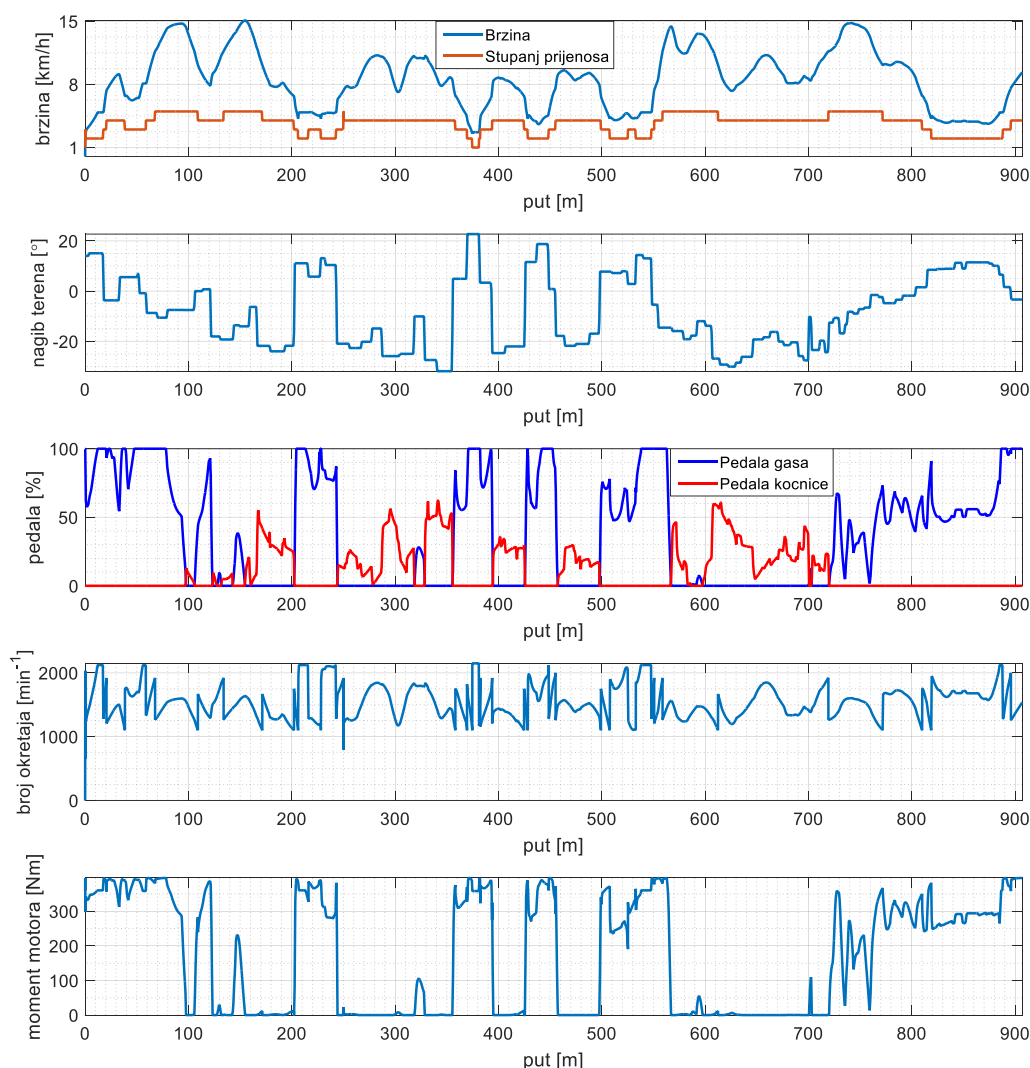
Slika 32. Rezultati vožnje po stazi dva

Skider se spušta sa teretom po stazom 3 od mjesta eksploatacije do mjesta prihvata. Parametri staze tri su prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Parametri rute 3

Staza 3	l [m]	m_t [t]	k	f	μ_p
	907	4	0.48	0.17	0.51

Iako ovaj put skider vuče teret od četiri tone očekuje se manja uporaba gasa, a veća kočnice jer se veći dio staze nalazi nizbrdo. Rezultati vožnje po stazi 3. sa parametrima iz tablice 5. su prikazani na slici 33.



Slika 33. Rezultati vožnje po stazi tri

Glavnina vožnje se odvija nizbrdo. Najveća strmina na ovom putu iznosi oko 25° i tu su zabilježena najveća kočenja. Vozilo većinu puta savladava u četvrtoj brzini. Kočenje je učestalije zbog uvjeta na ograničenje brzine prilikom spuštanja vozila, prilikom kočenja vozač

ostaje u stupnju prijenosa, a kočenje motorom nije uzeto u obzir. Najveći zahtjevi za momentom se javljaju na uzbrdicama.

5.2. Prvi radni dan

Potrošnja goriva i vrijeme trajanja vožnje za rute iz prvog radnog dana su prikazani u tablici 6. Za svaku stazu je uzeto četiri različitih masa tereta i kombinacija parametara staze.

Tablica 6. Pregled vožnji za prvi radni dan

Staza-smjer-teret m_t [t]	l [km]	f	μ_p	k	Trajanje vožnje [s]	Potrošeno goriva g_k [l]
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.17	0	0	455	1.75
Staza 2 - nizbrdo - 4.5	1.06	0.17	0.36	0.46	450	1.22
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.15	0	0	436	1.64
Staza 2 - nizbrdo - 6	1.06	0.15	0.56	0.4	556	1.96
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.13	0	0	408	1.52
Staza 2 - nizbrdo - 1.3	1.06	0.13	0.45	0.4	359	0.74
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.10	0	0	385	1.37
Staza 2 - nizbrdo - 3.6	1.06	0.10	0.43	0.6	376	0.80
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.15	0	0	408	1.50
Staza 3 - nizbrdo - 3	0.907	0.15	0.6	0.5	413	1.06
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.13	0	0	397	1.43
Staza 3 - nizbrdo - 6	0.907	0.13	0.48	0.5	478	1.32
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.11	0	0	382	1.35
Staza 3 - nizbrdo - 5.1	0.907	0.11	0.52	0.47	451	1.28
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.18	0	0	446	1.63
Staza 3 - nizbrdo - 5.5	0.907	0.18	0.52	0.47	516	1.50

Masa tereta ima veliki utjecaj na potrošnju i duljinu trajanja vožnje. Ako se usporede rezultati za teret od jedne i šest tona za istu stazu i slične parametre, trajanje vožnje je veće za 197 sekundi, a potrošnja veća za 1.22 litre.

Velike razlike u potrošnji i vremenu se također javljaju prilikom vožnje bez tereta. Za različite faktore kotrljanja, odnosno različita stanja terena (blato, suho) vremena vožnji variraju i do 64 sekunde, a potrošnja 0.28 litre.

Veliki udio u trajanju ukupnog radnog dana kao i potrošnje goriva čine operacije s vitlom. Kako je i ranije navedeno ona se sastoje od tri dijela: čekanje u praznom hodu, privlačenje tereta, otpuštanje i ponovno privlačenje u slučaju nemogućnosti prolaska nagiba. Duljine privitlavanja su odabrane slučajnim odabirom. Duljine čekanja t_{ξ} u praznom hodu dok radnici omotavaju sajlu oko trupaca se računa prema izrazu koja je proporcionalna duljini privitlavanja i masi tereta:

$$t_{\xi} = 3 \cdot l_v + 2.5 \cdot m_t, \quad (19)$$

gdje su t_{ξ} duljina čekanja, l_v duljina privitlavanja i m_t masa tereta. Vrijednosti koeficijenata u izrazu (19) su definirani kako bi se ovisno o udaljenosti i masi trupaca dobila očekivana vremena čekanja [21]. Kod svih izvlačenja za brzinu privitlavanja v_v je uzeta vrijednost od 1 m/s. Tablicom 7. su prikazani podaci o ukupnom potrošenom vremenu i gorivu za operacije s vitlom, a korištene mase i faktor privlačenja su isti kao u tablici 6.

Tablica 7. Operacija vitlom za prvi radni dan

Duljina privitlavanja [m]	m_t [t]	α [°]	μ_p	t_{ξ} / t_v [s]	Potrošeno goriva [l] vitlo/čekanje	Ukupno trajanje [s]
10	4.5	14	0.6	41 / 10	0.03 / 0.026	51
23	6	25	0.56	84 / 22	0.073 / 0.053	106
9	1.3	19	0.34	30 / 9	0.066 / 0.019	39
35	3.6	21	0.51	114 / 34	0.072 / 0.072	148
21	3	11	0.43	71 / 20	0.039 / 0.044	91
15	6	27	0.42	60 / 15	0.041 / 0.038	75
19	5.1	16	0.6	70 / 19	0.059 / 0.044	89
31	5.5	20	0.48	107 / 30	0.088 / 0.067	137

Potrošeno gorivo prilikom čekanja vozila u praznom hodu g_{ξ} se računa prema:

$$g_{\xi} = t_{\xi} \cdot g_n, \quad (20)$$

gdje je g_n potrošnja goriva u praznom hodu i iznosi 2.27 l/h [21].

Iz tablice 7. se može zaključiti kako je vrijeme čekanja višestruko duže od samog privitlavanja te u nekim slučajevima i veći potrošač.

Mjesta na kojima je moguće do dolaska proklizavanja i nemogućnost vožnje s teretom je nemoguće odrediti. Pregledavajući videozapise s interneta [21], odabrano je kako se ta pojava pojavljuje svaku drugu vožnju, s duljinom privitlavanja od 10 m, nagibom terena od 20° i prosječnom vrijednosti masa tereta i faktora privlačenja:

$$m_{t,sr} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{t,i}}{n}, \quad (21)$$

$$m_{t,sr} = 4.025 \text{ t}, \quad (22)$$

gdje su $m_{t,sr}$ srednja masa tereta, $m_{t,i}$ masa i-tog tereta, a n broj ukupnih mjerenja, a prosječna vrijednost faktora privlačenja se računa prema izrazu:

$$\mu_{p,sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{p,i}}{n}, \quad (23)$$

$$\mu_{p,sr} = 0.49, \quad (24)$$

gdje su $\mu_{p,sr}$ srednja vrijednost faktora privlačenja, $\mu_{p,i}$ faktor privlačenja i-tog tereta, a n ukupni broj mjerenja.

Utjecaj ove pojave nije prikazan u tablici 8., već će biti uvršten u krajnjem računu, a sastojat će se od ukupnog vremena privlačenja t_{dod} i potrošnje goriva g_{dod} koje za prvi radni dan iznose:

$$t_{dod} = 10 \text{ s},$$

$$g_{dod} = 0.024 \text{ l}.$$

Jedan puni ciklus se sastoji od vožnje skidera do mjesta eksploatacije, operacije vitlom i vuče tereta do mjesta prihvata:

$$T_{ciklus1} = 2 \cdot t_{vožnje} + t_v + t_{\check{c}} + \frac{1}{2} \cdot t_{dod}, \quad (25)$$

gdje je $T_{ciklus1}$ vrijeme izvođenja jednog ciklusa prvog radnog dana, t_v vrijeme privitlavanja, $t_{\check{c}}$ vrijeme čekanja, $t_{vožnje}$ duljina trajanja vožnje i t_{dod} vrijeme prilikom ponovnog privlačenja tereta uslijed proklizavanja. To dodatno vrijeme množimo sa 0.5 zbog vjerojatnosti od 50% da će se pojaviti prilikom jednog ciklusa. Za prvi ciklus dobivamo ukupno vrijeme prema (25):

$$T_{ciklus1} = 961 \text{ s}.$$

Za izračun potrošnje goriva jednog punog ciklusa koristimo izraz:

$$g_{ciklus1} = 2 \cdot g_{vožnje} + g_v + g_{\check{c}} + \frac{1}{2} \cdot g_{dod}. \quad (26)$$

gdje je $g_{ciklus1}$ ukupno potrošeno goriva za jedan ciklus u prvom radnom danu, $g_{vožnje}$ potrošeno goriva za jednu vožnju, g_v za privitlavanje, g_v u čekanju i g_{dod} usred proklizavanja.

Ukupno utrošak goriva u prvom ciklusu prema (26) iznosi:

$$g_{ciklus1} = 3.04 \text{ l.}$$

Isti postupak ponavljamo za ostalih sedam ciklusa čija su potrošnja goriva i duljina trajanja prikazani u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati za prvi radni dan

Ciklus	T_{ciklus} [s]	g_{ciklus} [l]
1	961	3.04
2	1103	3.75
3	806	2.36
4	914	2.33
5	917	2.64
6	955	2.84
7	922	2.76
8	1099	3.30
Prosjek:	960	2.88

Računajući da se radni dan sastoji od osam sati, možemo odraditi 30 ciklusa računajući sa prosječnom vrijednošću iz tablice 8. Ukupno potrošeno gorivo iznosi tijekom prvog radnog dana iznosi 86.3 litre.

5.3. Drugi radni dan

Drugi radni dan se sastoji od ukupno 16 različitih vožnji, a njezini parametri te potrošnja goriva i trajanje su prikazani u tablici 9. Također je pretpostavljeno osam različitih masa tereta i kombinacija parametara staze koji su raspoređeni po tri rute.

Tablica 9. Vožnje za drugi radni dan

Staza-smjer-teret m_t [t]	l [km]	f	μ_p	k	Trajanje vožnje [s]	Potrošeno goriva g_k [l]
Staza 4 - uzbrdo – 4.8	1.92	0.12	0.44	0.47	1436	5.65
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.12	0	0	576	0.84
Staza 4 - ubrzdo - 5.3	1.92	0.13	0.47	0.42	1675	6.40
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.13	0	0	578	0.90
Staza 4 - uzbrdo - 2.8	1.92	0.17	0.40	0.51	1183	4.86
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.17	0	0	606	1.15
Staza 5 - uzbrdo - 4.4	2.53	0.15	0.37	0.46	1888	6.96
Staza 5 - nizbrdo - 0	2.53	0.15	0	0	813	1.68
Staza 5 - uzbrdo - 6	2.53	0.11	0.45	0.48	2205	8.15
Staza 5 - nizbrdo - 0	2.53	0.11	0	0	792	1.38
Staza 6 - uzbrdo – 5.3	3.53	0.14	0.45	0.39	2280	9.10
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.14	0	0	1064	2.89
Staza 6 - uzbrdo – 4.6	3.53	0.13	0.42	0.44	1989	8.04
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.13	0	0	1047	2.77
Staza 6 - uzbrdo – 3.1	3.53	0.16	0.39	0.39	1713	6.84
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.16	0	0	1118	3.16

Duljine vožnji su znatno duže od onih iz prvog dana, stoga je i potrošnja goriva po pojedinoj vožnji veća. Kao što je i slučaj kod prvog radnog dana, duljina vožnje i ukupna potrošnja najviše ovise o masi tereta, ali i kod vožnji bez tereta povećanje faktora kotrljanja od 0.05 povećava potrošnju goriva za čak 37%.

Vremena čekanja, privitlavanja i potrošnja goriva za operacije vitlom drugog radnog dana prikazane su u tablici 10. Koriste se iste mase i faktori privlačenja kao i u tablici 9.

Tablica 10. Operacije vitlom za drugi radni dan

Duljina privitlavanja [m]	m_t [t]	α [°]	μ_p	$t_{\check{c}} / t_v$ [s]	Potrošeno goriva [l] vitlo/čekanje	Ukupno trajanje [s]
17	4.8	15	0.44	63 / 17	0.044 / 0.040	80
25	5.3	23	0.47	89 / 24	0.068 / 0.056	113
35	2.8	18	0.40	61 / 18	0.038 / 0.030	79
14	4.4	22	0.47	53 / 14	0.035 / 0.033	67
28	6	12	0.45	99 / 27	0.082 / 0.062	126
10	5.3	26	0.45	44 / 10	0.026 / 0.027	54
19	4.6	17	0.42	69 / 19	0.046 / 0.043	88
12	3.1	21	0.39	44 / 12	0.021 / 0.028	56

Vrijednosti vremena i potrošnje goriva za cikluse drugog radnog dana također računamo prema (25) i (26).

Rezultati za drugi radni dan su prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Rezultati za drugi radni dan

Ciklus	T_{ciklus} [s]	g_{ciklus} [l]
1	2102	6.60
2	2376	7.45
3	1878	6.10
4	2778	8.74
5	3133	9.70
6	3408	12.07
7	3134	10.92
8	2897	10.07
Prosjek:	2714	8.96

U drugom radnom danu je moguće odraditi deset punih ciklusa računajući s prosječnim vrijednostima iz tablice 11.

Ukupni podaci i udijeli pojedinih aktivnosti u ukupnom vremenu i potrošnji za oba radna dana su prikazani u tablici 12.

Tablica 12. Ukupni podaci za oba radna dana

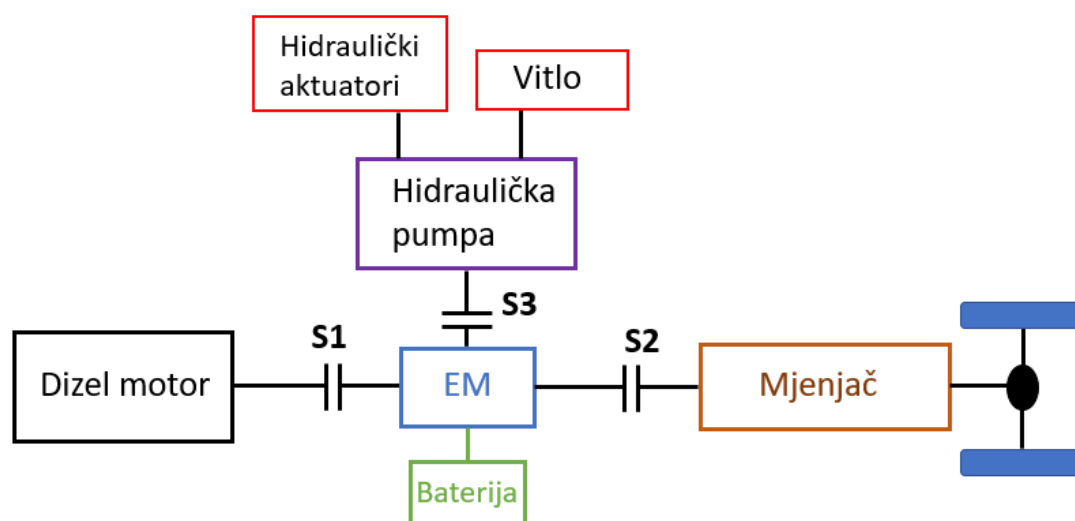
Prvi radni dan	Vrijeme	Udio u vremenu [%]	Potoršeno goriva [l]	Udio u potrošnji [%]
Ukupno	8 h		86.3	
Vožnja	7h i 12 min	90	82.76	96
Vitlo	12 min	2.5	2.12	2.46
Čekanje	36 min	7.5	1.41	1.54
Drugi radni dan	Vrijeme	Udio u vremenu [%]	Potoršeno goriva [l]	Udio u potrošnji [%]
Ukupno	7 h i 34 min		89.60	
Vožnja	7 h i 17 min	96.57	88.4	98.66
Vitlo	5 min	1.02	0.69	0.76
Čekanje	12 min	2.41	0.4	0.45

6. ODABIR STRUKTURE HIBRIDNOG POGONA

Glavni i prvi uvjet hibridizacije je zadržavanje svih svojstava konvencionalnog pogona uz njegovu minimalnu modifikaciju. Kod vozila ovakvih primjena dobitak na performansama uvođenjem hibridnog sustava kao što su bolja ubrzanja, ugodnija vožnja nisu bitna. Jedino što se pokušava smanjiti uvođenjem hibridnog sustava je potrošnja goriva i emisija CO₂ ispušnih plinova. Analizom rezultata za konvencionalni pogon, ponajviše momenta dizelskog motora mogu se uočiti vršne vrijednosti koje se većinom javljaju prilikom velikih nagiba i ubrzavanja. Dodavanjem elektromotora te vrijednosti bi se mogle pokriti te samim time i smanjiti opterećenje dizelskog motora i potrošnja. Na mjestima gdje on nije previše opterećen također može poslužiti za punjenje baterije.

Velike uštede se mogu postići prilikom korištenja vitla gdje je vozilo stacionirano. Iz rezultata za konvencionalni pogon je vidljivo da veliki dio vremena otpada na čekanje vozila u kojem ono nepotrebno troši gorivo. Uvođenjem takozvane „start-stop“ funkcije prilikom privitlavanja i mirovanja vozila moguće je isključiti dizelski motor. U tom slučaju elektromotor bi preuzeo pogon hidrauličkih pumpi.

Kod vozila ovakve primjene potrebno je voditi računa i o robusnosti same izvedbe i ograničenju ugradbenog mjesta. Odabire se P2 paralelna hibridna konfiguracija. Za njenu izvedbu nije potrebno puno izmjena postojećeg vozila, a omogućila bi sve nabrojane zahtjeve. Predložena konfiguracija je prikazana na slici 34.



Slika 34. P2 hibridna struktura

Nabrojane zahtjeve možemo podijeliti na takozvane režime rada. Način rada pogonskog sustava ovisno o režimu rada prikazan je tablicom 13.

Tablica 13. Režimi rada hibridnog pogona

Režim rada	Dizel	EM	S1	S2	S3
Rad u optimalnom području	Radi	slobodno se vrti	spojena	spojena	odspojena
Mala potreba za snagom	Radi	u generatorskom	spojena	spojena	odspojena
Velika potreba za snagom	Radi	u motorskom	spojena	spojena	odspojena
Regenerativno kočenje	Radi	u generatorskom	odspojena	spojena	odspojena
Rad vitla	Ugašen	u motorskom	odspojena	odspojena	spojena
Stacionarno stanje, rad hidrauličkih aktuatora	Ugašen	u motorskom	odspojena	odpojena	spojena

Glavni uvjet mogućnosti ulaska u određeni režim rada bit će određen trenutnim stanjem napunjenosti baterije. Iako bi u nekim situacijama elektromotor bio dovoljan za pogon vozila, zbog nepredvidljivosti voznih uvjeta, odnosno naglih promjena u potrebni za snagom, dizelski motor se za vrijeme vožnje nikada neće isključivati.

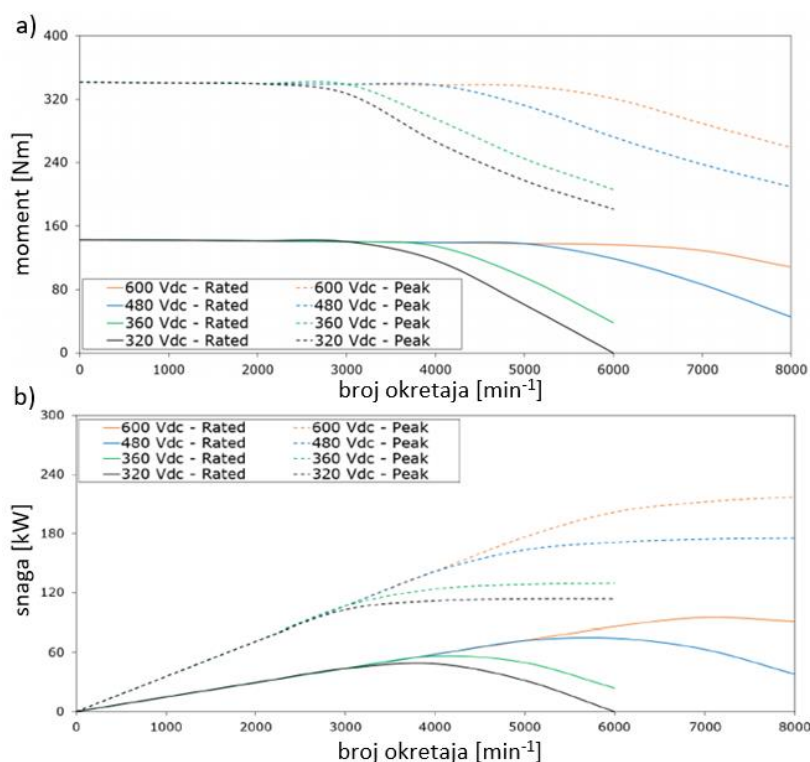
6.1. Odabir elektromotora

Elektromotor će kompletno preuzeti pogon hidrauličkih komponenti među kojima se nalazi pogon vitla i ostali aktuatori (lom šasije, aktiviranje odzivnih daske). Od nabrojanih vitlo predstavlja najveći potrošač te će stoga baterija i elektromotora dimenzionirati kako bi njegove karakteristike ostale nepromijenjene. Izračunata najveća vučna sila vitla iznosi 66 kN, a maksimalna brzina privitlavanja 1.26 m/s iz čega dobivamo najveću snagu vitla:

$$P_{v maks} = F_{v maks} \cdot v_{v maks},$$

$$P_{v maks} = 83.16 kW.$$

Elektromotor se izabire kako bi zadovoljio potrebe za snagom vitla. On će biti smješten između dizelskog motora i mjenjačke kutije. Potrebno ga je odvojiti spojkom od dizelskog motora i kotača kako bi mogao raditi dok je vozilo stacionarno, a dizelski motor ugašen. Spojke su prikazane na slici pod nazivom S1 i S2 (slika 34). Odabran je sinkroni elektromotor AF 130 nazivnog momenta od 145 Nm i snage 64 kW. Elektromotor ima mogućnost isporučivati snagu od 100 kW do 60 sekundi što je zadovoljavajuće ako se od vitla zahtijevaju maksimalne brzine privlačenja kod maksimalnih masa tereta. Momentna karakteristika i krivulja snage je vidljiva na slici 35.



Slika 35. Momentna karakteristika (a) i krivulja snage (b) AF130 elektromotora [22]

Osnovne karakteristike izabranog elektromotora prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Karakteristike elektromotora AF130 [22]

	AF 130
Nazovni moment M_{EM} [Nm]	145
Nazivna snaga P_{EM} [kW]	64
Vršna snaga-do 60 s [kW]	100
Radijus-duljina [mm]	300-110
Masa m_{EM} [kg]	30.5

6.2. Odabir baterije

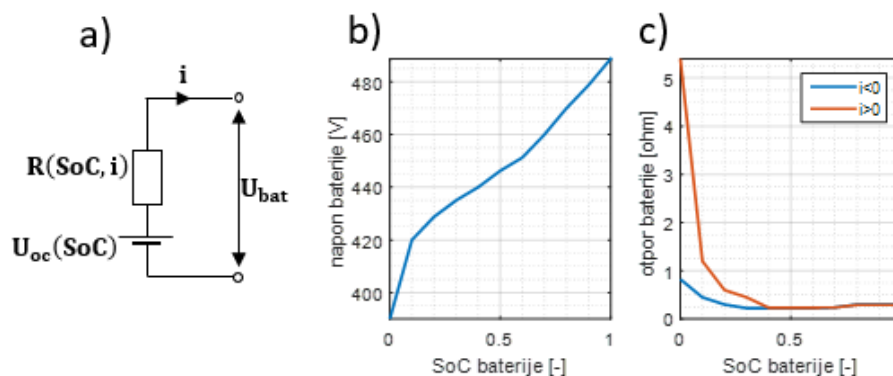
Bateriju čine litij-ionske ćelije zbog njihove dostupnosti, velike gustoće energije i izdržljivosti što je vrlo bitno kod ovakve primjene. Broj ćelija se odabire kako bi baterija bila u mogućnosti isporučiti dovoljno snaga pri maksimalno opterećenom (83 kW). Odabrano je 250 ćelija podijeljeno u dva paralelna bloka s po 125 ćelija u seriji koje zajedno mogu isporučiti 100 kW.

Parametri jedne ćelije [23] i izabrane baterije su prikazani u tablici 15.

Tablica 15. Parametri jedne ćelije i izabrane baterije

	Broj N	E (kWh)	Q_{maks} (Ah)	P_{maks} (kW)	m_{bat} (kg)
Ćelija	1	0.06	15.9	0.4	0.63
Baterija	250	15	31.8	100	157.5

Ekvivalentni strujni krug, naponska karakteristika i unutarnji otpor baterije izvedeni iz njega su prikazani na slici 36.



Slika 36. Ekvivalentni strujni krug (a), naponska karakteristika (b) i otpor baterije (c)

Model baterije se izvodi prema [24] iz ekvivalentnog strujnog kruga prikazanog na slici 36. Pražnjenje baterije je definirano prema izrazu:

$$\frac{d\text{SoC}}{dt} = \frac{-i(t)}{Q_{maks}}, \quad (27)$$

gdje je $d\text{SoC}$ promjena napunjenosti baterije, Q_{maks} maksimalni kapacitet, $i(t)$ struja baterije.

Iz ekvivalentnog strujnog kruga baterije na slici 36a. računamo ukupni napon ekvivalentnog strujnog kruga:

$$U_{bat} = R_{bat}(SoC, i) \cdot i_{bat} + U_o(SoC), \quad (28)$$

gdje su U_{bat} napon baterije, R_{bat} otpor baterije i U_o napon otvorenog strujnog kruga. Napon otvorenog strujnog kruga je funkcija napunjenosti baterije SoC , dok je unutarnji otpor napunjenosti baterije i smjera struje.

Nadalje računamo snagu baterije:

$$P_{bat} = i_{bat} \cdot U_{bat}. \quad (29)$$

Uvrštavanjem izraza (28) u (29), izlučivanjem struje baterije i uvrštavanjem u (27) dolazimo do dobro poznatog izraza ovisnosti promjene napunjenosti baterije o njenim karakteristikama i snagi koju ona daje ili prima:

$$P_{bat} = R_{bat}(SoC, i) \cdot i_{bat}^2 + U_o(SoC) \cdot i_{bat}, \quad (30)$$

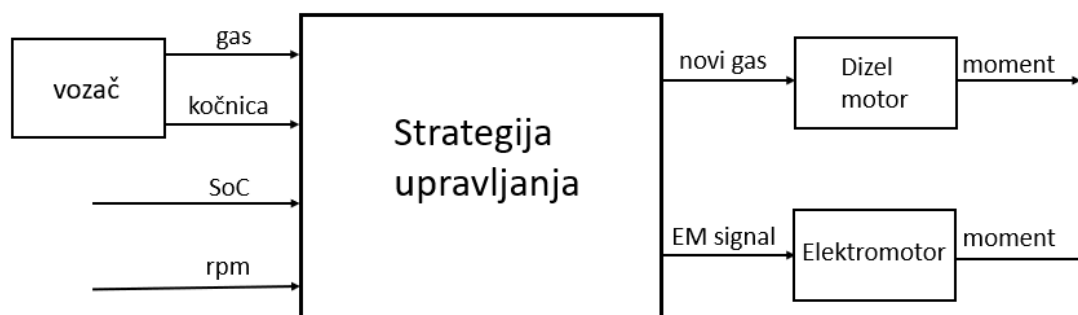
$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\sqrt{U_o^2(SoC) - 4R_{bat}(SoC, i) \cdot P_{bat}} - U_o(SoC)}{2Q_{maks} \cdot R_{bat}(SoC, i)}. \quad (31)$$

Ukupna masa odabrane baterije i elektromotora iznosi 188 kilograma što na ukupnu masu skidera od 7200 kilograma iznosi povećanje od samo 2.6 %. Iako je u ukupnu dodanu masu potrebno uračunati i masu hlađenja baterija, pretvarača i ostalih popratnih dijelova povećanje mase ne bi trebalo značajnije prelaziti, stoga bi promjene voznih karakteristika bile zanemarive.

6.3. Upravljanje hibridnim pogonom

Kako bi se uštedjelo što više goriva potrebno je uvesti odgovarajući strategiju upravljanja koja raspoređuje snaga između dizelskog motora i elektromotora odnosno ulaziti u pojedine režime rada navedene u tablici 13. Prilikom rada vitla dizelski motor vozila je ugašen te elektromotor preuzima njegovu ulogu. Također je uvedena i takozvana „start-stop“ funkcija kod koje se prilikom zaustavljanja vozila dizelski motor isključuje, a sve ostale zadaće pokretanja hidrauličkih aktuatora preuzima elektromotor.

U ukupni model vozila se dodaje blok strategije upravljanja koji je prikazan na slici 37.

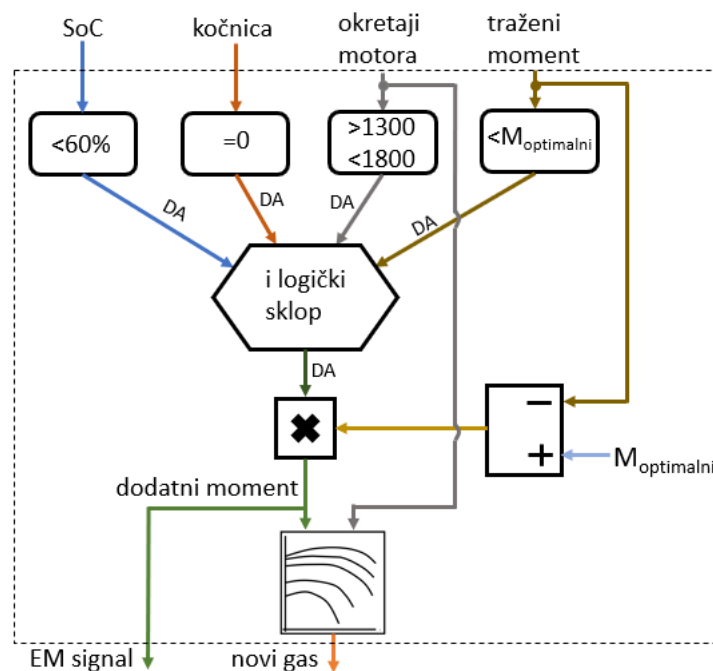


Slika 37. Shema strategije hibridnog upravljanja

Gas i kočnica koju zadaje vozač kod hibridnog vozila prvo ulaze u blok strategije upravljanja iz kojeg se ovisno o njegovim ulaznim parametrima zadaje novi gas dizelskom motoru i signal elektromotoru. Za vrijeme vožnje moguća su četiri načina vožnje: rad samo dizelskog motora, dizelski motor potpomognut elektromotorom, dizelski motor koji istovremeno puni baterije i regenerativno kočenje.

6.3.1. Punjenje baterije

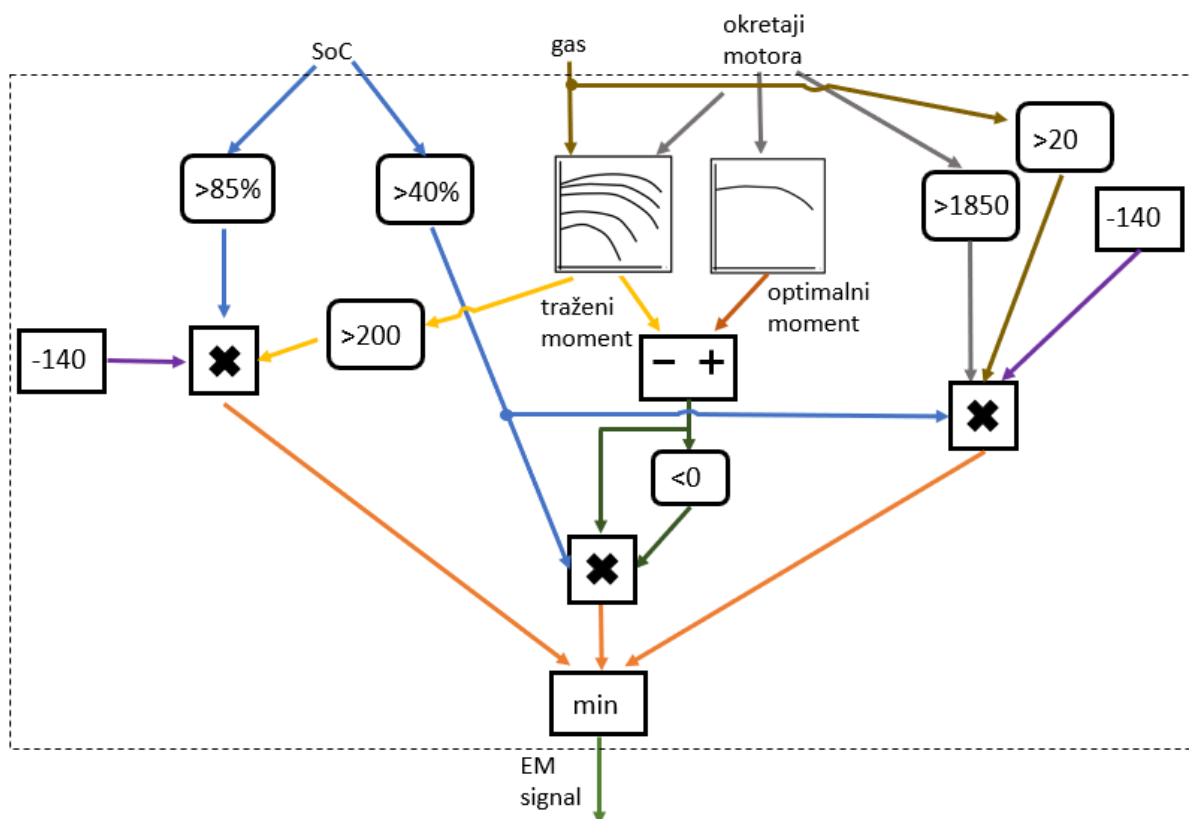
Ako napunjenost baterije (SoC) padne ispod granične vrijednosti dizelski motor prilikom vožnje u isto vrijeme i puni bateriju preko generatora. Granična vrijednost je postavljena na 60% napunjenosti. U svakom trenutku se provjerava položaj kočnice koja svojom aktivacijom isključuje mogućnost punjenja baterije preko dizelskog motora. Nakon što su zadovoljena oba uvjeta provjerava se moment koji zahtjeva vozač u odnosu na optimalni moment. Najefikasnije područje se nalazi između 1300 i 1800 okretaja u minuti, što je i vidljivo iz karakteristike na slici 11. Ako je traženi moment manji od optimalnog i nalazimo se u tom radnom području hibridni modul daje zahtjev za većim gasom dizelskom motoru kako bi on stvarao dodatni moment i pritom punio bateriju. Logika je prikazana na slici 38.



Slika 38. Logika za punjenje

6.3.2. Dodatni moment od elektromotora

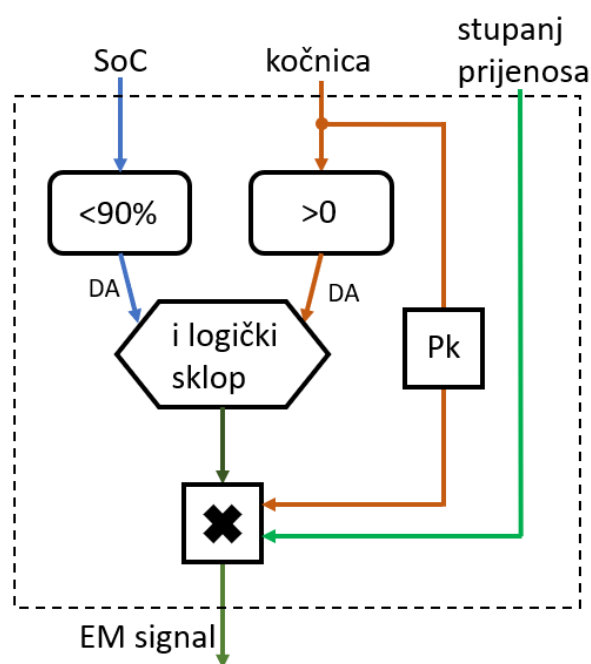
Ukupna logika se sastoji od tri dijela. Ako je napunjenost baterije iznad 40% moguće je uključiti elektromotor koji pomaže dizelskom motoru. Ako je traženi moment iznad optimalne krivulje, a zadovoljen je početni uvjet, šalje se zahtjev za gasom dizelskom motoru koji isporučuje toliko momenta da ostane na optimalnoj krivulji dok se ostatak pokriva elektromotorom. Područje koje se tako može pokriti je relativno malo te sav kapacitet nebi mogao biti iskorišten te se dodaju još dva slučaja uključivanja elektromotora. Ako se radna točka nalazi iznad 1850 min^{-1} i pritisnuta je papučica gasa elektromotor preuzima dio opterećenja. Na vožnjama s velikim nagibima i manjim teretima dolazi do zasićenja baterije, odnosno nemogućnosti pohrane snage od regenerativnog kočenja. Kako bi se izbjegli ti slučajevi dodaje se i treći slučaj pri kojemu se uključuje elektromotor. Ako je napunjenost baterija veća od 85% uključuje se elektromotor i pomaže dizelskom neovisno o radnom području. Sva tri signala ulaze u blok „min“ u kojemu se odabire najmanja vrijednost koja ujedno i postaje signal elektromotoru.



Slika 39. Logika za uključivanje elektromotora

6.3.3. Regenerativno kočenje

Prilikom svakog kočenja registrira se signal pedale kočnice. Ako je pritom napunjenost baterije ispod 90% šalje se signal elektromotoru koji pritom radi u generatorskom načinu i ovisno o jačini pritiska na kočnicu daje silu kočenja. Blok Pk predstavlja pojačanje kočnice pomoću kojeg se iz kočnice dobiva sila kočenja. Ukupna sila kočenja ostvarena pomoću elektromotora ovisi o stupnju prijenosa u kojemu se nalazi mjenjačka kutija u tom trenutku. Ako ona nije dovoljna, ostatak sile se ostvaruje klasičnim kočnim uređajima. Logika regenerativnog kočenja je prikazana na slici 40.



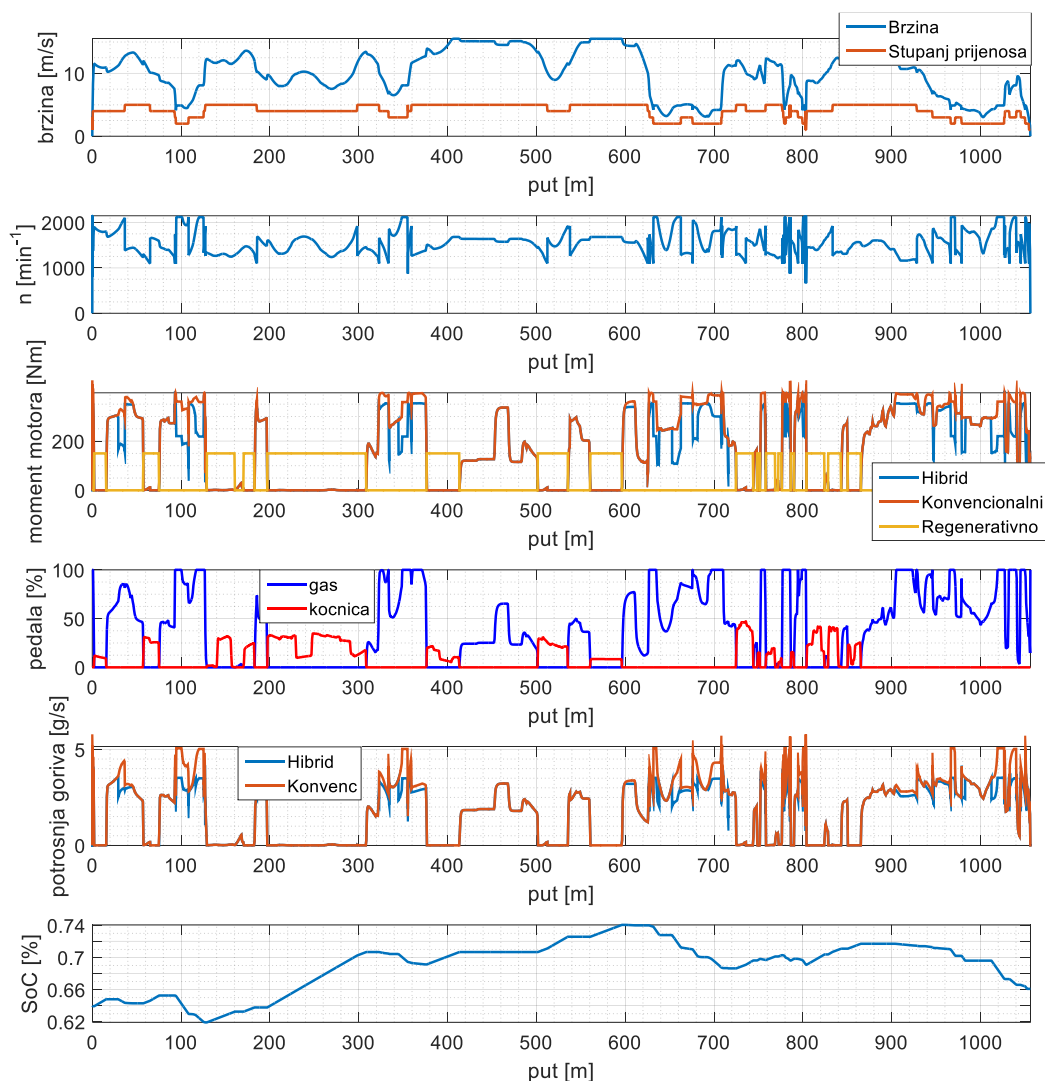
Slika 40. Logika za regenerativno kočenje

7. ANALIZA RADA HIBRIDNOG SKIDERA

U ovom poglavlju prikazani su vremenski dijagrami za jednu vožnje dok su rezultati za sve vožnje kroz oba radna dana dani u tablicama. Tereti i parametri staze biti će isti kao i oni kod konvencionalnog vozila kako bi se kasnije mogla napraviti usporedba. Vremenski dijagrami za svaku provedenu vožnju se nalaze u dodatku.

7.1. Rezultati pojedine vožnje

Na slici 41. su prikazani rezultati za jednu od vožnji hibridnog vozila.



Slika 41. Rezultati hibridnog vozila

Iz slike 41. je vidljivo kako motor radi u optimalnom području i troši manje goriva nego konvencionalni pogon. Pritom se troši baterija i smanjuje njena napunjenost. Dok je pritisnuta kočnica uključeno je regenerativno kočenje prilikom kojeg se puni baterija.

7.2. Rezultati hibridnog vozila za prvi radni dan

U tablici 15. je prikazano ukupno 16 vožnji koje su raspoređeno na tri staze. Skider je počeo radni dan sa 90% napunjenosti baterije.

Tablica 15. Vožnje prvog radnog dana hibridnog vozila

Staza-smjer-teret [t]	l_s [km]	f	μ_p	k	SoC ₀ / Δ SoC [%]	Trajanje vožnje [s]	Potrošeno goriva g_h [l]
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.17	0	0	90 / -32	455	1.46
Staza 2 - nizbrdo - 4.5	1.06	0.17	0.36	0.46	41 / +10	450	1.12
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.15	0	0	51 / -11	436	1.49
Staza 2 - nizbrdo - 6	1.06	0.15	0.56	0.4	36 / +4	603	1.82
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.13	0	0	40 / +2	408	1.47
Staza 2 - nizbrdo - 1.3	1.06	0.13	0.56	0.4	41 / +14	359	0.67
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.10	0	0	55 / -8	385	1.24
Staza 2 - nizbrdo - 3.6	1.06	0.10	0.43	0.6	43 / +16	376	0.71
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.15	0	0	59 / -15	408	1.31
Staza 3 - nizbrdo - 3	0.907	0.15	0.6	0.5	42 / +10	413	0.95
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.13	0	0	52 / -10	397	1.27
Staza 3 - nizbrdo - 6	0.907	0.13	0.48	0.5	40 / +11	478	1.16
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.11	0	0	51 / -10	382	1.20
Staza 3 - nizbrdo - 5.1	0.907	0.11	0.52	0.47	37 / +17	451	1.06
Staza 3 - uzbrdo - 0	0.907	0.18	0	0	54 / -12	446	1.49
Staza 3 - nizbrdo - 5.5	0.907	0.18	0.52	0.47	36 / +13	516	1.39
Staza 2 - uzbrdo - 0	1.06	0.17	0	0	63 / -21	455	1.55

Iz tablice 15. možemo zaključiti kako je u svim vožnjama postignuto smanjenje potrošnje goriva koje se kreće između 5 i 13 %. Kod svih vožnji nizbrdo napunjenost baterije je porasla. Najveće pražnjenje baterije se ostvarilo prilikom prve vožnje uzbrdo s obzirom na to kako je početno stanje napunjenosti baterije bilo 90% te je stoga dovelo do veće uporabe elektromotora pri pogonu. Najveća punjenja se zbog regenerativnog kočenja ostvaruju prilikom vožnji

nizbrdo, a raste što je teret, odnosno opterećenje manje. Na početku svake vožnje s teretom, početno stanje napunjenosti baterije umanjeno je za postotak koji se potrošio na rad vitla koji je vidljiv iz tablice 16. Nakon obavljenih osam ciklusa baterija se nalazi na 42% napunjenosti što je pad od 38%. Ako se radi o takozvanom „plug-in hibridu“ čija se baterija može puniti preko vanjskog izvora dok je vozilo stacionirano, vozilo prvu vožnju obavlja s napunjenom baterijom što je i vidljivo u tablici 15. Takvo stanje baterije je moguće samo na početku prve vožnje u danu te za točniji izračun ukupnu uštede uzimamo početno stanje baterije od 63%. Nakon izvršenih osam ciklusa sa početnom vrijednosti od 63% je došlo do pada napunjenost baterije od 21 %. Time radimo zanemarivu pogrešku prilikom računanja ukupne potrošnje goriva. Ta vožnja je prikazana u tablici 15. i označena je svjetlom bojom i korištena je prilikom daljnjeg izračuna.

U tablici 16. su prikazane promjene napunjenosti baterije nakon obavljanja privitlavanja tereta. Početno stanje napunjenosti baterije je prilikom računanja iznosilo 65%.

Tablica 16. Stanje baterije pri radu vitla za prvi radni dan

Duljina privitlavanja [m]	m_t [t]	α [°]	μ_p	t_{ξ} / t_v [s]	ΔSoC [%]	Ukupno trajanje [s]
10	4.5	14	0.6	41 / 10	-1.8	51
23	6	25	0.56	84 / 22	-4.8	106
9	1.3	19	0.34	30 / 9	-0.3	39
35	3.6	21	0.51	114 / 34	-4.2	148
21	3	11	0.43	71 / 20	-1.8	91
15	6	27	0.42	60 / 15	-2.3	75
19	5.1	16	0.6	70 / 19	-3.9	89
31	5.5	20	0.48	107 / 30	-5.3	137

Baterija se za vrijeme privitlavanja isprazni za maksimalno 5%.

Ukupno vrijeme trajanja će se za hibridno vozilo također računati prema (20), dok će se ukupna potrošnja samo kao zbroj potrošenog goriva tijekom vožnje.

Rezultati za prvi radni dan hibridnog vozila su prikazani u tablici 17.

Tablica 17. Rezultati za prvi radni dan hibridnog vozila

Ciklus	T_{ciklus} [s]	g_{ciklus} [l]	ΔSoC [%]
1	961	2.67	-11
2	1103	3.31	-7
3	806	2.14	+16
4	914	1.95	+8
5	917	2.26	-5
6	955	2.43	+1
7	922	2.26	+7
8	1099	2.88	+1
Prosjek:	960	2.49	

Prosječna potrošnja goriva za jedan ciklus hibridnog vozila iznosi 2.49 litara u odnosu na 2.88 litara konvencionalnog što predstavlja uštedu od 13.5 %.

7.3. Rezultati hibridnog vozila za drugi radni dan

Tablica 18. Stanje baterije pri radu vitla za drugi radni dan

Duljina privitlavanja [m]	m_t [t]	α [°]	μ_p	t_{ξ} / t_v [s]	ΔSoC [%]	Ukupno trajanje [s]
17	4.8	15	0.44	63 / 17	-2.4	80
25	5.3	23	0.47	89 / 24	-4	113
35	2.8	18	0.40	61 / 18	-2.6	79
14	4.4	22	0.47	53 / 14	-1.8	67
28	6	12	0.45	99 / 27	-5.1	126
10	5.3	26	0.45	44 / 10	-1.5	54
19	4.6	17	0.42	69 / 19	-2.4	88
12	3.1	21	0.39	44 / 12	-0.9	56

U tablici 18. je prikazana promjena napunjenosti baterije prilikom rada vitla za terete i parametre staze koji se koriste u drugom radnom danu.

Skider započinje dan sa 63% napunjenosti baterije. Vožnje za drugi radni dan su prikazane u tablici 19.

Tablica 19. Vožnje drugog radnog dana hibridnog vozila

Staza-smjer-teret m_t [t]	l [km]	f	μ_p	k	SoC _o / Δ SoC [%]	Trajanje vožnje [s]	Potrošeno goriva g_h [l]
Staza 4 - uzbrdo – 4.8	1.92	0.12	0.44	0.47	63 / -16	1436	5.46
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.12	0	0	47 / +33	576	0.76
Staza 4 - ubrzdo - 5.3	1.92	0.13	0.47	0.42	76 / -27	1675	6.15
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.13	0	0	49 / +31	578	0.81
Staza 4 - uzbrdo - 2.8	1.92	0.17	0.40	0.51	77 / -36	1183	4.58
Staza 4 - nizbrdo - 0	1.92	0.17	0	0	41 / + 32	606	1.10
Staza 5 - uzbrdo - 4.4	2.53	0.15	0.37	0.46	71 / -19	1888	6.67
Staza 5 - nizbrdo - 0	2.53	0.15	0	0	52 / +26	813	1.51
Staza 5 - uzbrdo - 6	2.53	0.11	0.45	0.48	82 / -30	2113	7.30
Staza 5 - nizbrdo - 0	2.53	0.11	0	0	52 / +43	792	1.28
Staza 6 - uzbrdo – 5.3	3.53	0.14	0.45	0.39	93 / -43	2280	8.50
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.14	0	0	40 / +13	1064	2.70
Staza 6 - uzbrdo – 4.6	3.53	0.13	0.42	0.44	51 / -11	1989	7.75
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.13	0	0	40 / +15	1047	2.59
Staza 6 - uzbrdo – 3.1	3.53	0.16	0.39	0.39	54 / -14	1713	6.56
Staza 6 - nizbrdo – 0	3.53	0.16	0	0	40 / +14	1118	3.04

Rezultati za prvi radni dan hibridnog vozila su prikazani u tablici 20.

Tablica 20. Rezultati za drugi radni dan hibridnog vozila

Ciklus	T_{ciklus} [s]	g_{ciklus} [l]	ΔSoC [%]
1	2102	6.22	+17
2	2376	6.96	+4
3	1878	5.68	-4
4	2778	8.18	+7
5	3133	8.58	+13
6	3408	11.20	-30
7	3134	10.34	+4
8	2897	9.60	0
Prosjek:	2714	8.34	

Prosječna potrošnja goriva jednog ciklusa drugog radno dana hibridnog vozila iznosi 8.34 litre što predstavlja uštedu od 7.37 %. Uzimajući u obzir dvostruko veću zastupljenost prvog radnog dana ukupna ušteda goriva iznosi 11.45%.

8. ANALIZA TROŠKOVA

Litij-ionske baterije u prosjeku mogu izdržati do 2000 ciklusa gdje je periodički napunjena do 80% i ispražnjena do kraja [25]. Kod ovako nepredvidivih primjena nije moguće odrediti vremensko razdoblje u kojem će se dogoditi cjelokupno pražnjenje i punjenje te će se pretpostaviti da će to biti jedan radni dan. Jedna godina ima 285 radnih dana te s time dobivamo životni vijek baterije od sedam godina. Računamo da skider svaki dan radi po osam sati što iznosi 2280 radnih godišnje. Za litru dizela je potrebno izdvojiti 9.32 kn prema podacima iz [26]. U tablici 21. usporedit će se troškovi hibridnog vozila kroz period od sedam godina.

Tablica 21. Usporedba troškova rada skidera

Radno vrijeme	Konvencionalno vozilo g_k [l]	Hibridno vozilo g_h [l]	Ušteda goriva [l]	Ušteda [kn]	Smanjenje CO ₂ [t]
dan	87.5	77.6	9.9	92.3	0.024
mjesec	2012	1785	227	2115	0.544
godina	24150	21420	2724	25388	6.54
7 godina	169050	149940	19068	177714	45.8

Prosječna ušteda goriva iznosi 11.45 %, a kroz jedan životni vijek baterije je moguće uštediti oko 177 tisuća kuna i smanjiti emisiju CO₂ za čak 45.8 tona.

Godine 2019. prosječna cijena litij-ionskih baterija po kWh je iznosila 1186 kuna [27]. Svaka dodatna komponenta uz cijenovni trošak predstavlja i povećanje emisije CO₂ koje se emitira prilikom njene proizvodnje. Emisija stakleničkih plinova prilikom proizvodnje baterija je dobro analizirana, ali uvelike ovisi o samom mjestu (Europa, Kina, SAD) i metodi izrade. Vrijednosti CO₂ se kreću između 56 i 494 kg/kWh [28], a za potrebe ovog rada uzima se prosječna vrijednost. Cijena elektromotora prema dobavljaču iznosi 35000 kuna [29].

Ukupna cijena elektromotora i baterije izabrane u ovom radu te CO₂ prilikom proizvodnje baterije su prikazane u tablici 22.

Tablica 22. Troškovi komponenti

Komponenta	Cijena [kn]	CO ₂ za proizvodnju [t/kWh]
Baterija 1 kWh	1186	0.275
Baterija 15 kWh	17784	4.125
Elektromotor 64 kW	35000	-

Prema tablici 22. ukupni troškovi hibridnih komponenti iznose 52784 kuna. Potrebno je 25 mjeseci kontinuiranog rada da bi se isplatila ugradnja hibridnog sustava, a kroz jedan radni vijek baterije je moguće uštediti oko 120 tisuća kuna, a pritom smanjiti emisiju CO₂ za 41 tonu. Prema podacima iz [17] u Hrvatskoj se trenutno nalazi 121 šumski zglobni traktor EcoTrac 120V. Potencijalnim uvođenjem hibridnog sustava u veći broj vozila nabavna cijena hibridnih komponenata opada [29], a ukupna ušteda u potrošnji goriva raste.

9. ZAKLJUČAK

Koristeći dostupne i poznate podatke za skider napravljen je kvazi statički model vozila. Podaci koji nisu bili dostupni su određeni prema uzoru na vozila sličnih karakteristika. Kroz pet voznih staza raspoređenih na dva radna dana napravljene su simulacije vožnji skidera s različitim teretima i uvjetima terena. Kroz različite radne scenarije izračunata je potrošnja goriva i vremena potrebna za njihovo izvođenje. Odabirom referentne brzine, mase tereta i duljine staza je vođena briga o postizanju što realnijih rezultata.

Nakon što su provedene sve potrebne simulacije konvencionalnog pogona provedena je njegova hibridizacija. Analizom dobivenih rezultata konvencionalnog vozila, radnih uvjeta i načina rada izabrana je P2 paralelna hibridna konfiguracija. Prilikom odabira hibridne konfiguracije vođeno je računa da izmjena na postojećem vozilu bude što manje. Postavljanjem elektromotora između dizelskog motora i mjenjačke kutije s kojime je odvojen pomoću dvije spojke omogućen je paralelan rad dizelskog motora i elektromotora. Konkretno, moguća su tri načina rada skidera: samo dizelski motor, dizelski motor potpomognut elektromotorom i dizelski motor kao pogonski motor koji paralelno puni bateriju. Elektromotor je preuzeo pogon hidrauličke pumpe koja pokreće vitlo i ostale aktuatore na vozilu. Dimenzije baterije i elektromotora su izabrane na temelju karakteristika postojećeg vitla s ciljem da oni kompletno preuzmu njegov pogon. Strategija upravljanja je odabrana pomoću mape specifične potrošnje goriva. Na mjestima optimalne potrošnje u slučaju prazne baterije dizelskom motoru se daje zahtjev za većim momentom gdje on prilikom pogona i puni bateriju. U slučaju rada pri mjestima veće potrošnje dizelskom motoru pomaže elektromotor i pritom prazni bateriju.

Sve simulacije s hibridnim pogonom su provedene na istim stazama i uvjetima kao i konvencionalni. Na kraju su uspoređene njihove potrošnje. Pokazana je ukupna ušteda goriva i novaca kroz jedan životni vijek baterije u koju je uračunata cijena novih hibridnih komponenti. Pokazano je kako je s odabranom konfiguracijom i strategijom upravljanja moguće postići uštede od oko 11%, dok se uvođenje hibridnog sustava može isplatiti kroz 25 mjeseci kontinuiranog rada skidera. Ovaj rad predstavlja tek pred-analizu te se uz dostupna mjerenja s terena na stvarnom postojećem skideru i prikladnijim metodama upravljanja mogu očekivati i nešto drugačiji rezultati.

Iako je ovdje izabrana hibridna konfiguracija koja ne zahtjeva puno izmjena postojećeg vozila, njen odabir kod stvarnog vozila uvelike će ovisiti o slobodnom prostoru na vozilu, mogućnosti promjene rasporeda postojećih dijelova i same cijene navedenih zahvata.

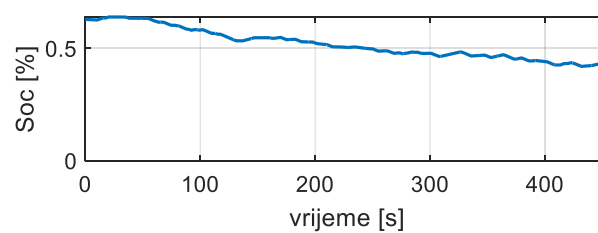
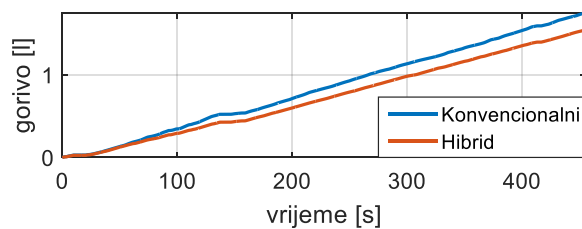
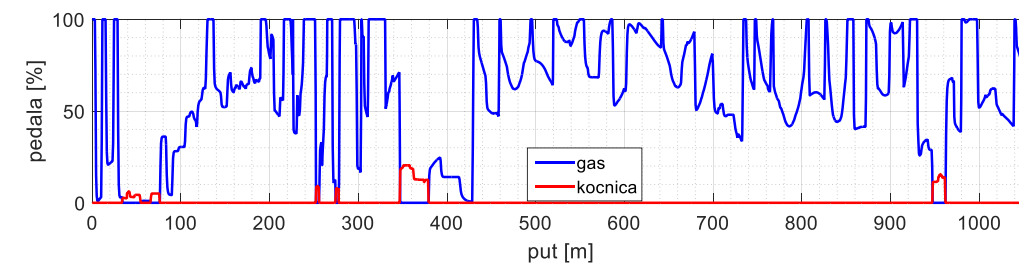
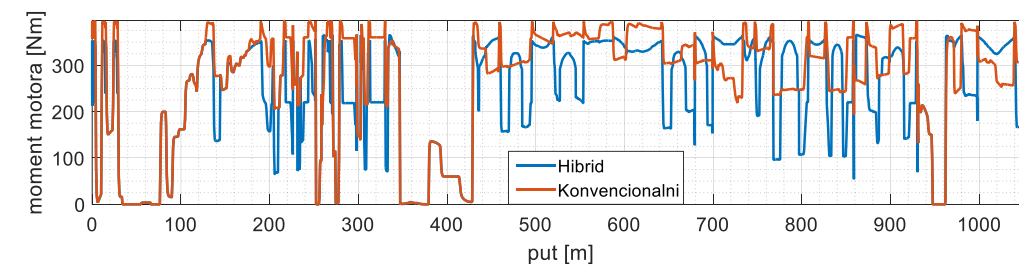
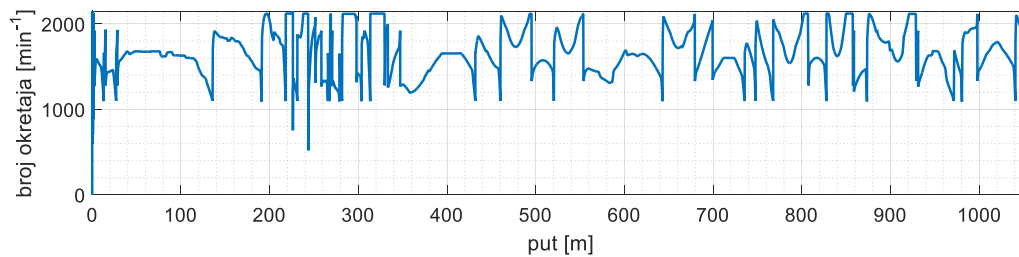
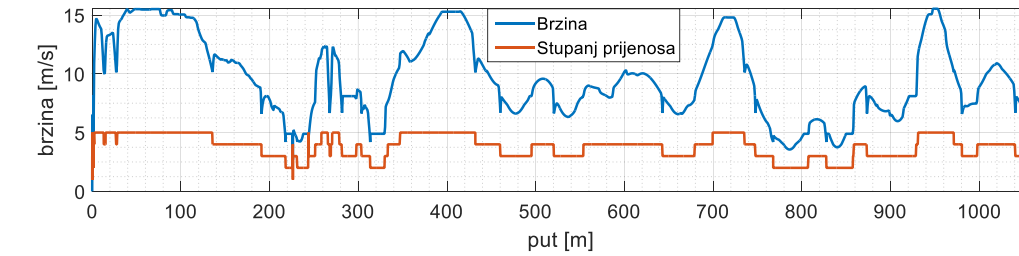
LITERATURA

- [1] Antii, L i dr.: Electric and hybrid electric non-road mobile machinery-present situation and future trends, 2016. <https://doi.org/10.3390/wevj8010172>
- [2] D. Vandenbroucke, A. Van Hyfte and L. Francx, Study in View of the Revision of Directive 97/68/EC on Non-Road Mobile Machinery (NRMM), Final Report, December 2010.
- [3] <https://flexim.sk/ponse-harvestory/ponse-ergo/>, 12.2.2020.
- [4] https://www.logset.com/sites/default/files/product-pdf/LOGSET_12H%20GTE%20Hybrid_EN_web.pdf, 13.2.2020.
- [5] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization. 2nd ed., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [6] Knežević, I. Diplomski rad, Zagreb, 2010.
- [7] <https://www.tractorforestier.ro/tractorul-forestier-hittner-120v-stocul-din-brasov>, 5.2.2020.
- [8] Horvat D., Goglia V., Šušnjar M., Đikić I.: „Izvešće o ispitivanju nekih tehničkih i ergonomskih značajki skidera „ECOTRAC 120V“ SAŽETAK“, Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [9] Šušnjar M.: Istraživanje međusobne ovisnosti značajki tla traktorske vlake i vučne značajke skidera, doktorska disertacija, Zagreb, 2005.
- [10] Certifikat D914L06, DEUTZ AG, DE-51057 Koln, 2004.
- [11] https://www.cmlabs.com/vortexstudiodocumentation/Vortex_User_Documentation/Content/Editor/editor_vs_configure_engine.html, 4.3.2020.
- [12] He H., Tang H., Wang X.: Global Optimal Energy Management Strategy Research for a Plug-In Series-Parallel Hybrid Electric Bus by Using Dynamic Programming, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/708261>
- [13] Seliž A., Specifičnosti sigurnosti pri radu skidera u fazi II. Iskorištavanju šuma, Završni rad, Karlovac, 2016.
- [14] <https://youtu.be/21KrLygVvWE>, 22.1.2020.
- [15] <https://youtu.be/-PGq6zMAsjA>, 22.1.2020.
- [16] Đuka A., Pentek T. i drugi: Modelling of Downhill Timber Skidding: Bigger Load – Bigger Slope, Zagreb, 2016.
- [17] Gregov G., Prilog istraživanju modeliranju hidrostatske transmisije na šumskom vozilu, Doktorska disertacija, Rijeka, 2012.

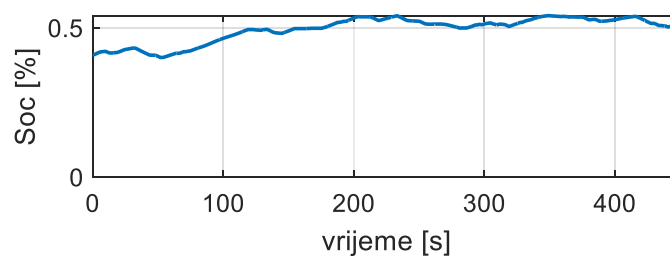
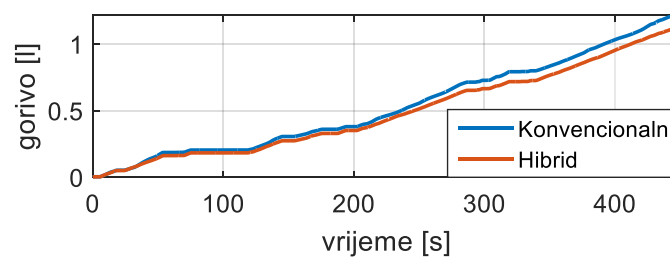
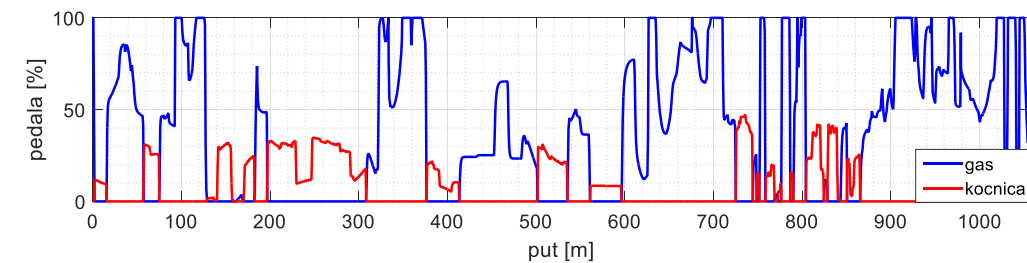
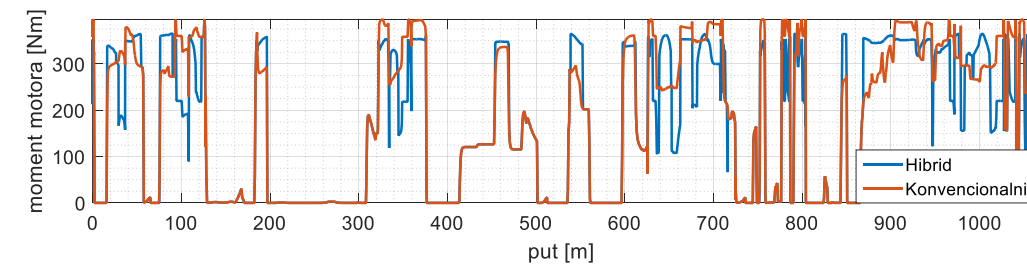
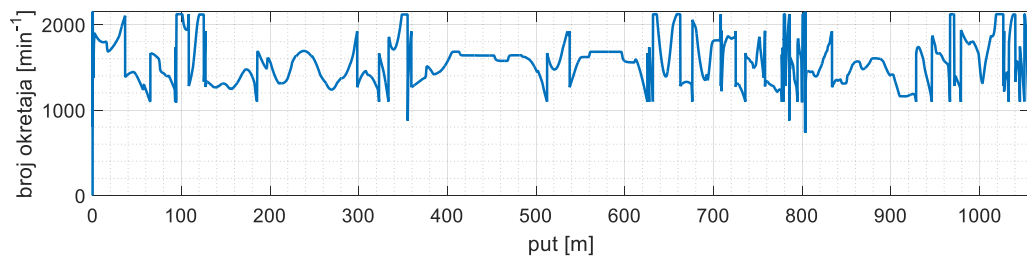
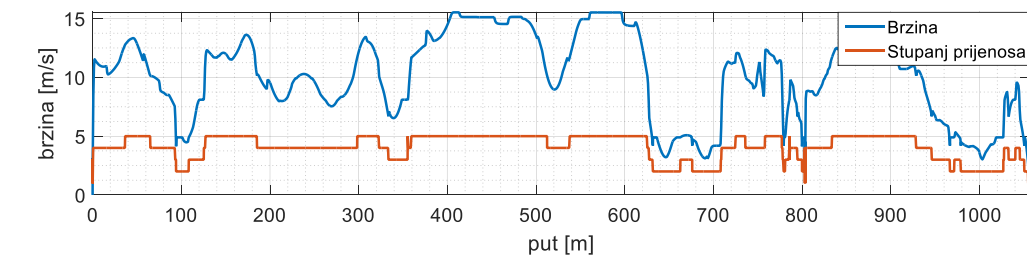
-
- [18] Tomljanović K., Potoršnja goriva skidera, Diplomski rad, Zagreb, 2019.
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_fuel, 14.3.2020.
- [20] https://www.youtube.com/channel/UC87IN_zKGeYWD1NLSae4-oQ/videos, 15.2.2020.
- [21] <https://www.energy.gov/eere/vehicles/fact-861-february-23-2015-idle-fuel-consumption-selected-gasoline-and-diesel-vehicles>, 10.3.2020.
- [22] https://www.neweagle.net/support/wiki/ProductDocumentation/EV_Software_and_Hardware/Electric_Motors/AVID/EVO-AF130.pdf, 7.3.2020.
- [23] Cipek, Mihael & Pavković, Danijel & Kljaić, Zdenko & Mlinarić, Tomislav Josip, "Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route," *Energy*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.144>
- [24] Liu J, Peng H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2008. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.919447>.
- [25] Sun Y, Cole C, Spiriyagin M, Godber T, Hames S, Rasul M. Conceptual designs of hybrid locomotives for application as heavy haul trains on typical track lines. *Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit* 2013. <https://doi.org/10.1177//0954409713501655>.
- [26] <https://autotraveler.ru/en/croatia/trend-price-fuel-croatia.html#.XIUOe-F7m90>, 25.2.2020.
- [27] <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>, 15.3.2020.
- [28] https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf, 15.3.2020.
- [29] <https://www.avid.com/>, 15.3.2020.

DODATAK

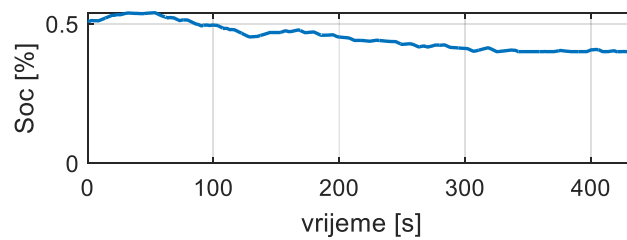
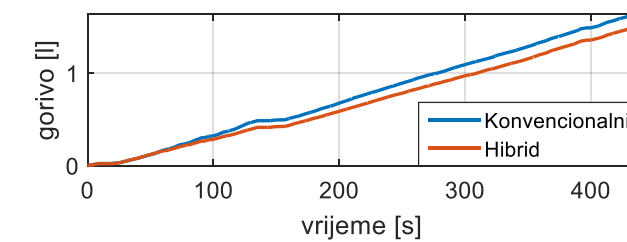
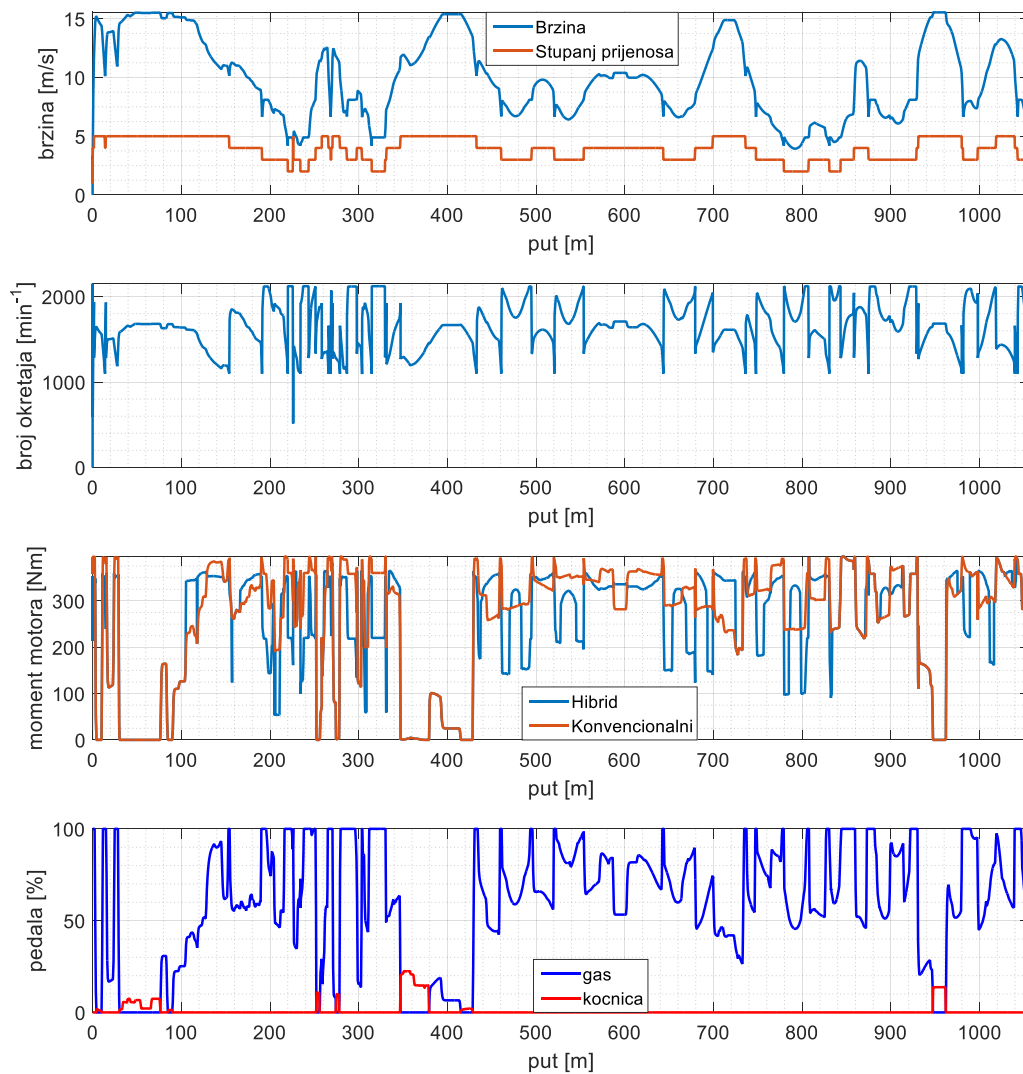
Staza 2 - uzbrdo - 0 t	1.06 km	$f = 0.17$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	455 s	1.75/1.55 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



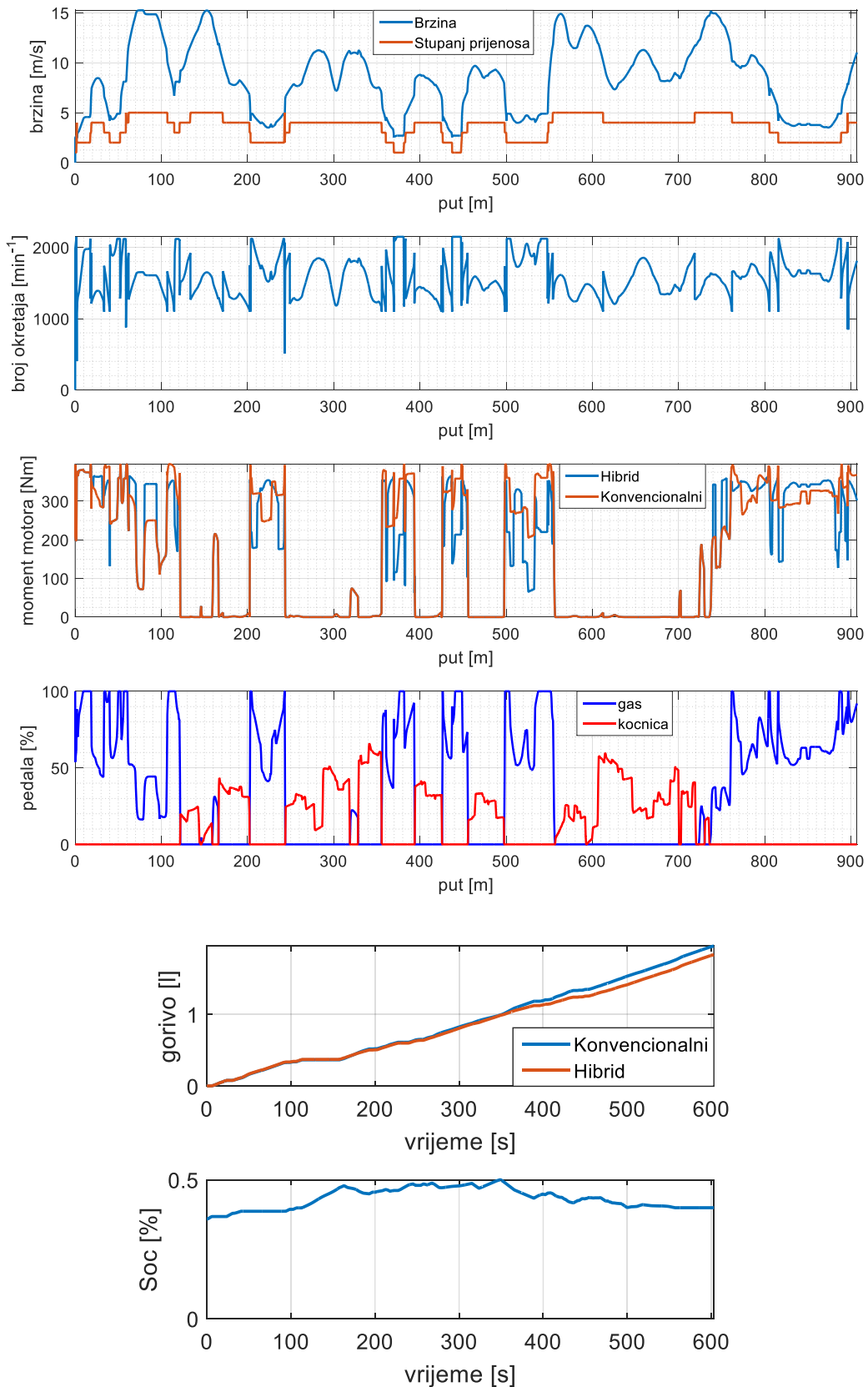
Staza 2 - nizbrdo - 4.5 t	1.06 km	$f = 0.17$	$\mu_p = 0.36$	$k = 0.47$	450 s	1.22/1.12 l
---------------------------	---------	------------	----------------	------------	-------	-------------



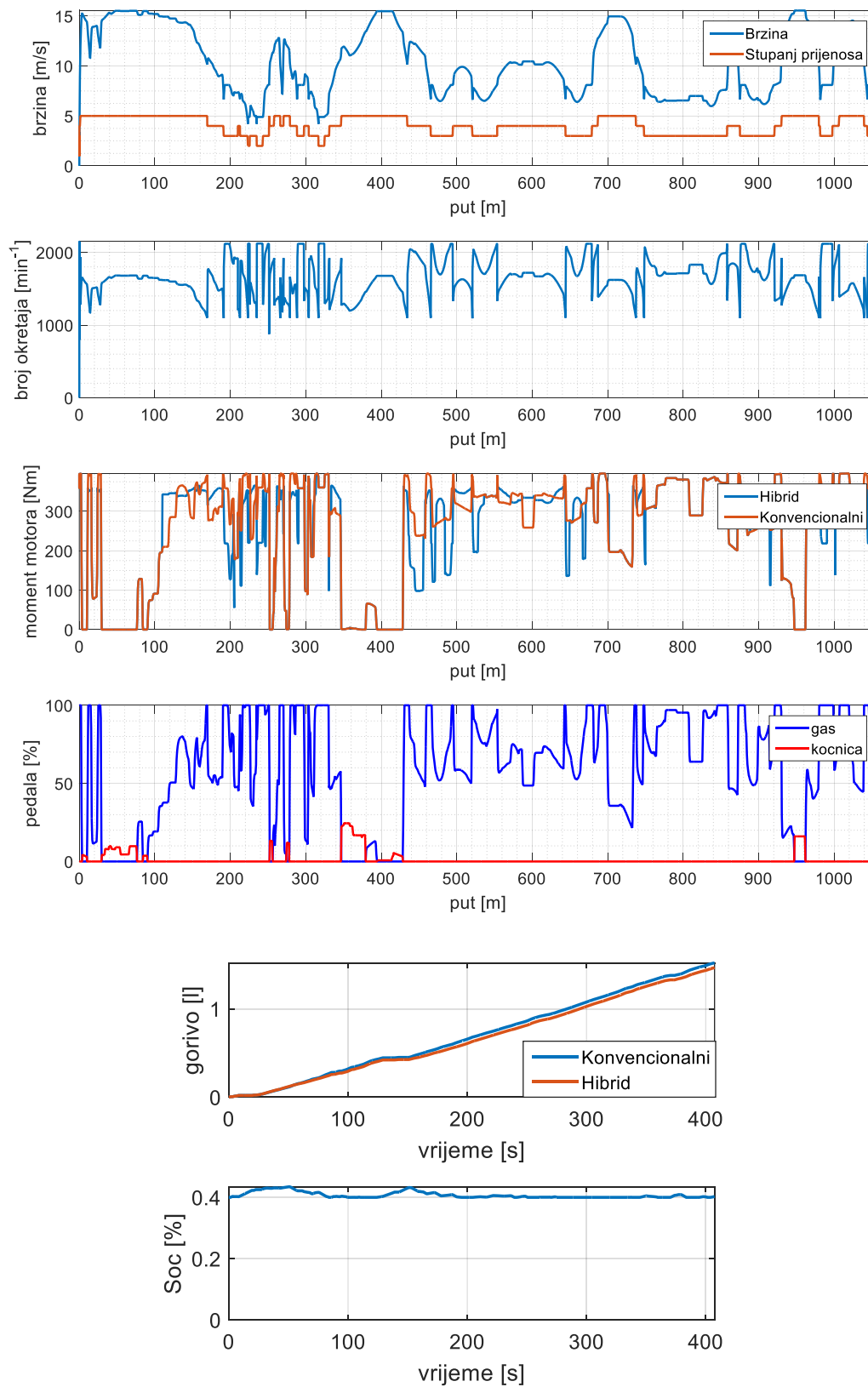
Staza 2 - uzbrdo - 0 t	1.06 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	436 s	1.64/1.49 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



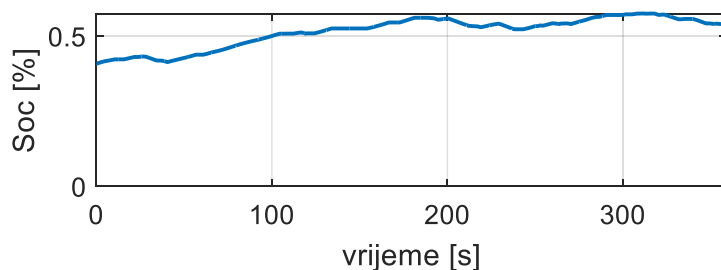
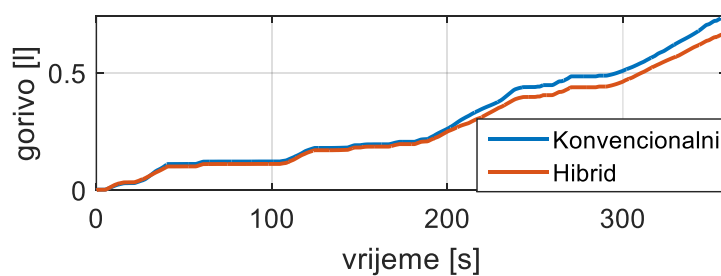
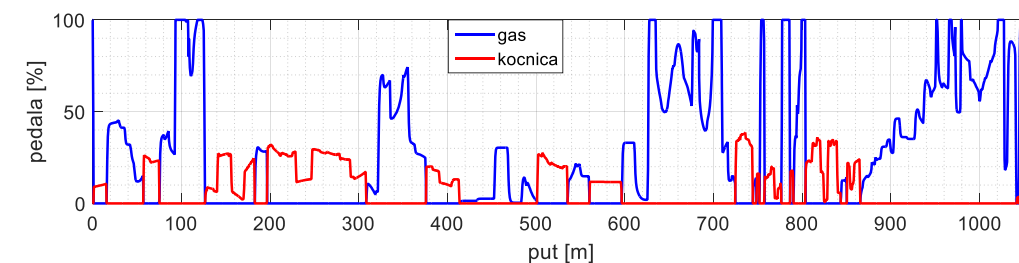
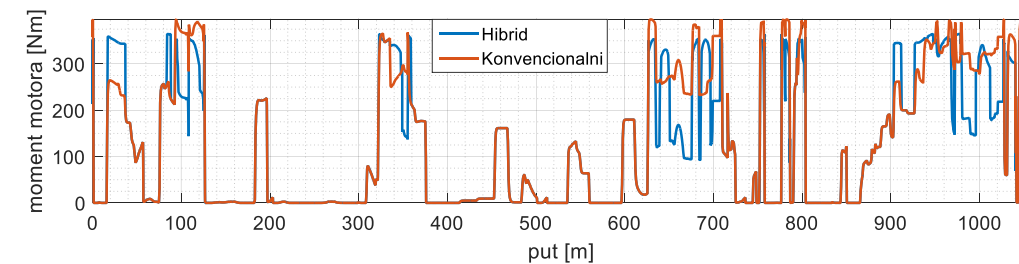
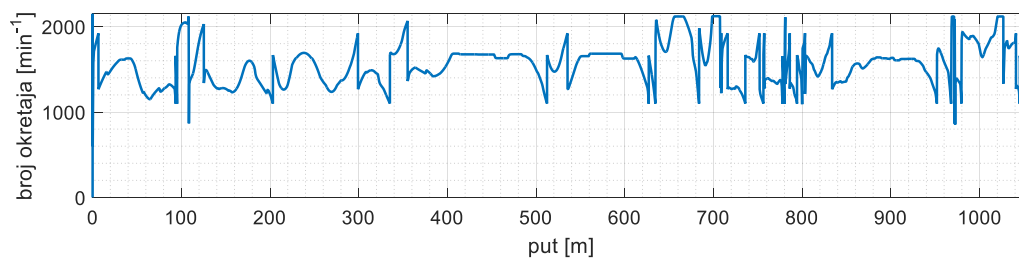
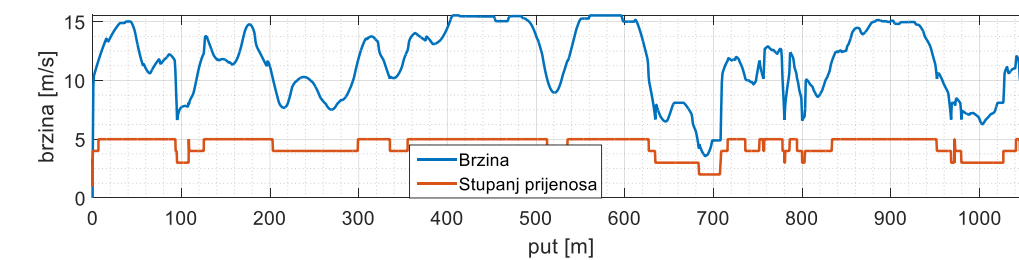
Staza 2 - nizbrdo – 6 t	1.06 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0.56$	$k = 0.4$	603 s	1.96/1.82 l
-------------------------	---------	------------	----------------	-----------	-------	-------------



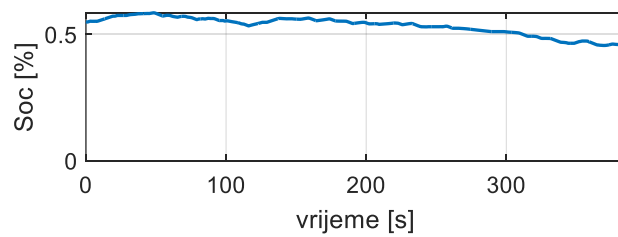
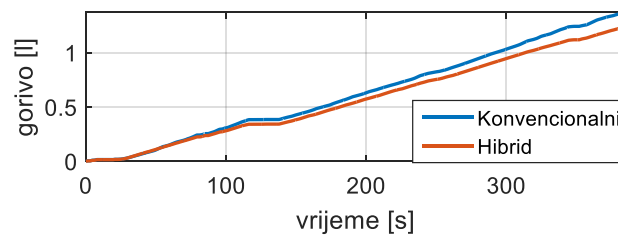
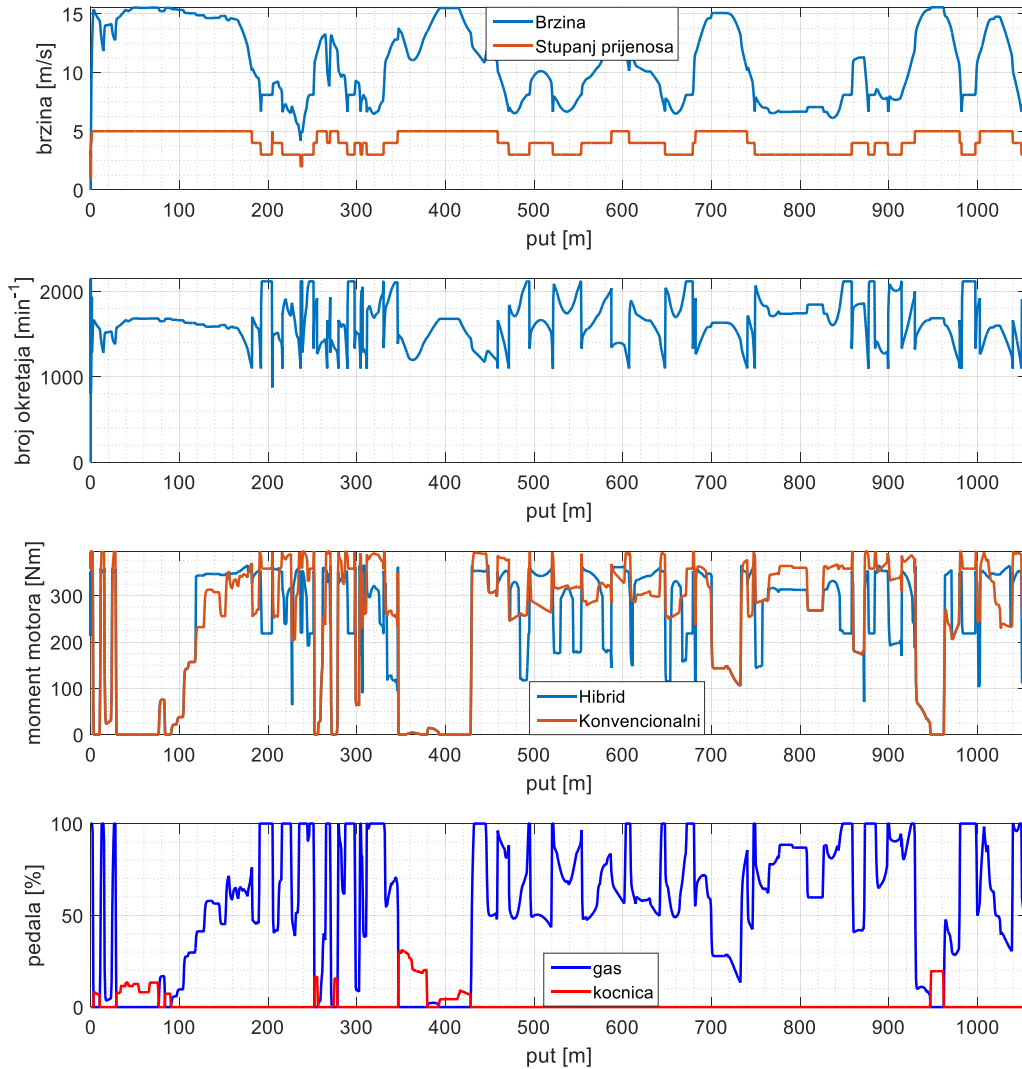
Staza 2 - uzbrdo – 0 t	1.06 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	408 s	1.47/1.52 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



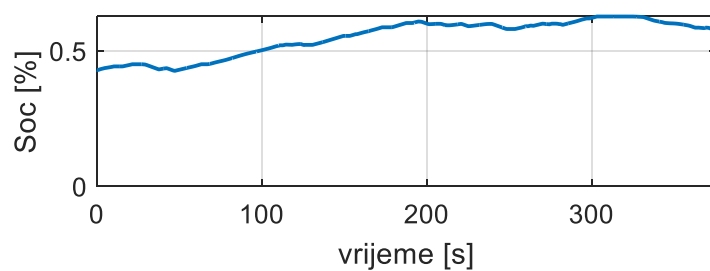
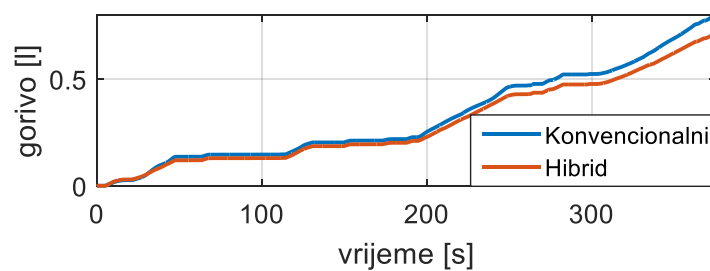
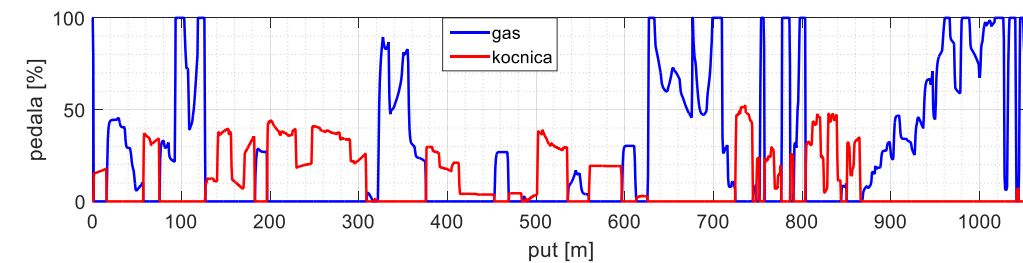
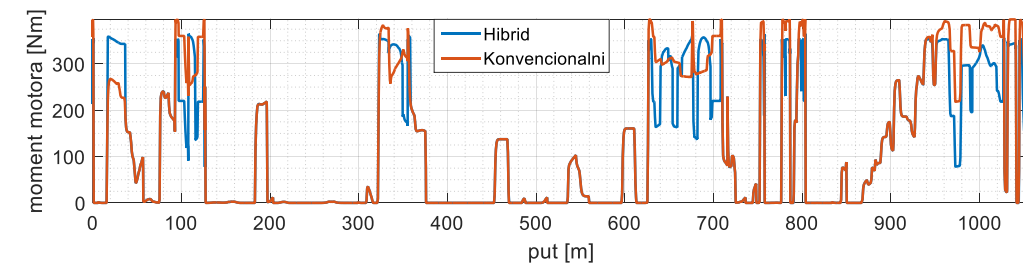
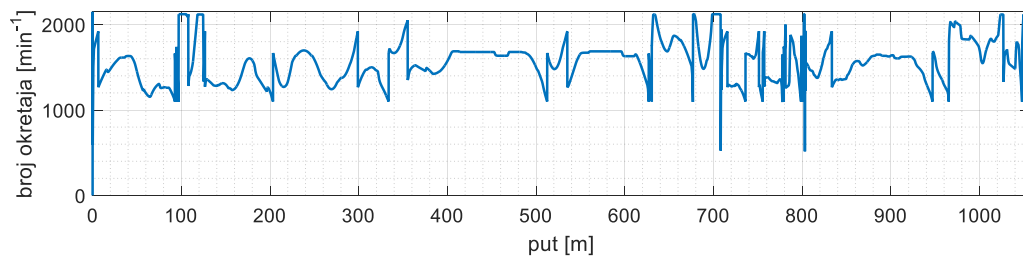
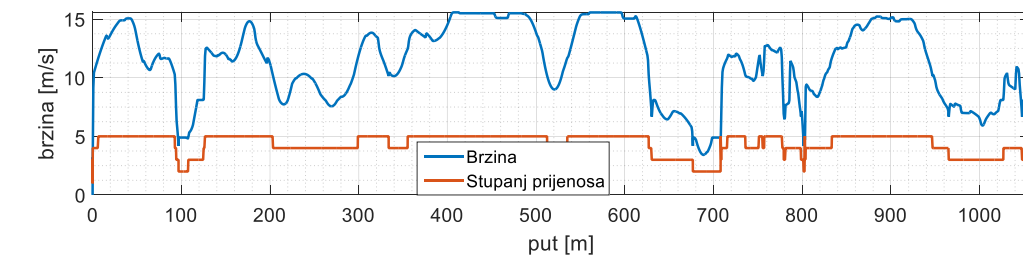
Staza 2 - nizbrdo – 1.3 t	1.06 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0.56$	$k = 0.4$	556 s	0.74/0.67 l
---------------------------	---------	------------	----------------	-----------	-------	-------------



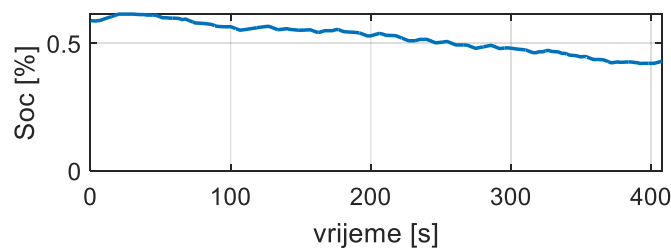
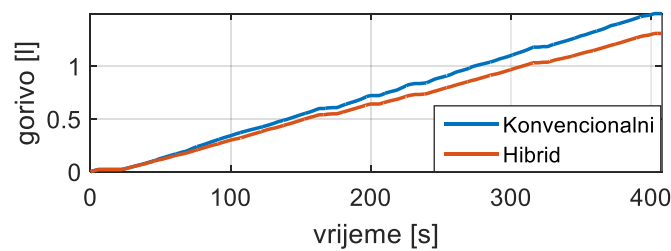
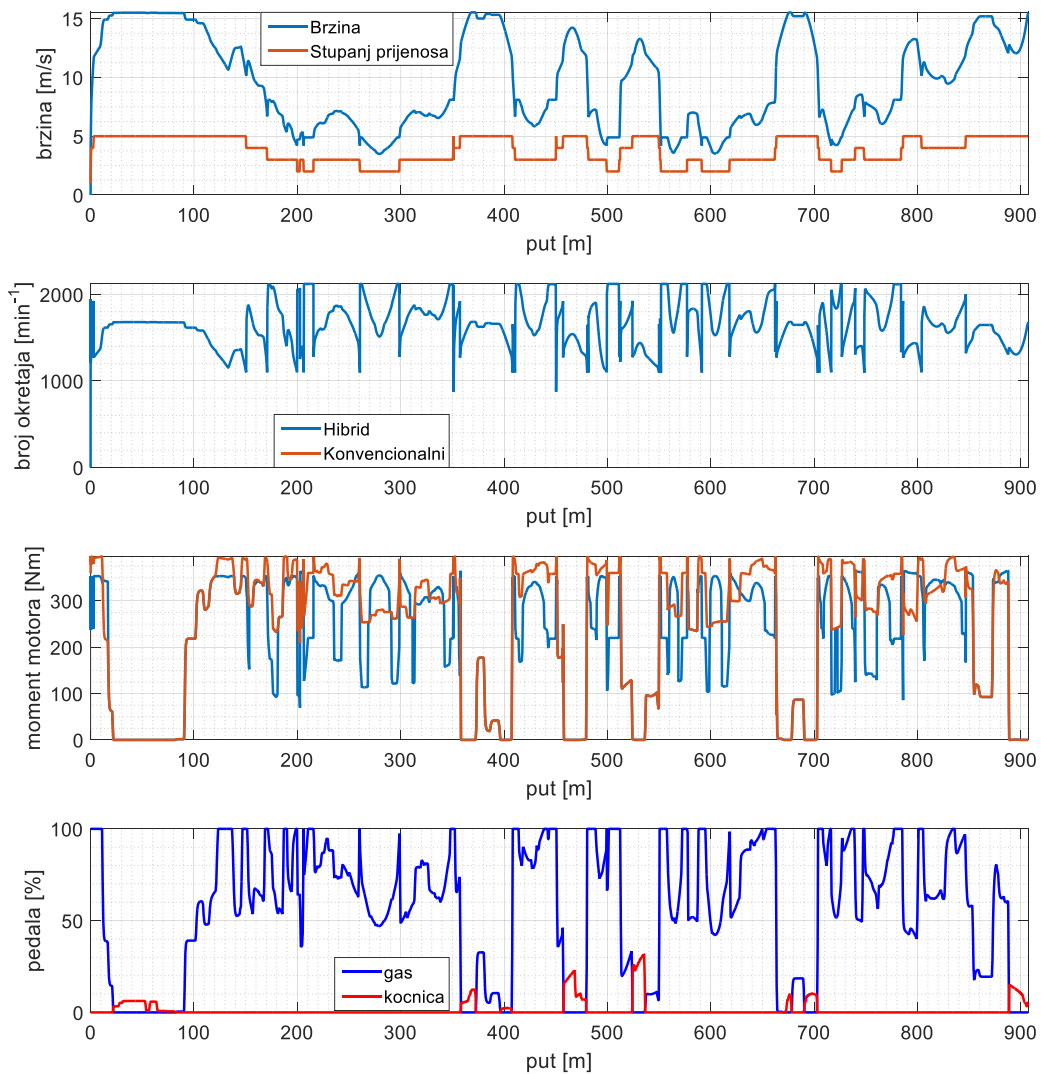
Staza 2 - uzbrdo -0 t	1.06 km	$f = 0.10$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	385 s	1.37/1.24 l
-----------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



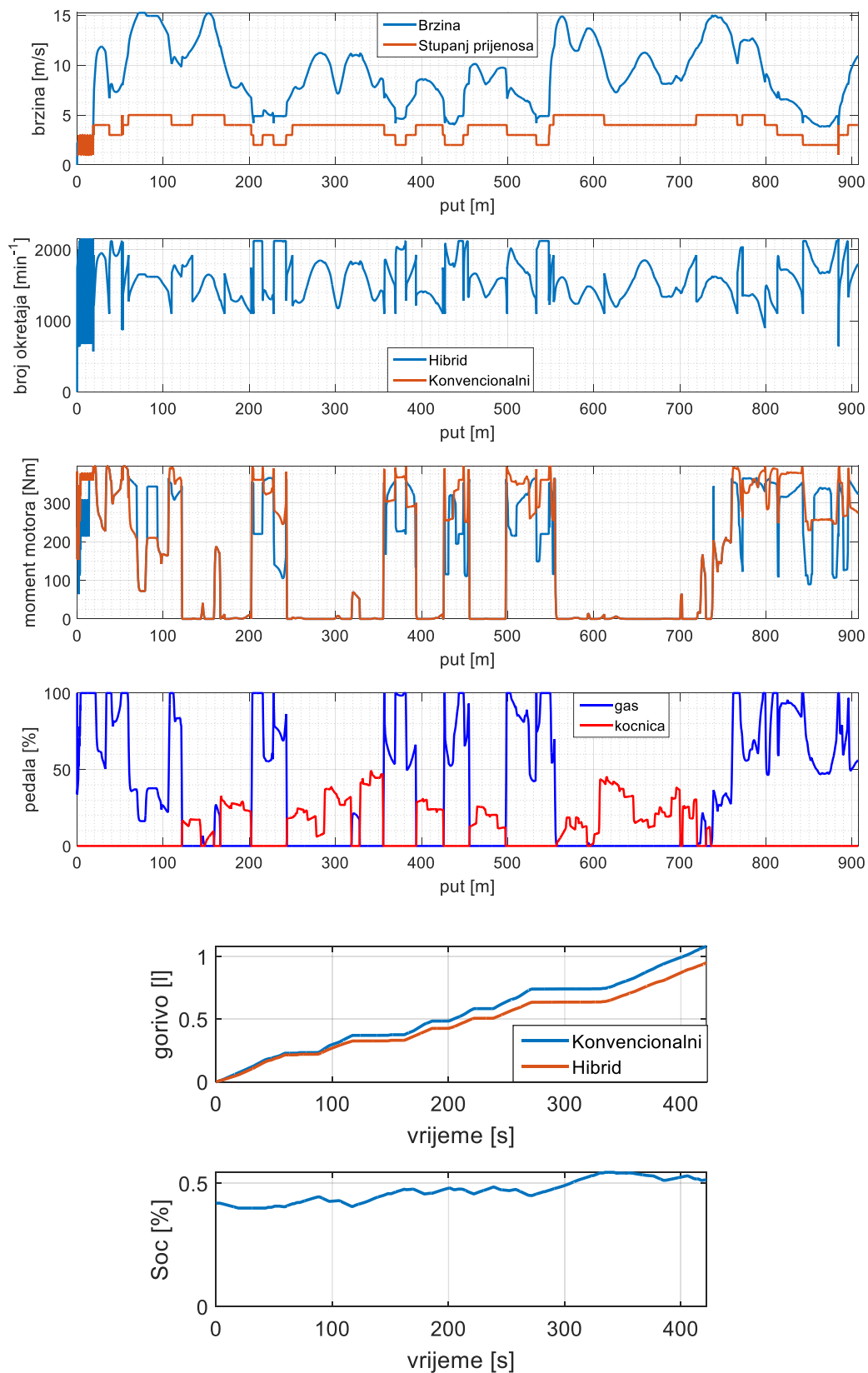
Staza 2 - nizbrdo -3.6 t	1.06 km	$f = 0.10$	$\mu_p = 0.43$	$k = 0.6$	376 s	0.80/0.71 l
--------------------------	---------	------------	----------------	-----------	-------	-------------



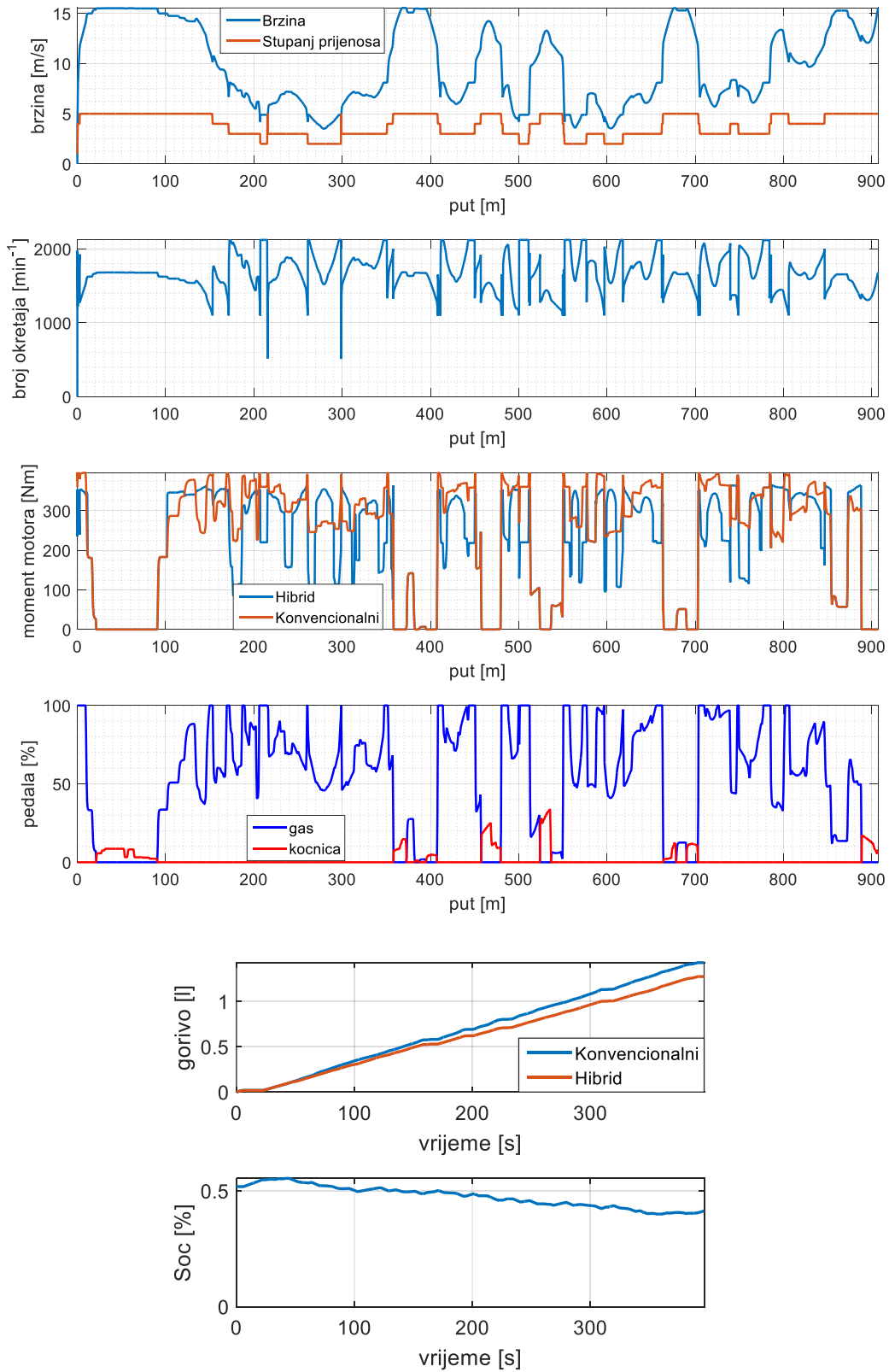
Staza 3 - uzbrdo -0 t	0.97 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	408 s	1.50/1.31 l
-----------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



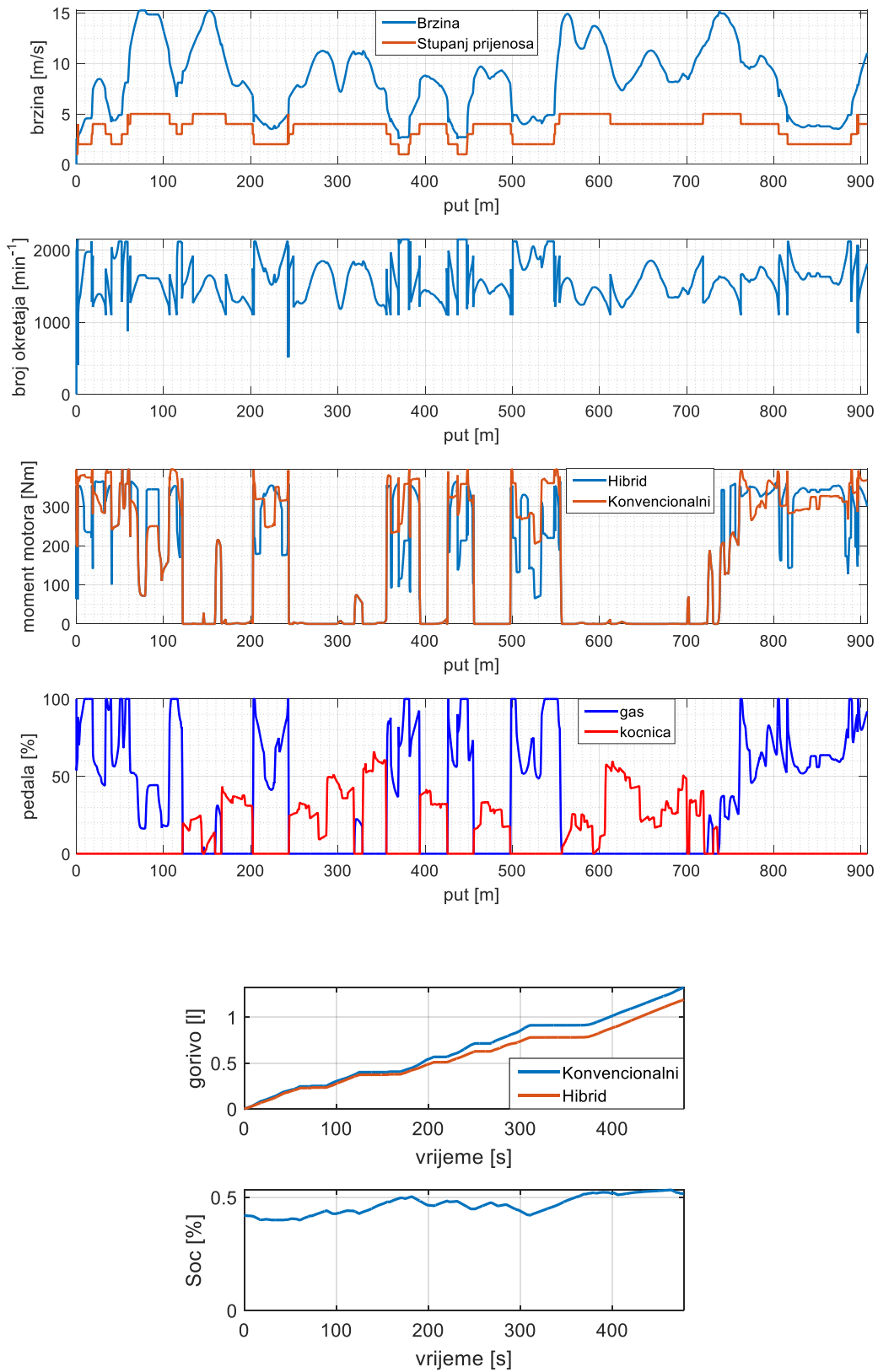
Staza 3 - nizbrdo – 3 t	0.97 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0.6$	$k = 0.5$	413 s	1.06/0.95 l
-------------------------	---------	------------	---------------	-----------	-------	-------------



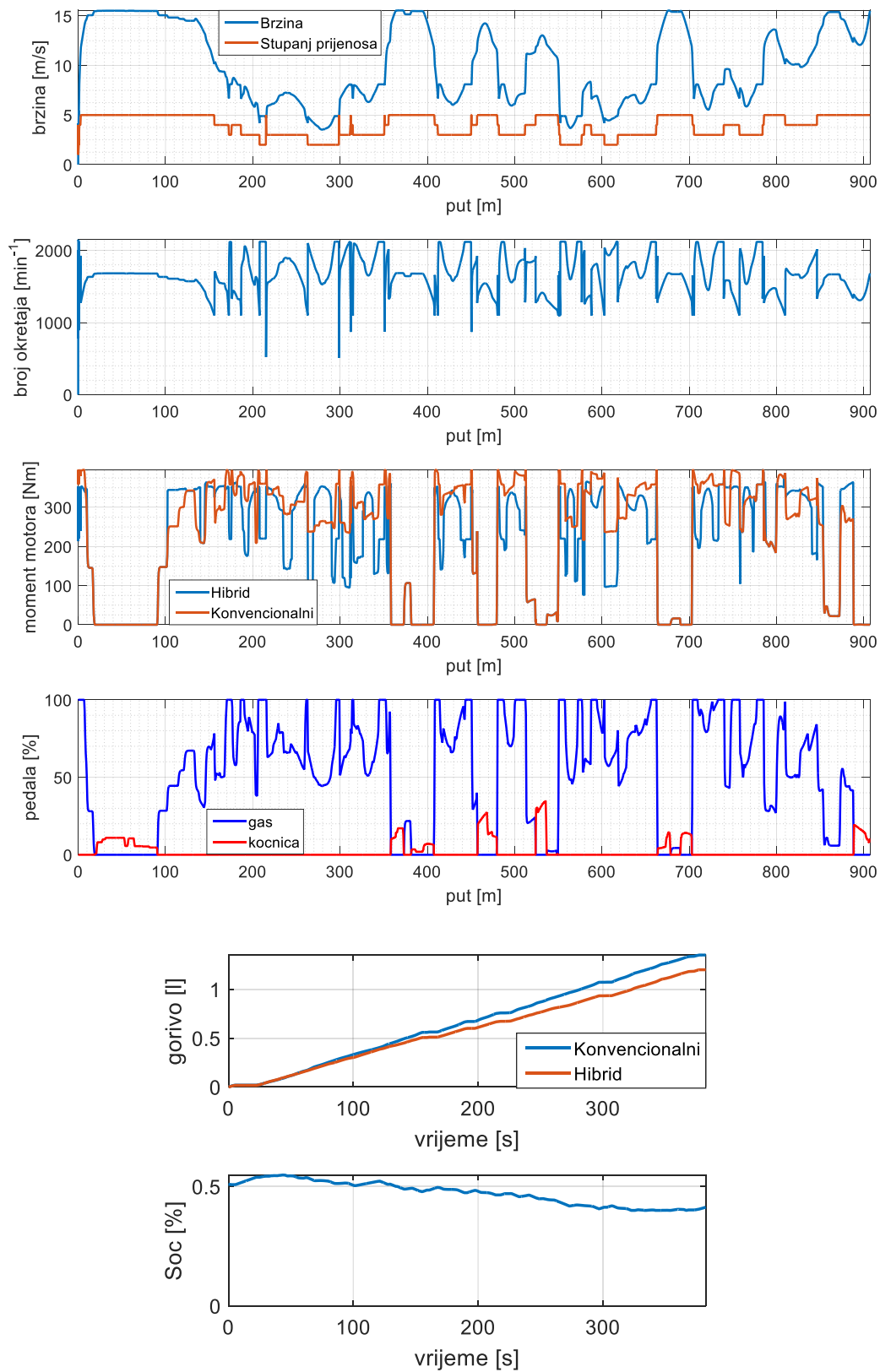
Staza 3 - uzbrdo – 0 t	0.97 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	397 s	1.43/1.27 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



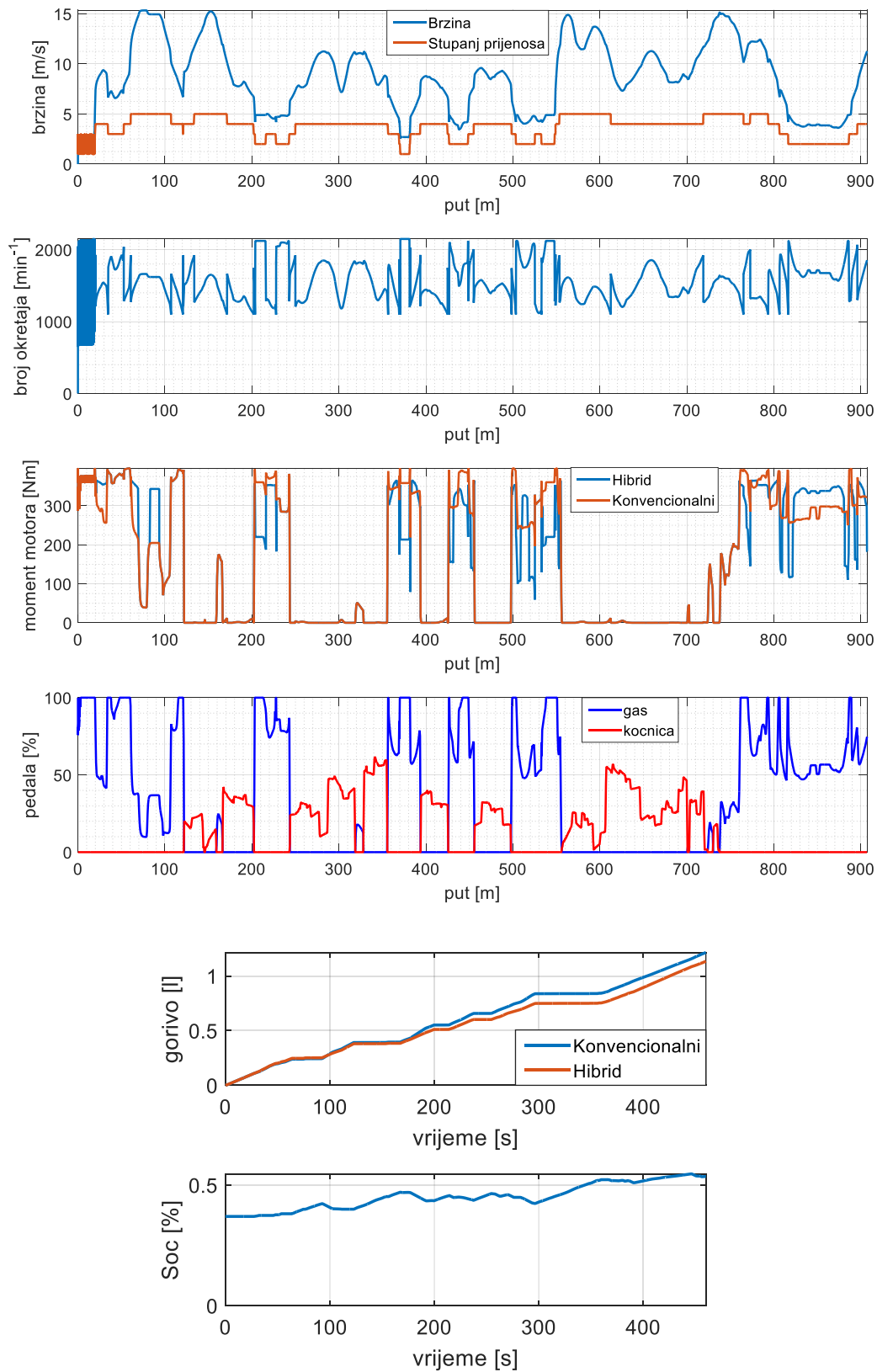
Staza 3 - uzbrdo – 6 t	0.97 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0.48$	$k = 0.5$	478 s	1.32/1.16 l
------------------------	---------	------------	----------------	-----------	-------	-------------



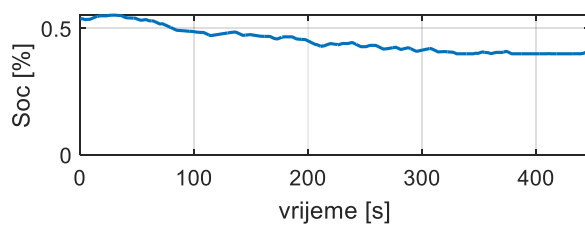
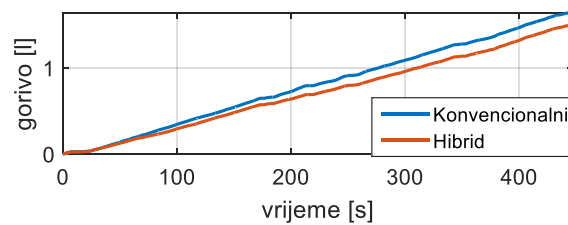
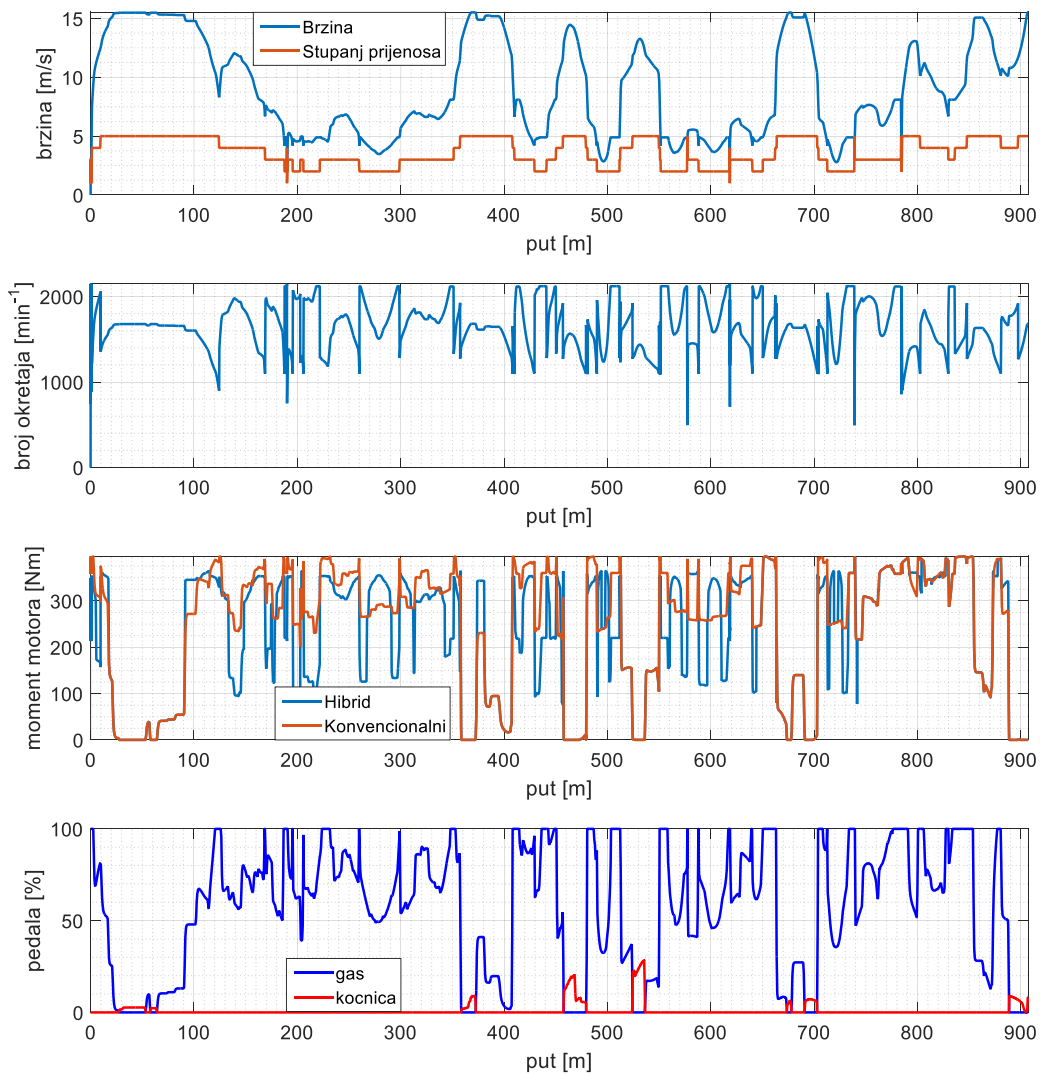
Staza 3 - uzbrdo – 0 t	0.97 km	$f = 0.11$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	382 s	1.35/1.20 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



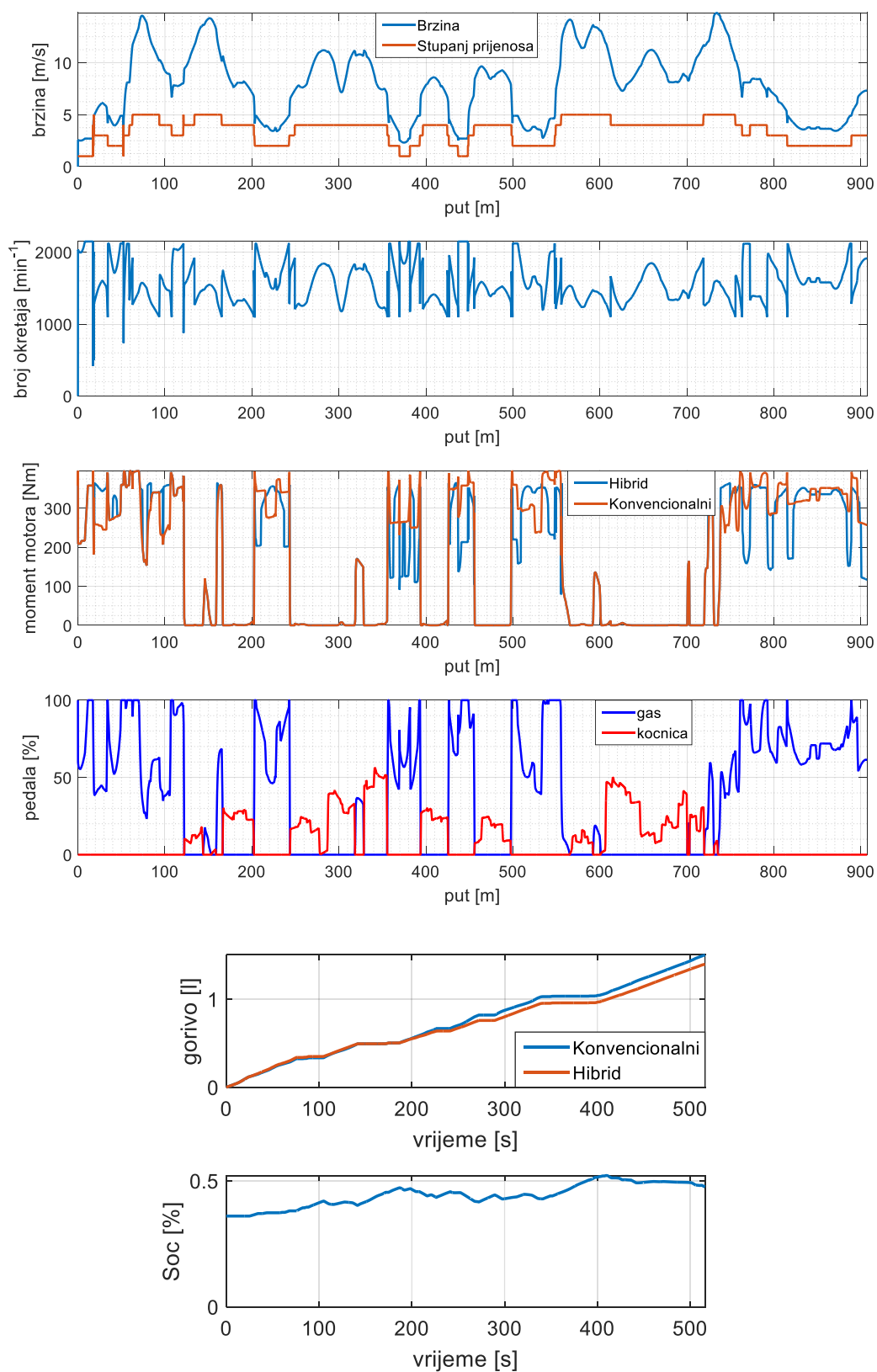
Staza 3 - uzbrdo – 5.1 t	0.97 km	$f = 0.11$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	451 s	1.28/1.06 l
--------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



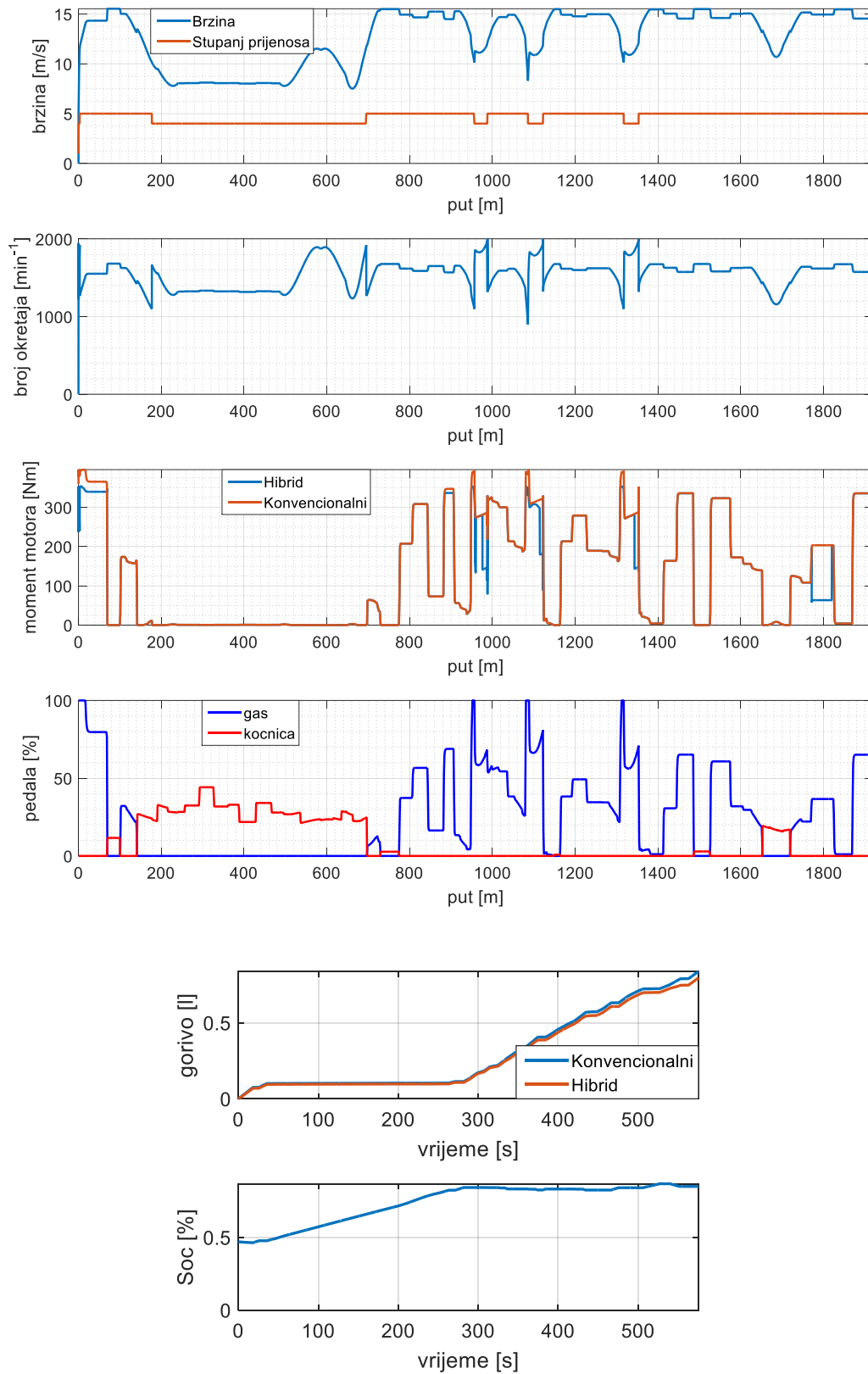
Staza 3 - uzbrdo – 0 t	0.97 km	$f = 0.18$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	446 s	1.63/1.49 l
------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



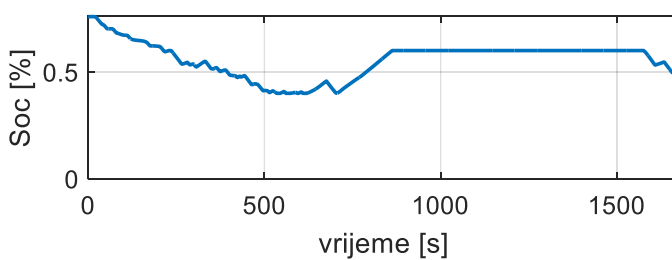
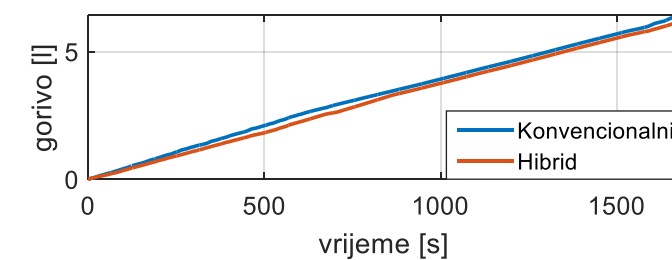
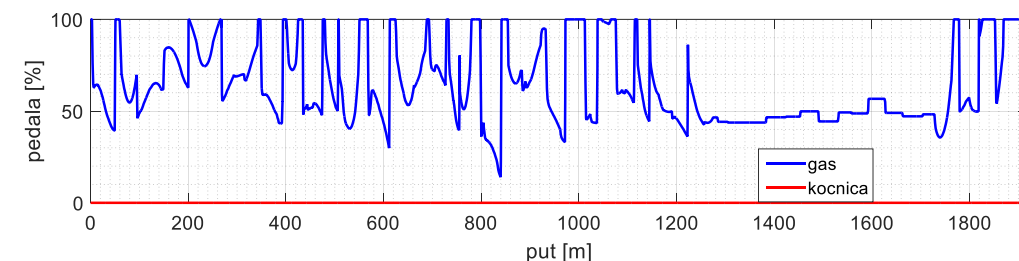
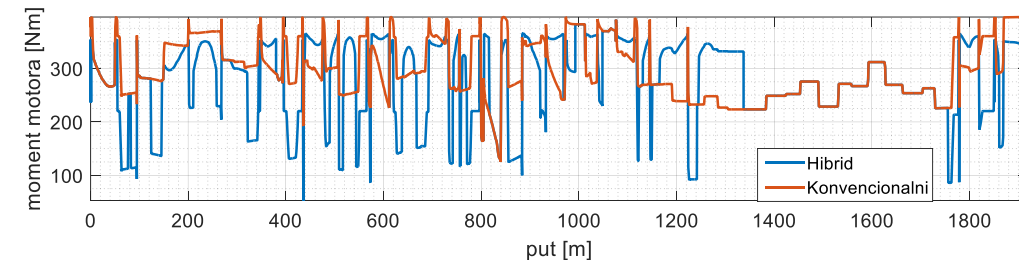
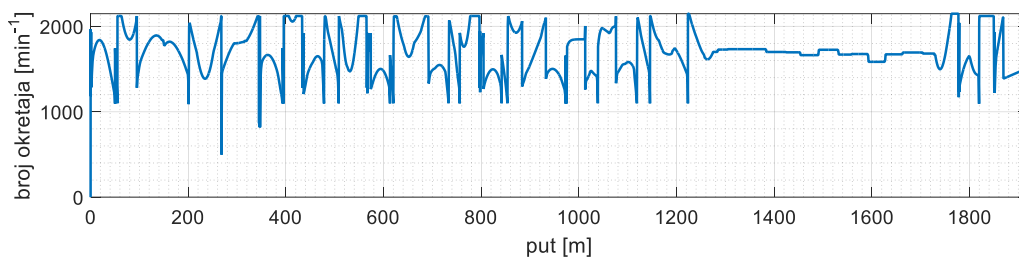
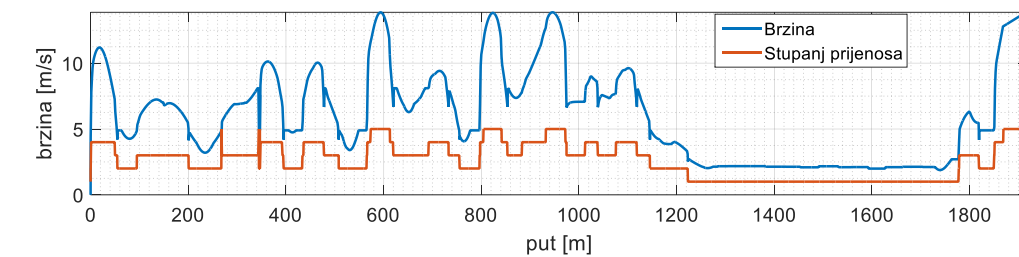
Staza 3 - uzbrdo – 5.5 t	0.97 km	$f = 0.18$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	516 s	1.50/1.39 l
--------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



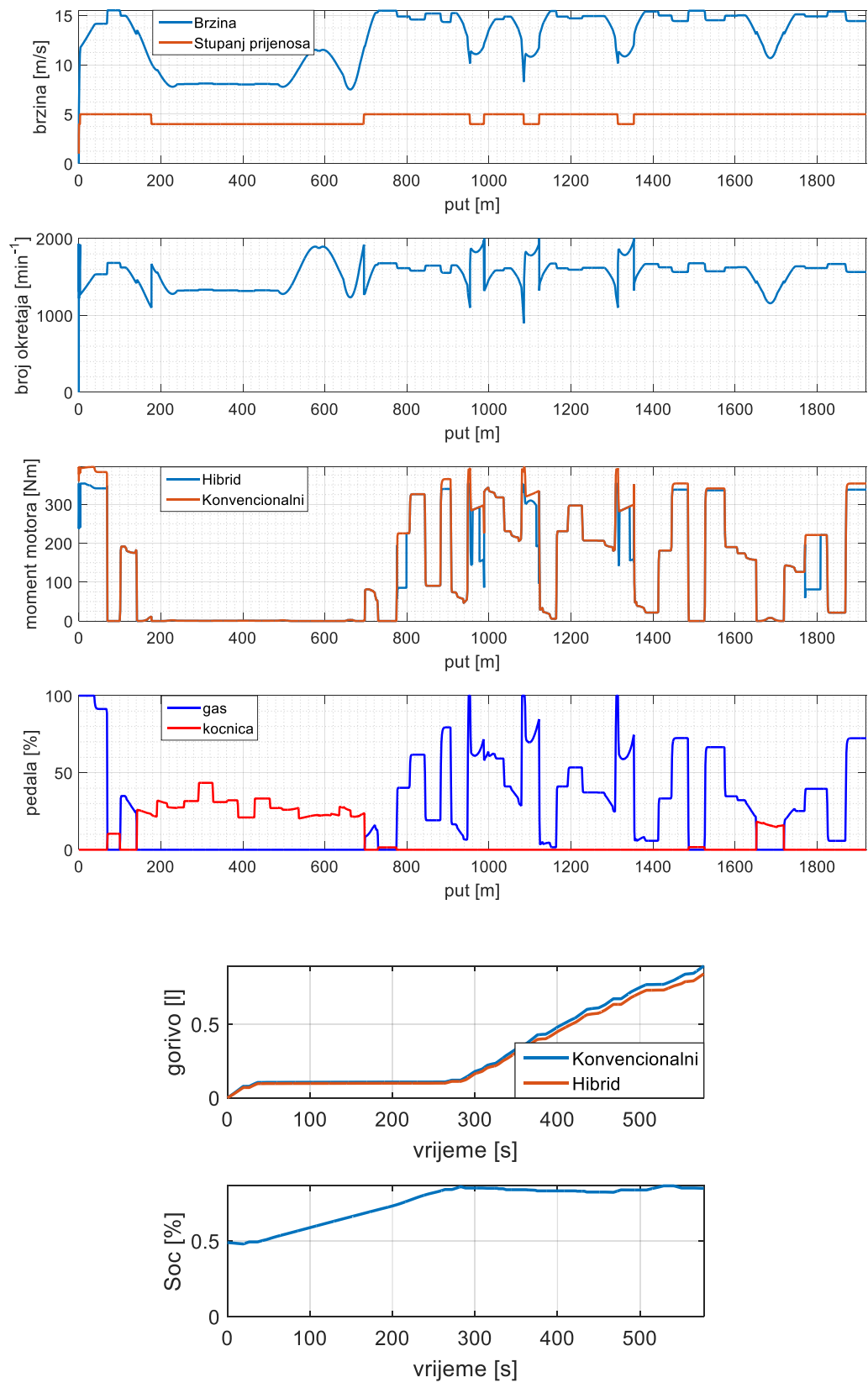
Staza 4 - nizbrdo - 0 t	1.92 km	$f = 0.12$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	576 s	0.84/0.76 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



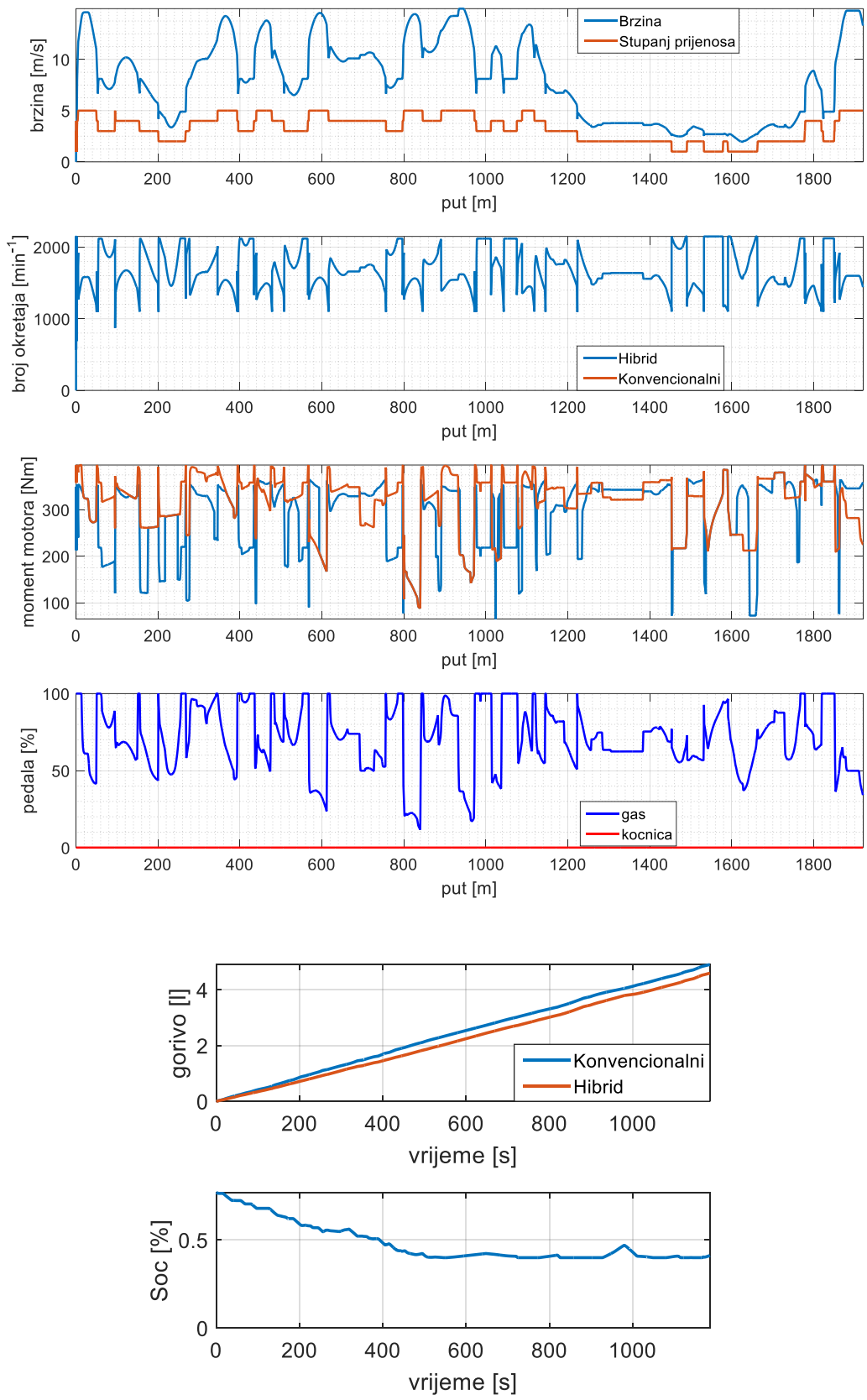
Staza 4 - uzbrdo – 5.3 t	1.92 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0.47$	$k = 0.42$	1675 s	6.40/6.15 l
--------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



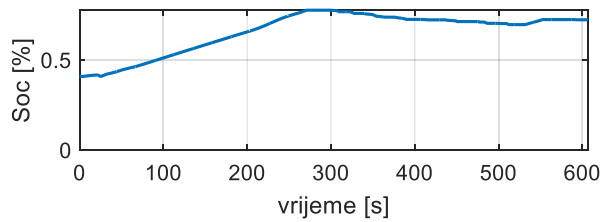
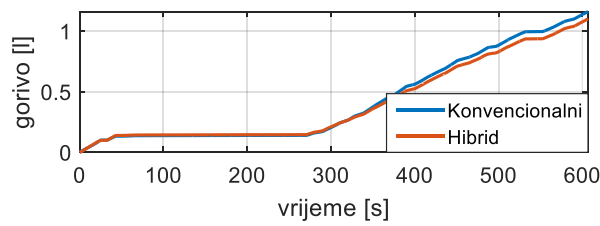
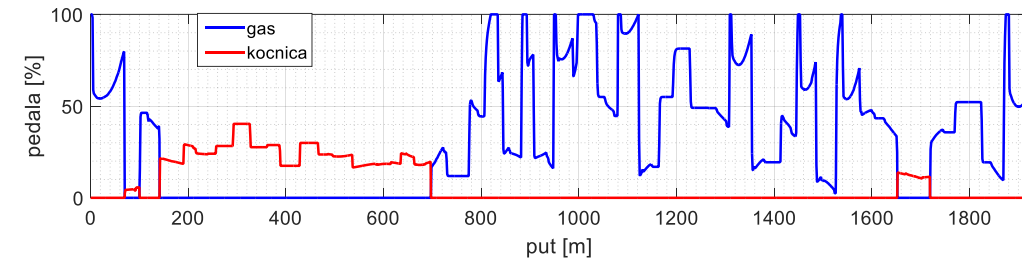
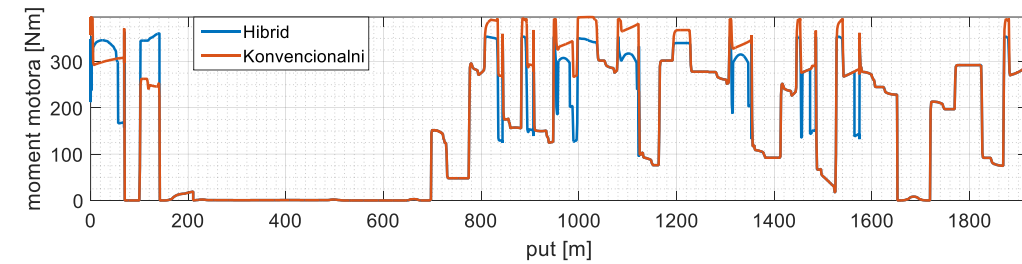
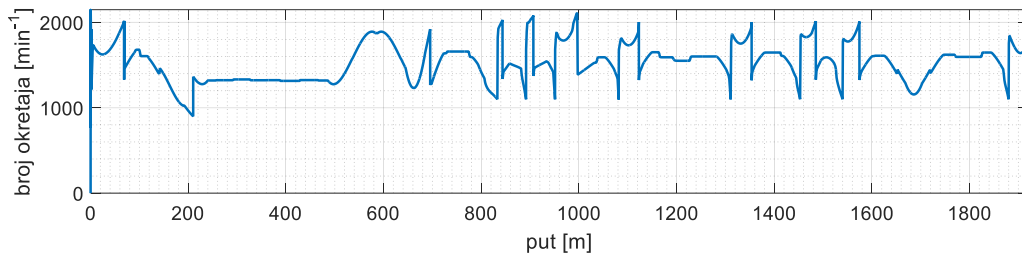
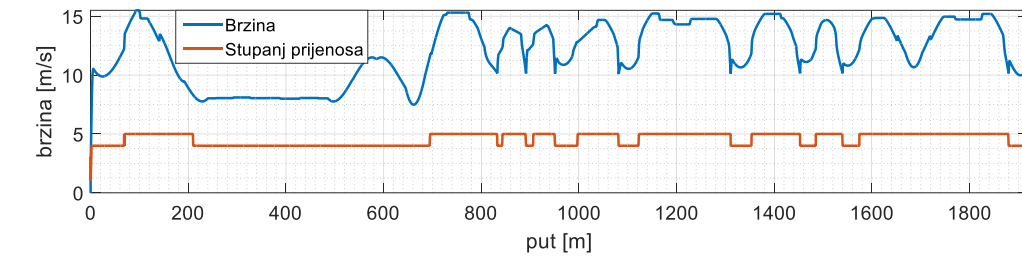
Staza 4 - nizbrdo - 0 t	1.92 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	578 s	0.90/0.81 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



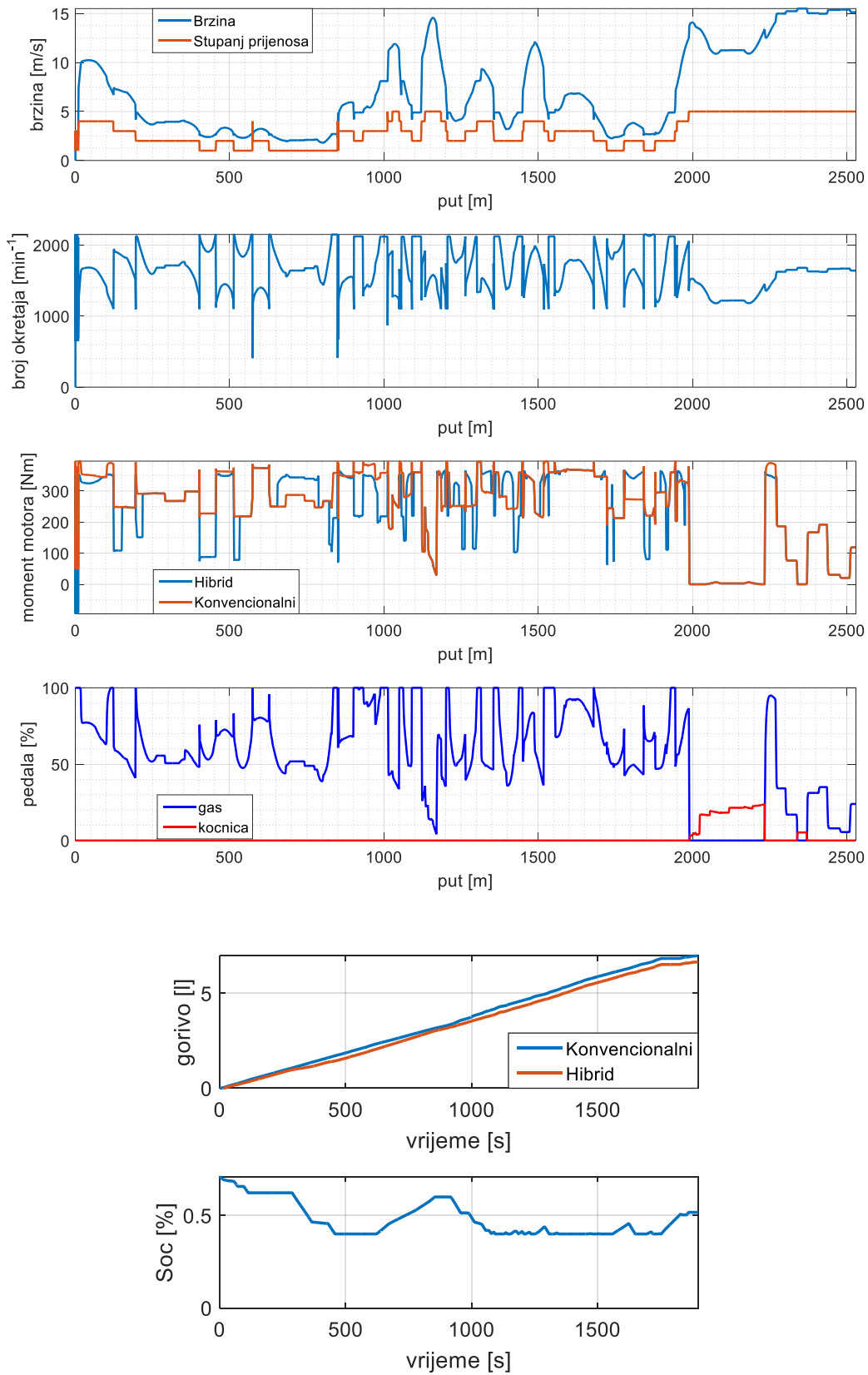
Staza 4 - uzbrdo – 2.8 t	1.92 km	$f = 0.17$	$\mu_p = 0.40$	$k = 0.51$	1183 s	4.86/4.58 l
--------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



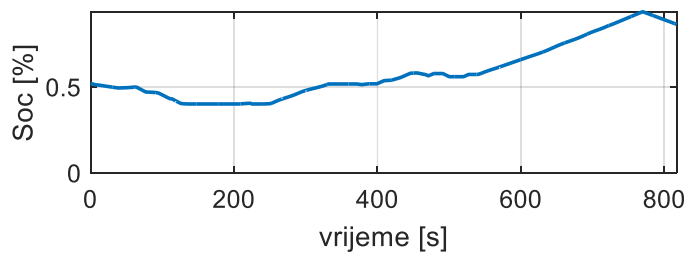
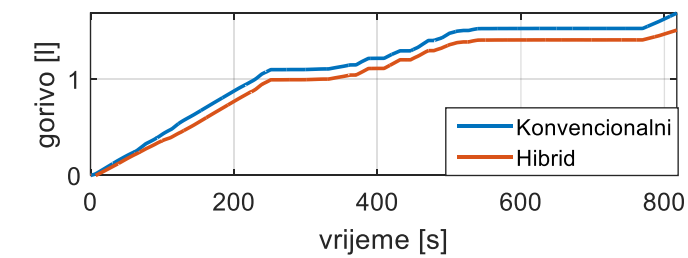
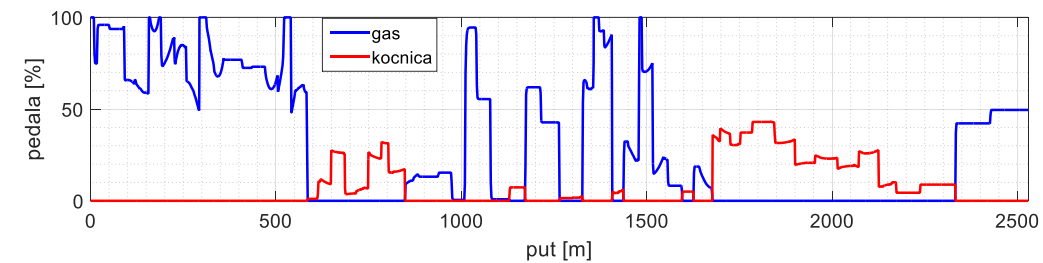
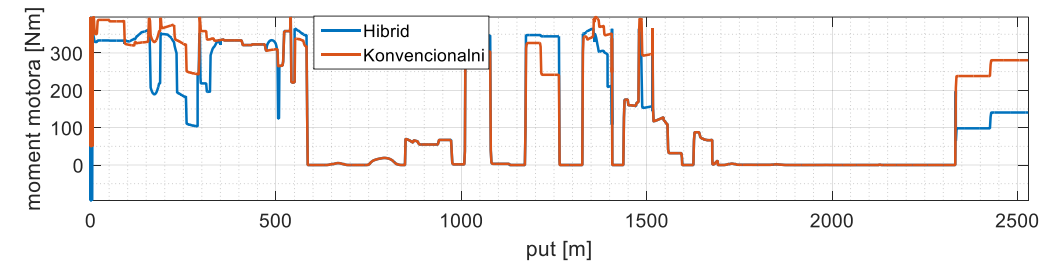
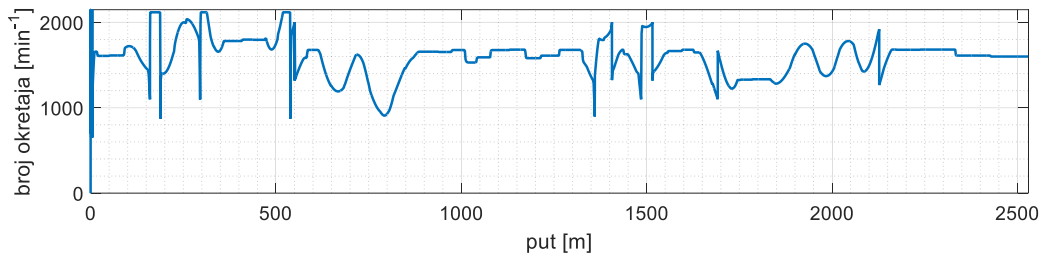
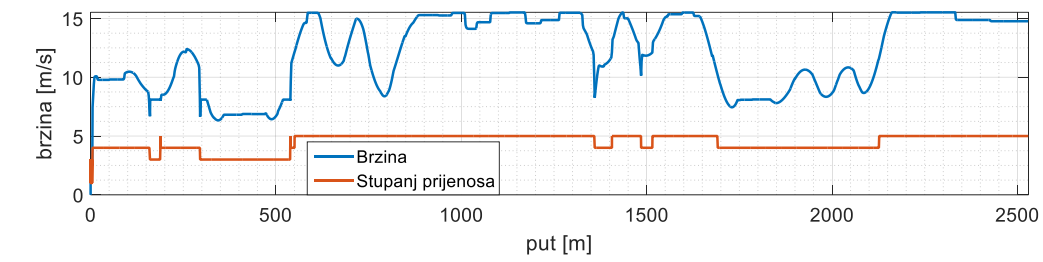
Staza 4 - nizbrdo - 0 t	1.92 km	$f = 0.17$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	606 s	1.15/1.101
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	------------



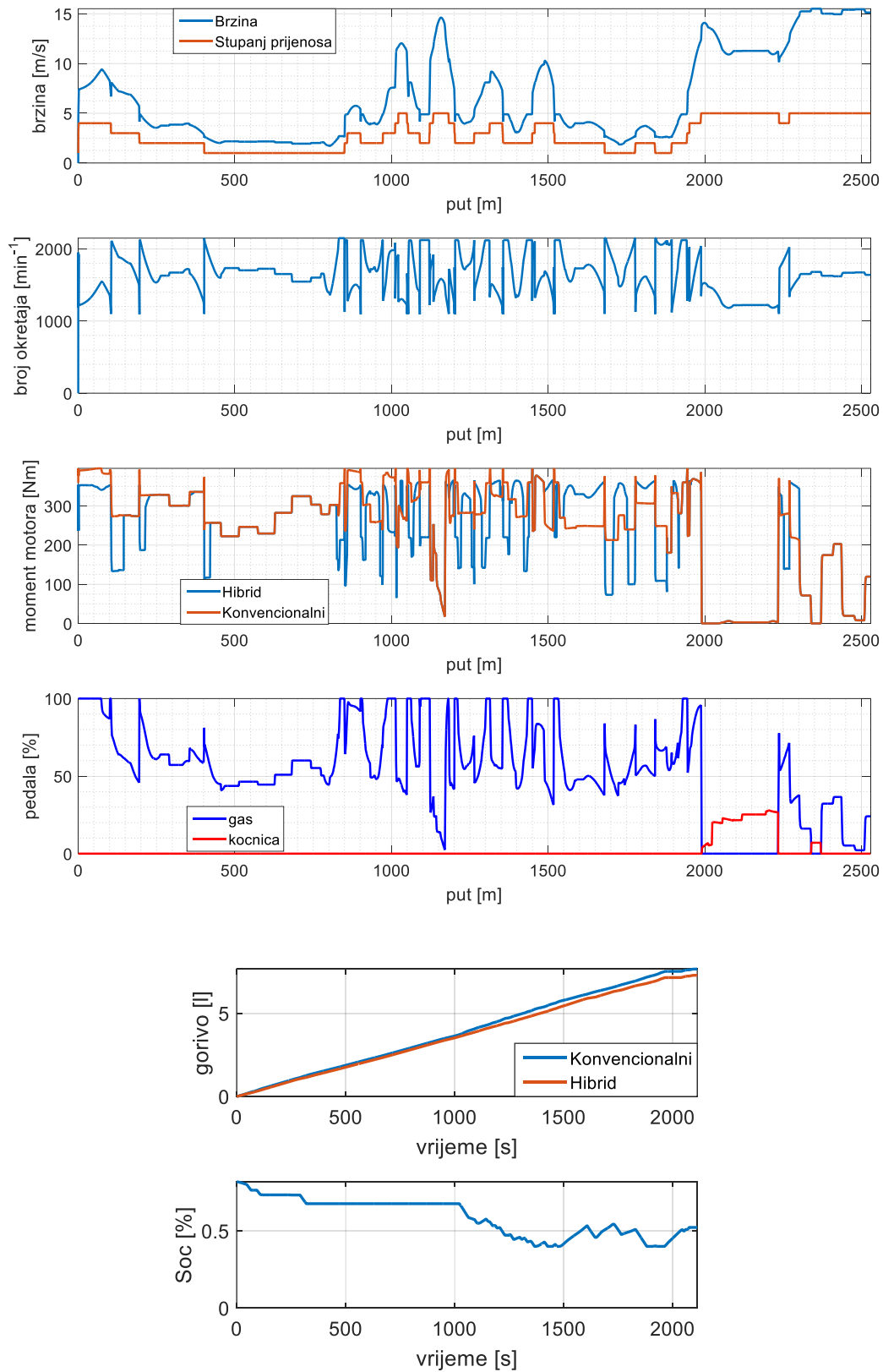
Staza 5 - uzbrdo – 4.4 t	2.53 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0.37$	$k = 0.46$	1888 s	6.96/6.67 l
--------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



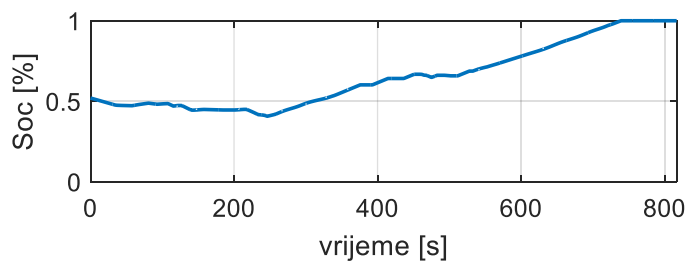
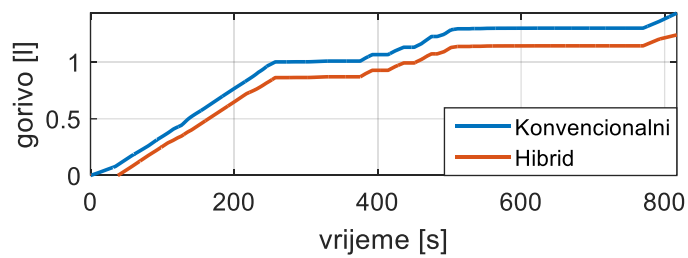
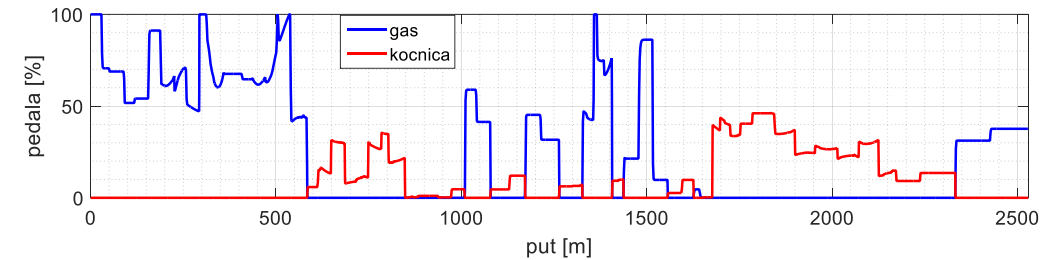
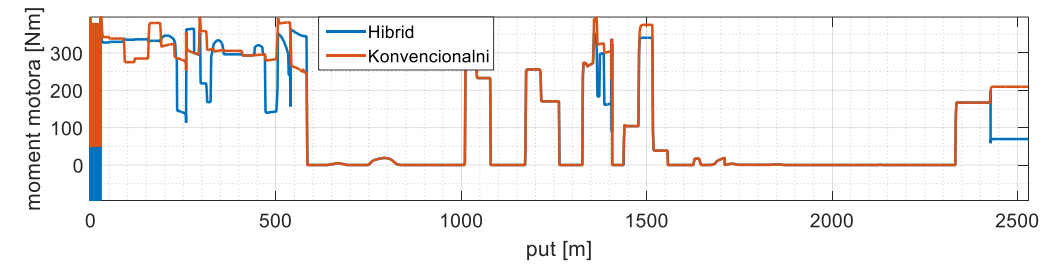
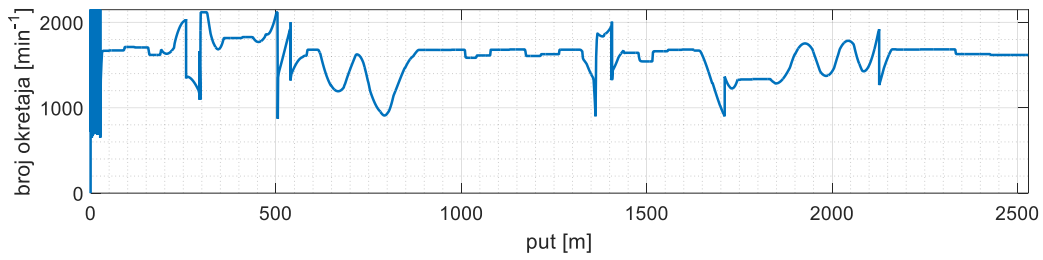
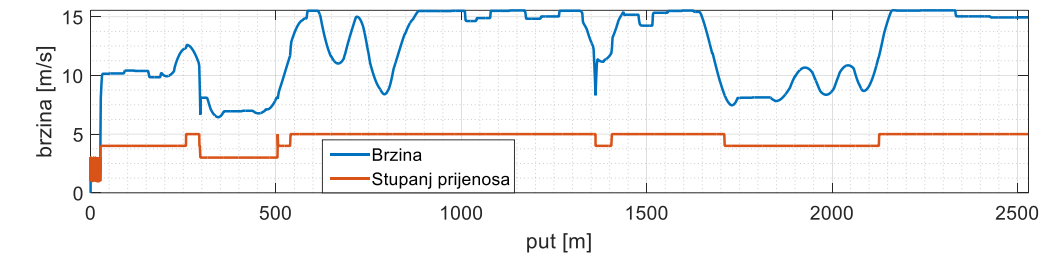
Staza 5 - nizbrdo - 0 t	2.53 km	$f = 0.15$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	813 s	1.68/1.51 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



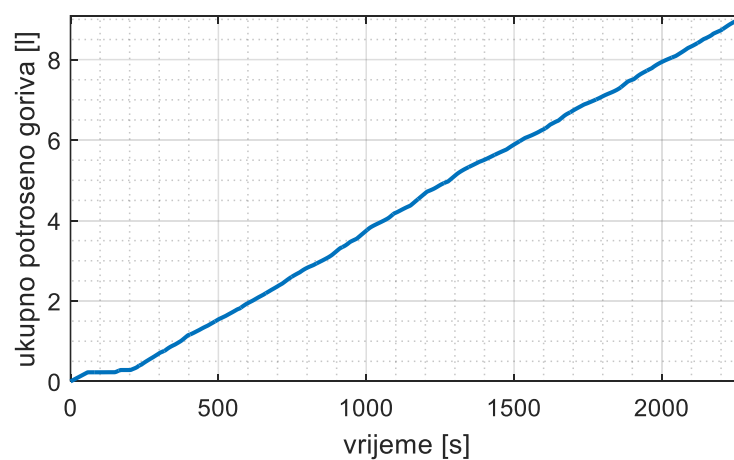
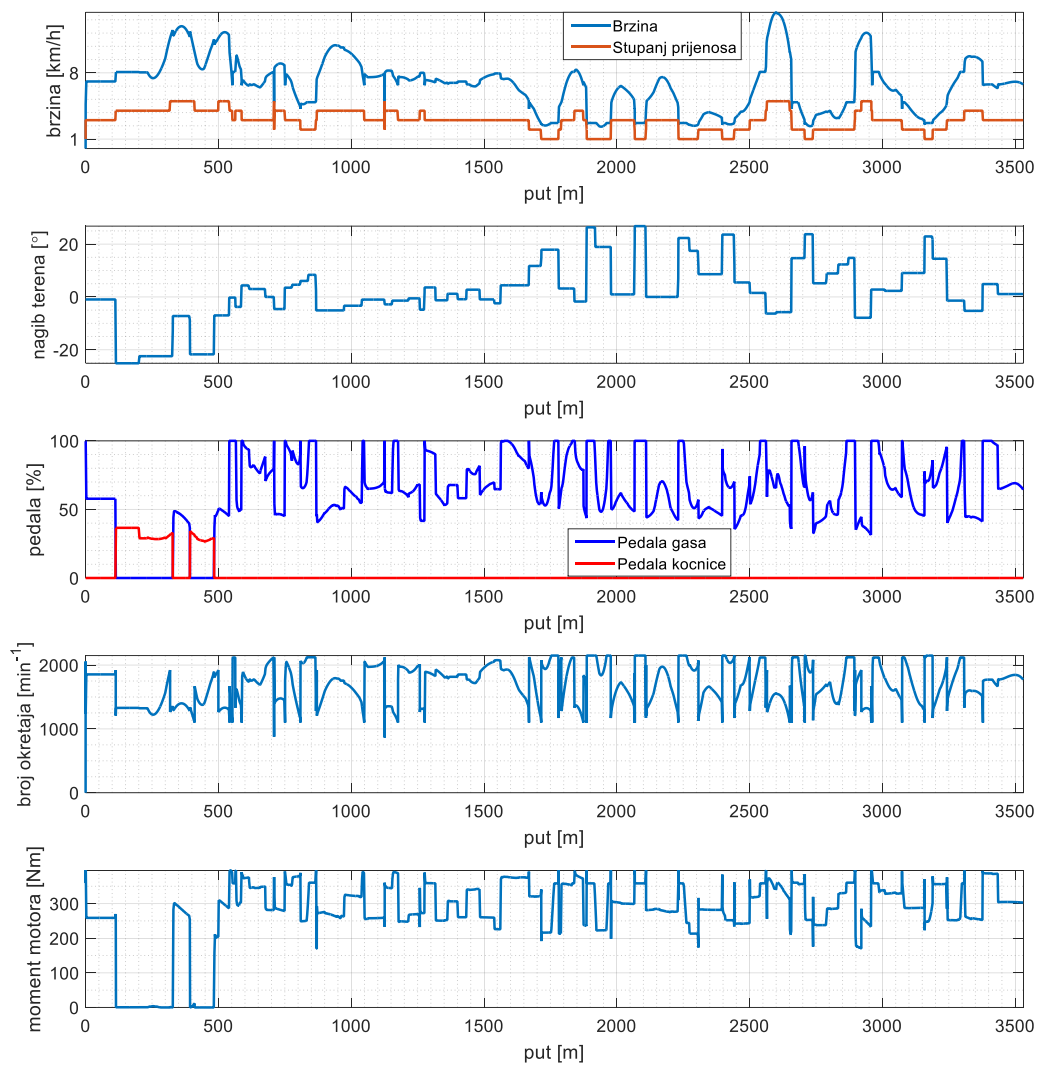
Staza 5 - uzbrdo - 6 t	2.53 km	$f = 0.11$	$\mu_p = 0.45$	$k = 0.48$	2205 s	8.15/7.30 l
------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



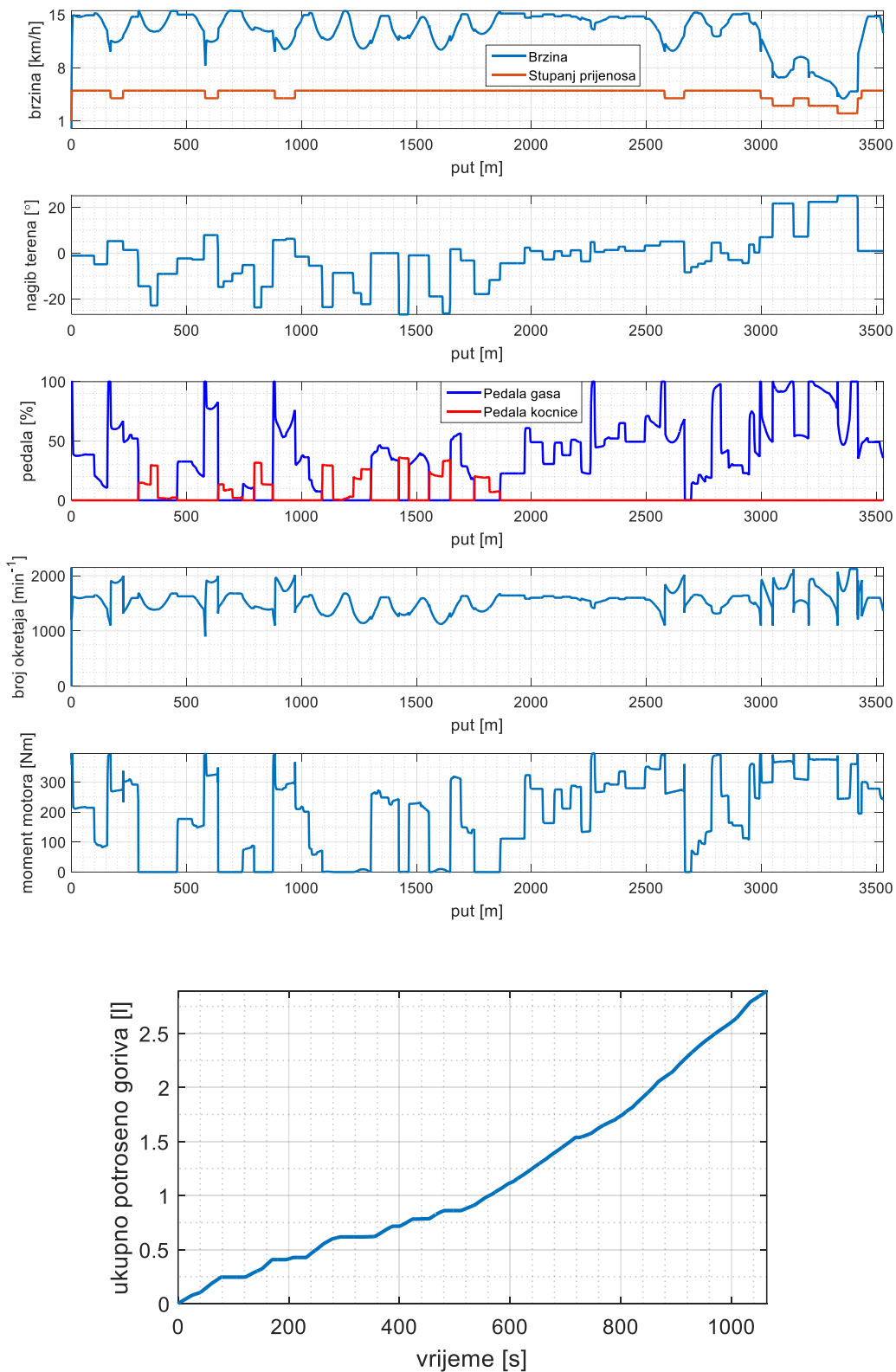
Staza 5 - nizbrdo - 0 t	2.53 km	$f = 0.11$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	792 s	1.38/1.28 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	-------	-------------



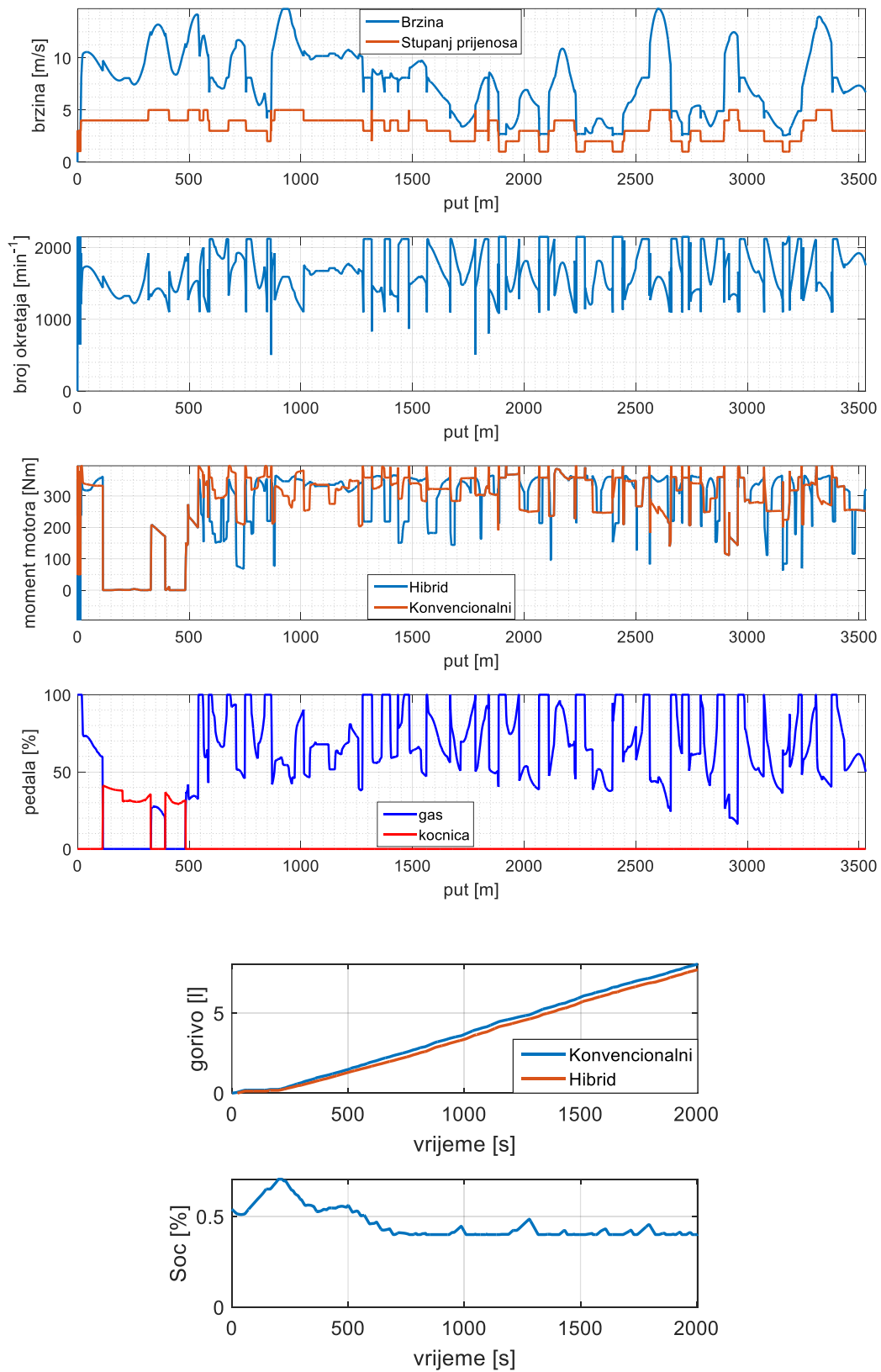
Staza 6 - uzbrdo - 5.3 t	3.53 km	$f = 0.14$	$\mu_p = 0.45$	$k = 0.39$	2280 s	9.10/8.50 l
--------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



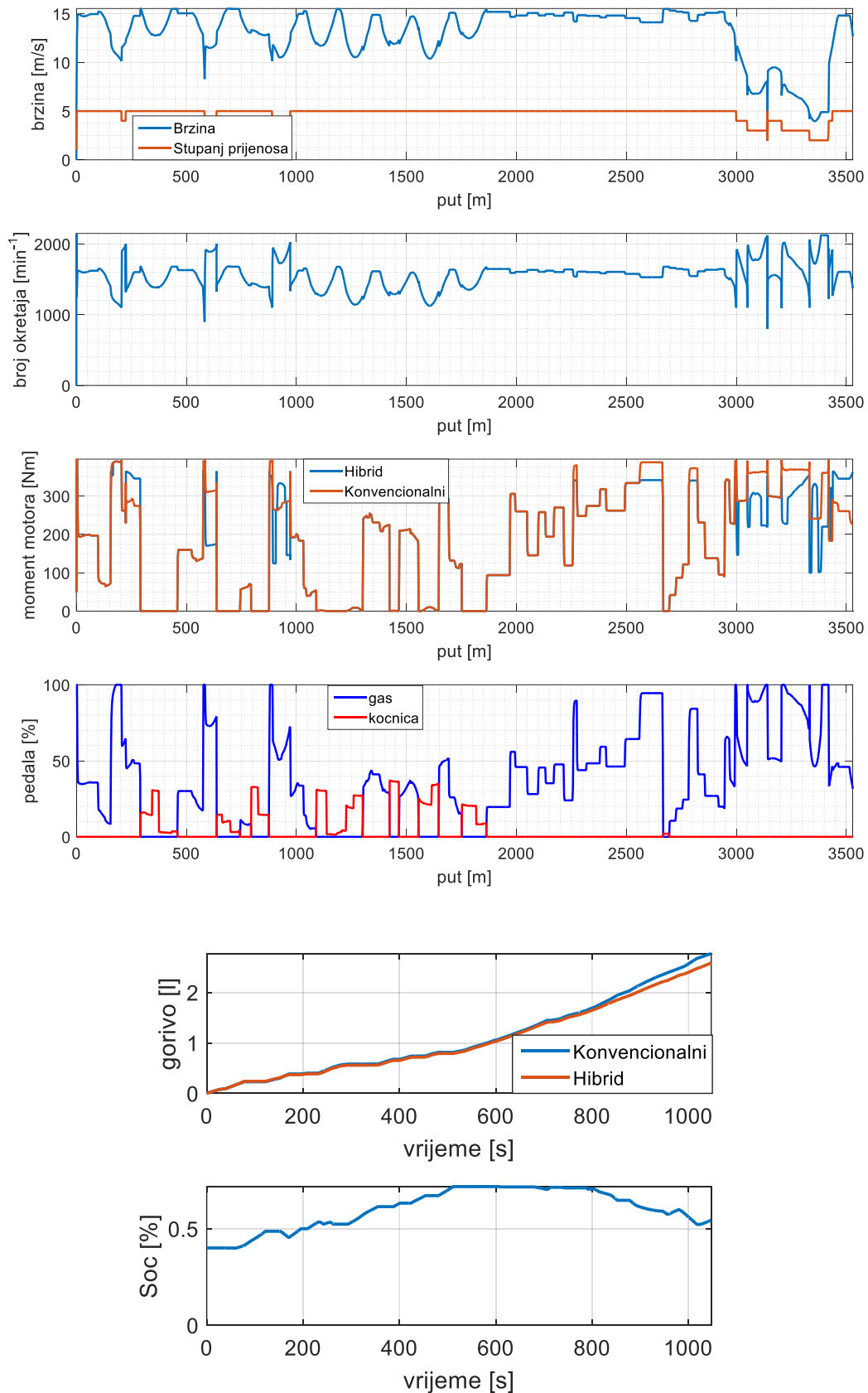
Staza 6 - nizbrdo - 0 t	3.53 km	$f = 0.14$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	1064 s	2.89/2.70 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	--------	-------------



Staza 6 - uzbrdo - 4.6 t	3.53 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0.42$	$k = 0.44$	1989 s	8.04/7.75 l
--------------------------	---------	------------	----------------	------------	--------	-------------



Staza 6 - nizbrdo - 0 t	3.53 km	$f = 0.13$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	1047 s	2.77/2.59 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	--------	-------------



Staza 6 - nizbrdo - 0 t	3.53 km	$f = 0.16$	$\mu_p = 0$	$k = 0$	1118 s	3.16/3.04 l
-------------------------	---------	------------	-------------	---------	--------	-------------

