

# Poboljšanje efikasnosti hidrauličkog vitla pomoću hidropneumatskog akumulatora

---

**Harjaček, Petar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:699679>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Petar Harjaček**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing.

Student:

Petar Harjaček

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Mihaelu Cipeku na stručnoj pomoći i pruženim savjetima tijekom izrade ovog rada, kao i na ukazanom razumijevanju. Također se zahvaljujem profesorima, asistentima i ostalim zaposlenicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje na prenesenom znanju.

Posebno se zahvaljujem roditeljima i braći, kao i ostatku obitelji koja mi je kroz studij bila bezuvjetna podrška i oslonac u radu.

Na kraju se zahvaljujem prijateljima i kolegama zbog kojih će mi ovaj period života ostati neizbrisiv u sjećanju.

Petar Harjaček



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Harjaček Petar** JMBAG: 0035209084

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Poboljšanje efikasnosti hidrauličkog vitla pomoću hidropneumatskog akumulatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Improving the efficiency of the hydraulic winch by means of a hydropneumatic accumulator**

### Opis zadatka:

Kod radova u šumi jedan od važnijih alata na šumskim traktorima je vitlo koje se koristi za privlačenje trupaca. Pogon vitla je uglavnom hidrostatički te se napaja hidrauličkom crpkom koju pogoni motor s unutarnjim izgaranjem. Prilikom privlačenja traktor miruje, a opterećenje vitla varira te vrlo često pogon nije optimalno opterećen. Dodavanjem hidropneumatskog akumulatora kao dodatnog izvora energije može se uvesti određena sloboda za izbor radne točke pogona, te je moguće optimirati proces vitlanja. Kako bi se dobio uvid u rad vitla i mogućnosti poboljšanja, potrebno je detaljno analizirati izmjerene terenske podatke te identificirati potreban rad vitla. Imajući to u vidu, ovaj zadatak bavi se analizom prikupljenih terenskih podataka te izradom računalnog modela modificiranog pogona hidrauličkog vitla, kod kojeg je dodan hidropneumatski akumulator, koji se inače koristi kod šumskih zglobnih traktora tzv. skidera. U radu je potrebno:

- detaljno opisati vitlo skidera,
- navesti mjernu opremu, analizirati prikupljene terenske podatke i definirati radni ciklus vitla,
- prema opterećenju radnog ciklusa vitla predložiti modifikaciju pogona dodavanjem hidropneumatskog akumulatora,
- izraditi i parametrirati računalni model sustava hidrauličkog vitla i hidropneumatskog akumulatora te provesti simulacije,
- na temelju dobivenih rezultata simulacije dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predvideni datumi obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Mihael Cipek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. VITLO ZGLOBNOG ŠUMSKOG TRAKTORA.....	2
2.1. Skider EcoTrac 140V .....	2
2.2. Hidrauličko vitlo .....	5
2.2.1. Karakteristike vitla.....	6
2.2.2. Postupak privitlavanja.....	8
3. MJERNA OPREMA.....	9
3.1. Mobilna jedinica WIGO-E.....	10
3.2. GPS uređaj s GPS/GSM antenom.....	11
3.3. Diferencijalni mjerač protoka goriva – DFM 100CD.....	11
4. ANALIZA PRIKUPLJENIH TERENSKIH PODATAKA.....	13
4.1. FMS podaci .....	13
4.2. GPS podaci.....	14
4.3. Podaci s mjerača protoka goriva .....	14
4.4. Izvještaj aktivnosti digitalnih ulaza.....	15
4.5. Rukovanje podacima.....	16
5. OPTEREĆENJE RADNOG CIKLUSA VITLA.....	21
5.1. Model pogona motora s unutarnjim izgaranjem .....	21
5.2. Modifikacija modela .....	23
5.3. Račun opterećenja .....	24
5.4. Provjera rezultata .....	28
6. HIDRAULIČKI AKUMULATOR.....	30
6.1. Membranski akumulatori .....	31
6.2. Akumulatori s mijehom .....	32
6.3. Politropska promjena stanja .....	33
6.4. Izentropa ili ravnotežna adijabata .....	35
7. MODELIRANJE HIDRAULIČKOG AKUMULATORA .....	37
7.1. Izračun minimalnog i maksimalnog radnog volumena.....	37
7.2. Izračun potrebnog volumena hidrauličkog akumulatora .....	38
7.3. Računalni model hidrauličkog akumulatora .....	38

---

8. REZULTATI SIMULACIJA.....	40
8.1. Rezultati ciklusa s maksimalnom energijom .....	40
8.2. Rezultati svih ciklusa .....	42
8.3. Ukupno potrošeno gorivo za vrijeme vitlanja.....	43
9. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Šumski zglobni traktor EcoTrac 140V [2] .....	2
Slika 2.	Dimenzije skidera EcoTrac 140V [1].....	4
Slika 3.	Raspodjela mase skidera EcoTrac 140V [1] .....	5
Slika 4.	Pozicija točke težišta skidera EcoTrac 140V [1].....	5
Slika 5.	Dimenzije bubnja vitla 2x100 kN [3].....	6
Slika 6.	Prijenos trupaca skiderom EcoTrac 120V [5] .....	8
Slika 7.	Komunikacijska shema FMS-a [1].....	9
Slika 8.	Mobilna jedinica WIGO-E [6] .....	10
Slika 9.	GPS/GSM antena [1].....	11
Slika 10.	Diferencijalni mjerač protoka goriva – DFM 100CD [7].....	12
Slika 11.	FMS podaci na dan 9. veljače 2022. ....	13
Slika 12.	GPS podaci na dan 9. veljače 2022. ....	14
Slika 13.	Podaci s mjerača protoka goriva na dan 9. veljače 2022.....	15
Slika 14.	Izvještaj aktivnosti digitalnih ulaza na dan 9. veljače 2022. ....	16
Slika 15.	Brzina skidera u vremenu .....	17
Slika 16.	Broj okretaja motora u vremenu.....	18
Slika 17.	Potrošnja goriva u vremenu.....	18
Slika 18.	Dijagram interpoliranih podataka.....	19
Slika 19.	Status vitlanja u odnosu na izmjerene podatke .....	20
Slika 20.	Model skalabilnog dizel motora baziran na Willans-ovim linijama [8].....	22
Slika 21.	Mapa potrošnje goriva s maksimalnim momentom [8].....	22
Slika 22.	Mapa specifične potrošnje goriva s maksimalnim momentom [8] .....	23
Slika 23.	Modificirani model skalabilnog dizel motora baziran na Willans-ovim linijama. ....	23
Slika 24.	Primjer MATLAB skripte za izračun opterećenja .....	25
Slika 25.	Rezultati simulacije ( $\tau_e$ ) za 9. veljače 2022.....	25
Slika 26.	Rezultati simulacije ( $\tau_e$ ) za 10. veljače 2022. ....	26
Slika 27.	Rezultati simulacije ( $W_e$ prema trajanju ciklusa) za 9. veljače 2022. ....	26
Slika 28.	Rezultati simulacije ( $W_e$ prema trajanju ciklusa) za 10. veljače 2022. ....	27
Slika 29.	Ciklus s najvećom utrošenom energijom na dan 9. veljače 2022. ....	28
Slika 30.	Ciklus na dan 9. veljače 2022.....	29
Slika 31.	Podjela hidrauličkih akumulatora [11] .....	30
Slika 32.	Hidropneumatski akumulator s membranom [11].....	32
Slika 33.	Hidropneumatski akumulator s mijehom [11].....	33
Slika 34.	Promjene stanja plina u hidropneumatskom akumulatoru [11].....	34
Slika 35.	Adijabatski proces promjene stanja plina [14] .....	36
Slika 36.	Računalni model hidrauličkog akumulatora.....	39
Slika 37.	Stalak s akumulatorima [15].....	41
Slika 38.	Volumen po ciklusu na dan 9. veljače 2022.....	42
Slika 39.	Volumen po ciklusu na dan 10. veljače 2022.....	42
Slika 40.	Potrošnja goriva za vrijeme stajanja skidera na dan 9. veljače 2022. ....	43



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podaci šumskog traktora EcoTrac 140V [2] .....	3
Tablica 2. Osnovne tehničke značajke vitla [3] .....	7
Tablica 3. Rad ciklusa u odnosu na vrijeme trajanja.....	27
Tablica 4. Osnovne značajke plinskih akumulatora [11] .....	31
Tablica 5. Kriteriji upotrebe hidropneumatskih akumulatora [11].....	35

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	mm	Udaljenost između oboda bubnja
$c_1$	-	Willansov koeficijent
$c_2$	-	Willansov koeficijent
$c_3$	-	Willansov koeficijent
$D_1$	mm	Promjer valjka bubnja
$D_2$	mm	Promjer oboda bubnja
$d$	mm	Promjer užeta
$d_{maks}$	mm	Najveći promjer užeta
$\Delta V$	L	Razlika volumena
$F_{loma}$	N	Prekidna sila užeta
$F_n$	N	Nazivna vučna sila
$F_{prazan}$	N	Vučna sila praznog bubnja
$F_{pun}$	N	Vučna sila punog bubnja
$h_1$	mm	Dubina oboda bubnja
$h_3$	mm	Sigurnosna udaljenost
$k$	-	Faktor užeta
$\kappa$	-	EkspONENT izentrope
$L$	m	Dužina užeta
$M_{max}$	Nm	Najveći moment
$M_v$	Nm	Moment na ulaznom vratilu iz hidromotora
$M_{vitlo}$	Nm	Moment na vitlu
$\dot{m}_f$	g/s	Maseni protok goriva
$n$	min <sup>-1</sup>	Frekvencija vrtnje
$n$	-	EkspONENT politrope
$n_{max}$	min <sup>-1</sup>	Najveća frekvencija vrtnje ulaznog vratila iz hidromotora
$\dot{\eta}$	-	Korisnost prijenosa između ulaznog vratila i bubnja
$P_v$	W	Snaga vitlanja
$p$	Pa, bar	Tlak
$p_0$	Pa, bar	Tlak predpunjenja plina
$p_1$	Pa, bar	Minimalni radni tlak
$p_2$	Pa, bar	Maksimalni radni tlak
$p_3$	Pa, bar	Maksimalni tlak
$R$	-	Prijenosni odnos između ulaznog vratila i bubnja
$\rho_f$	g/L	Gustoća goriva
$s_p$	-	Faktor skaliranja motora
$t$	s	Vrijeme

---

$\tau_e$	Nm	Okretni moment motora
$V$	$m^3, L$	Apsolutni volumen
$V_0$	$m^3, L$	Potreban volumen hidroakumulatora
$V_0$	$m^3, L$	Volumen predpunjenja
$V_1$	$m^3, L$	Maksimalni volumen
$V_2$	$m^3, L$	Minimalni radni volumen
$V_3$	$m^3, L$	Minimalni Volumen
$v$	km/h	Brzina skidera
$v_f$	L/s	Volumni protok goriva
$v_{max}$	m/s	Brzina punog bubnja
$v_{min}$	m/s	Brzina praznog bubnja
$W_{12}$	J	Rad akumulatora
$W_{teh}$	J	Tehnički rad akumulatora
$W_v$	J	Rad vitlanja
$\omega_e$	rad/s	Kutna brzina motora

## **SAŽETAK**

Ovaj rad proučava hidrauličko vitlo zglobnog šumskog traktora tzv. skidera s fokusom na poboljšanja u radnoj učinkovitosti kroz uvođenje hidropneumatskog, odnosno hidrauličkog akumulatora. Nakon uvodnog opisa skidera i specifičnosti hidrauličkog vitla, rad analizira ključne aspekte rada vitla. Prikazana je važnost mjernih uređaja u prikupljanju podataka o vitlu. Zatim je provedena analiza terenskih podataka korištenjem modificiranog modela pogona kod kojeg se koristi motor s unutarnjim izgaranjem. Predložena modifikacija hidrauličkog sustava uključuje integraciju hidrauličkog akumulatora kao sredstva za pohranu energije. Objasnjen je princip rada akumulatora, ističući njegovu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti vitla. Potreban volumen hidrauličkog akumulatora određen je pomoću računalnog modela, a rezultati simulacija pružaju uvid u rad vitla i daju učinke uvođenja hidrauličkog akumulatora u sustav. Rad kombinira teorijski pristup, eksperimentalna mjerenja i simulacije pomoću programskog paketa MATLAB Simulink.

Ključne riječi: skider, hidraulički akumulator, terenski podaci, vitlo, računalni model

## **SUMMARY**

This paper investigates the hydraulic winch of an articulated forestry tractor, commonly known as a skidder, with a focus on improving operational performance through the integration of a hydropneumatic, or hydraulic accumulator. Following an introductory description of the skidder and the specifics of the hydraulic winch, the study analyzes key aspects of winch operation. The importance of measurement devices in collecting winch data is emphasized. Subsequently, field data analysis is conducted using a modified drive model that employs an internal combustion engine. The proposed modification of the hydraulic system includes the integration of a hydraulic accumulator as an energy storage device. The operational principle of the accumulator is explained, highlighting its role in enhancing the energy efficiency of the winch. The required volume of the hydraulic accumulator is determined using a computer model and simulation results provide insights into the winch's operation and the effects of introducing the hydraulic accumulator into the system. The paper combines a theoretical approach, experimental measurements and simulations, using the MATLAB Simulink software package.

Key words: skidder, hydraulic accumulator, field data, winch, computer model

## 1. UVOD

Ubrzan razvoj industrije u proteklim desetljećima uvelike je olakšao život prosječnome čovjeku, no isto tako je značajno utjecao na onečišćenje okoliša. Klimatske promjene nastale uslijed spomenutog onečišćenja potakle su povećanje svijesti o potrebi očuvanja prirode. Tako se u doba sve veće zabrinutosti za okoliš i hitne potrebe za rješavanje promjena industriji nameću izazovi preispitivanja i preoblikovanja svojih postojećih operativnih postupaka. S ovim problemima susreću se sve industrije, a među njima i šumarska. Jedan od najpotrebnijih alata koji se koristi u šumskoj industriji je hidrauličko vitlo postavljeno na šumski traktor, tzv. skider, kojemu je zadatak privući trupce. Vitlo je pogonjeno hidrauličkom crpkom koju pogoni motor s unutarnjim izgaranjem. Isključivo korištenje takvih motora radi ostvarivanja potrebnih sila i momenata neizbježno ima značajne negativne posljedice za okoliš jer pridonosi emisiji štetnih plinova. Još jedan nedostatak ove vrste pogona, u ovoj primjeni, je varijabilnost tereta, što često rezultira ne optimalnim radom.

Kao ekološki osvještenijom alternativom za pogon, a radi mogućnosti boljeg optimiranja procesa vitlanja može se dodati hidropneumatski akumulator kao dodatni izvor energije. Pohranjivanje viška energije u obliku tekućine pod pritiskom u razdobljima niske potražnje omogućuje oslobađanje iste na zahtjev kako bi se pogonio hidraulički motor, što je pogodno u sustavima gdje zahtjevi za snagom mogu značajno varirati, kao što je hidrauličko vitlo na skideru.

Iako korištenje hidropneumatskog akumulatora za pogon hidrauličkog vitla na skideru daje mogućnost optimizacije cjelokupnog procesa privlačenja trupaca, njihova implementacija potencijalno je ograničena u vidu tehnološke izvedivosti i ekonomskih aspekata.

## 2. VITLO ZGLOBNOG ŠUMSKOG TRAKTORA

U šumarskoj industriji, za potrebe privlačenja i prihvata drva koriste se šumski traktori, tzv. skideri. To su namjenska vozila koja su konstrukcijski prilagođena vožnji po šumskim putevima i vlakama. Za privlačenje trupaca skideri su opremljeni hidrauličkim vitlom, no postoje i druga rješenja prihvata i utovara drva. Svi skideri imaju zajedničke osnovne značajke, a to su zglobno upravljanje, pogon na sva četiri kotača i raspodjelu opterećenja takvu da prednja osovina nosi otprilike dvije trećine ukupne mase skidera. Ove specifičnosti poboljšavaju okretnost i u eksploataciji šuma daju bolje radne značajke [1].

### 2.1. Skider EcoTrac 140V

Šumski zglobni traktor EcoTrac 140V dio je šumskog programa hrvatske tvrtke Hittner d.o.o. iz grada Bjelovara. Ova tvrtka specijalizirana je za proizvodnju traktora, njihovih priključaka i rezervnih dijelova. Krajem 2000. godine proizveden je prvi prototip šumskog traktora, te zbog značaja za Hrvatske šume d.o.o. od 2001. godine stupa u proizvodnju uz kontinuiran razvoj [2].

Šumski traktor EcoTrac 140V zglobni je traktor koji posjeduje sve potrebne karakteristike za snalaženje i rad u teškim šumskim uvjetima. Uz već spomenut pogon na sva četiri kotača, opremljen je hidrauličnom prednjom odzivnom daskom i stražnjom zaštitnom daskom. Primarna funkcija prednje daske je ta da čisti put od prepreka za vrijeme kretanja skidera, a tako i štiti druge bitne dijelove i sustave na šumskom traktoru od oštećenja. Zadnja daska služi za prihvaćanje trupaca kako bi se podigao njihov prednji kraj od tla, a za vrijeme privlačenja štiti zadnju osovину i kotače. Slika 1 prikazuje šumski traktor EcoTrac 140V.



Slika 1. Šumski zglobni traktor EcoTrac 140V [2]

Neki od tehničkih podataka šumskog zglobnog traktora EcoTrac 140V dani su u tablici 1.

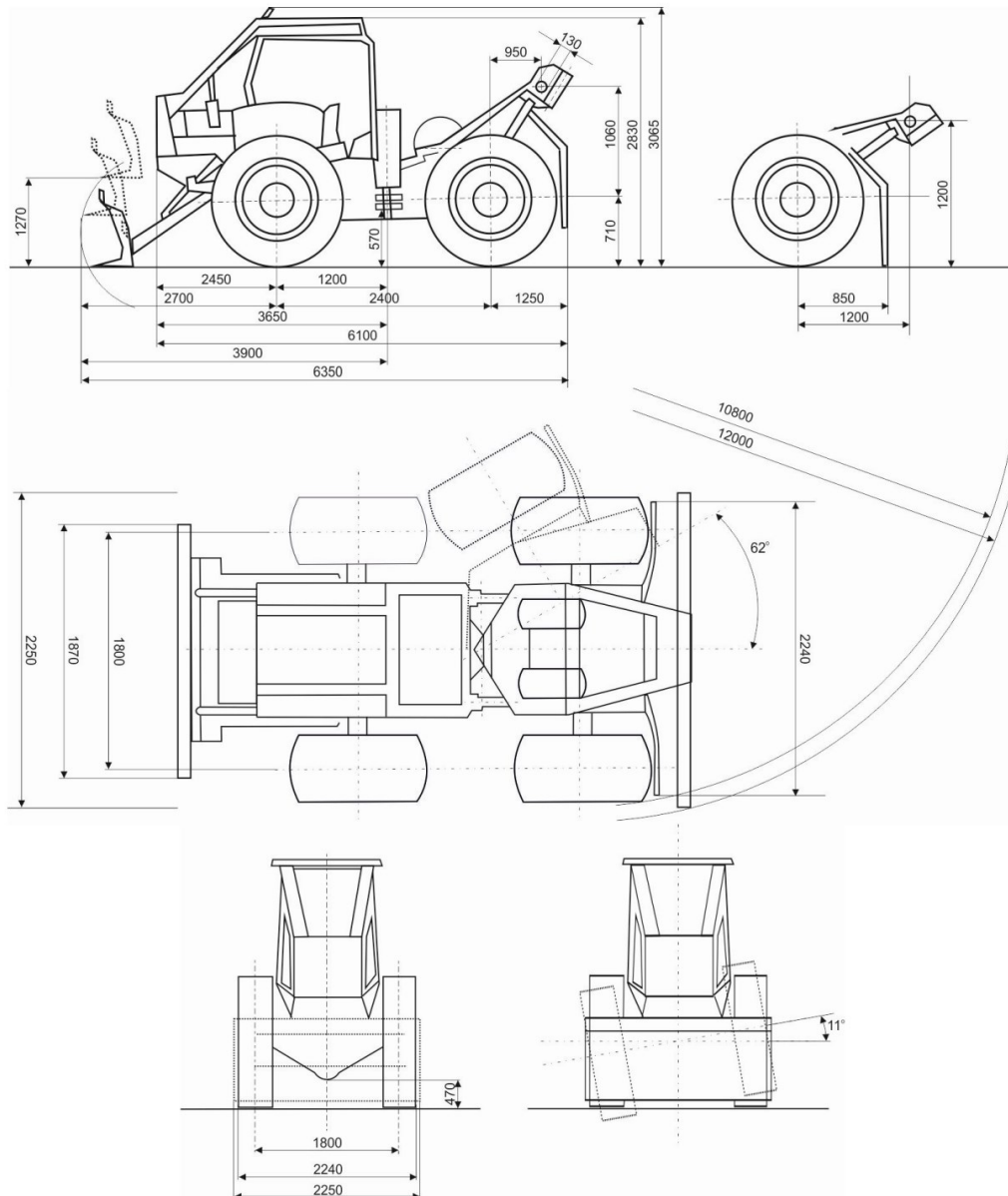
**Tablica 1. Tehnički podaci šumskog traktora EcoTrac 140V [2]**

Tip	Zglobni
Motor	Cummins QSB4.5
Snaga	104 kW
Hlađenje	Vodeno
Mjenjač	Mehanički, 12 stupnjeva prijenosa unaprijed, 2 unazad
Pogon	Stalni 4x4
Upravljanje	Hidrauličko
Prednja odzivna daska	Hidraulička
Stražnja zaštitna daska	Hidraulička
Masa	8060 kg
Dimenzije (DxŠxV)	6350 mm x 2250 mm x 3065 mm
Vitlo	Hidraulički pogonjeno dvobubanjno
Upravljanje vitlom	Joysitck
Čelično uže	Φ14 x 70 m

Glavne dimenzije šumskih traktora moraju pratiti normu ISO 13861:2000 (*Machinery for forestry – Wheeled skidders – Terms, definitions and commercial specifications*). Po njoj se određuju mjere kao duljina okvira, ukupna duljina, međuosovni razmak, ukupna visina, promjer guma, visina vitla, ukupna širina, itd. Prema toj normi napravljen je i skider EcoTrac 140V, a njegove dimenzije vizualno su prikazane na slici 2 [1].

Zglob koji se nalazi na sredini međuosovinskog razmaka omogućuje zakretanje šasije oko horizontalne osi traktora, te se na taj način traktorom upravlja. Radijus skretanja je u zglobnoj izvedbi relativno mali, što je vrlo korisno kod manevriranja u zahtjevnim uvjetima. Slično, prednja osovina ima mogućnost zakretanja, čime se povećava stabilnost skidera.

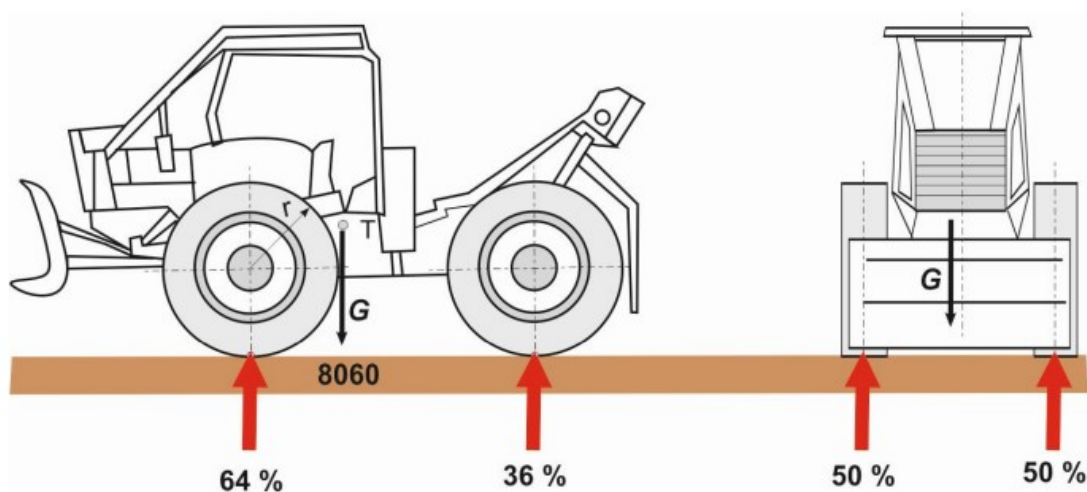




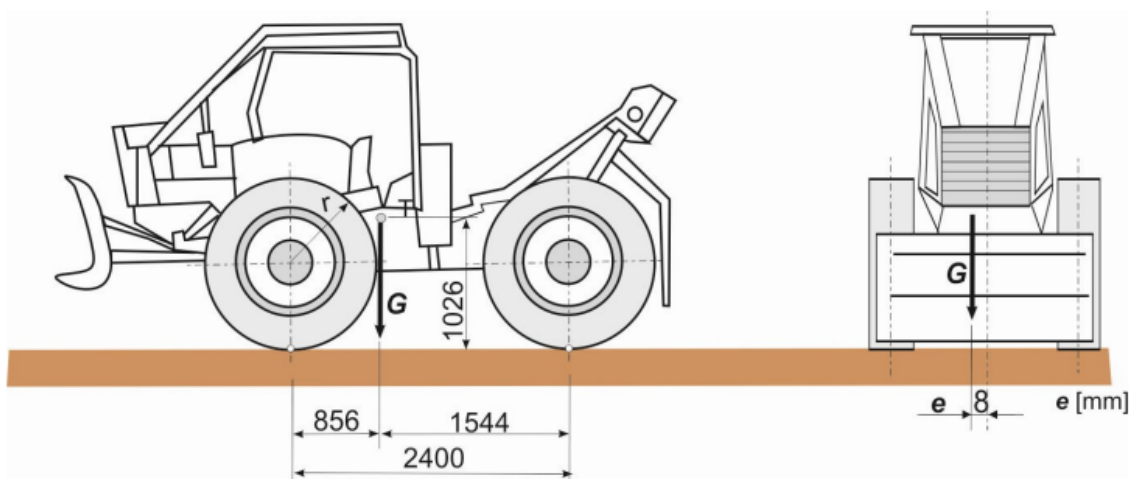
Slika 2. Dimenzije skidera EcoTrac 140V [1]

Za vrijeme privlačenja trupaca, ovisno o masi trupca, ukupno opterećenje na prednjoj i stražnjoj osovini se izjednačava ili postaje veće na stražnjoj.

Skider EcoTrac 140V tako na prednjoj osovini nosi 64 % mase traktora koja iznosi 8060 kg, odnosno na stražnjoj 36 %. Raspodjela mase na skideru prikazana je na slici 3, a točna pozicija težišta na slici 4.



Slika 3. Raspodjela mase skidera EcoTrac 140V [1]



Slika 4. Pozicija točke težišta skidera EcoTrac 140V [1]

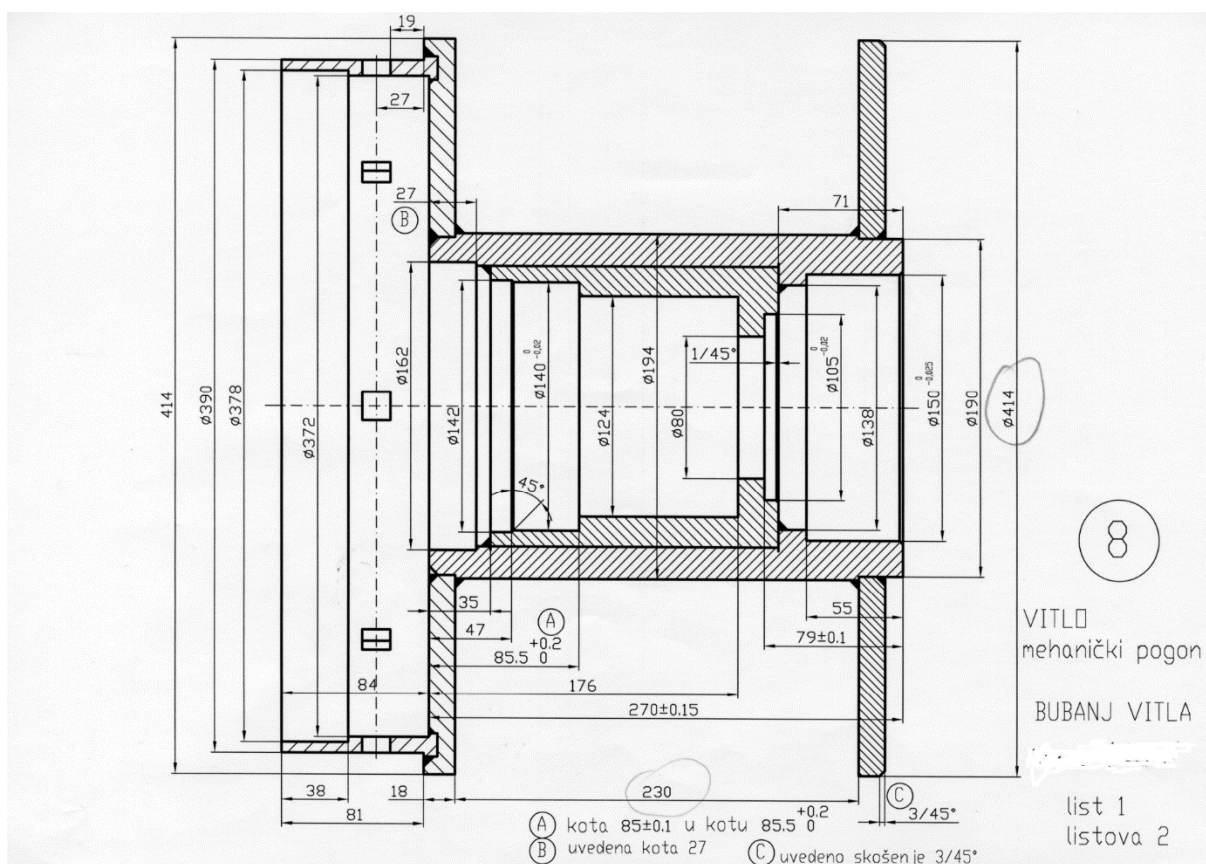
## 2.2. Hidrauličko vitlo

Za rukovanje trupcima u svrhu njihovog privlačenja na skider se postavlja hidrauličko vitlo. Hidrauličko vitlo je uređaj koji obavlja vučne operacije, a za svoje djelovanje koristi hidrauličku energiju. Ona dolaze u raznim veličinama i kapacitetima, prilagođenim različitim potrebama i uvjetima rada. Svako vitlo opremljeno je hidrauličkim motorom koji preko raznih prijenosnika pokreće bubanj oko kojega je namotano uže i njegovom rotacijom omogućava privlačenje tereta. Hidrauličko vitlo može biti izvedeno s jednim ili dva bubnja.

### 2.2.1. Karakteristike vitla

Na skider EcoTrac 140V postavljeno je vitlo Hittner 2 x 100 kN. Izvedba vitla je dvobubanjjska, te je na bubnjevima, koji imaju slobodan hod, učvršćeno uže. Pogon vitla je hidraulički i izveden na način da se s pogonskog motora skidera pogoni hidraulička pumpa koja pri nazivnom broju okretaja motora od  $2200 \text{ min}^{-1}$  proizvodi 250 bara radnog tlaka. U tim uvjetima hidromotor pokreće ulazno vratilo vitla i predaje moment od 540 Nm. U slučaju povećanja broja okretaja na  $2800 \text{ min}^{-1}$  pumpa proizvodi radni tlak u iznosu od 420 bara, a hidromotor predaje moment od 907 Nm na ulazno vratilo. Unutar lijevanog kućišta vitla prijenos snage odvija se preko pužnog prijenosnika. Spojkom vitla koje je frikcijska u konusnoj izvedbi te pojasnom kočnicom upravlja se hidraulički. Valjak bubnja s jednom prirubnicom izveden je lijevanjem, dok je druga prirubnica izrađena od čeličnog lima i spojena vijcima. Čelično uže vođeno je preko jednog vodoravnog i dva uspravna valjka u jednom kućištu [3].

Na slici 5 prikazane su dimenzije bubnja vitla postavljenog na šumski traktor.



Slika 5. Dimenzije bubnja vitla 2x100 kN [3]

Tablica 2. Osnovne tehničke značajke vitla [3]

Uže	Izvedba užeta		6(1+6+12+18)		6(1+6+12+18)	
	$d$	Promjer užeta	14	mm	16	mm
	$k$	Faktor užeta	0,0148		0,0113	
	$L$	Duljina užeta – proračun	78,45	m	60,06	m
	$d_{maks}$	Najveći promjer užeta	23,75	mm	23,75	mm
Dimenzije bubnja	$D_1$	Promjer valjka bubnja	190	mm	190	mm
	$D_2$	Promjer oboda bubnja	414	mm	414	mm
	$b$	Udaljenost između oboda bubnja	230	mm	230	mm
	$h_1$	Dubina oboda	112	mm	112	mm
	$h_3$	Sigurnosna udaljenost mjerena	28	mm	28	mm
Prijenosni odnosi	$R$	Prijenosni odnos između ulaznog vratila i bubnja	18		18	
	$\eta$	Korisnost prijenosa između ulaznog vratila i bubnja	0,95	%	0,95	%
Momenti i brzine vrtnje	$M_v$	Moment na ulaznom vratilu iz hidromotora	540	Nm	540	Nm
	$M_{vitlo}$	Moment na vitlu	513	Nm	513	Nm
	$M_{maks}$	Najveći moment	907	Nm	907	Nm
	$M_{vitlo}$	Moment na vitlu	861,65	Nm	861,65	Nm
	$n_{maks}$	Najveća frekvencija vrtnje ulaznog vratila iz hidromotora	2500	min <sup>-1</sup>	2500	min <sup>-1</sup>
	261,8		s <sup>-1</sup>	261,8	s <sup>-1</sup>	
Vučne sile	$F_{prazan}$	Vučna sila praznog bubnja	90529	N	89650	N
	$F_{pun}$	Vučna sila punog bubnja	53686	N	54000	N
	$F_n$	Nazivna vučna sila – proračun	152056	N	150580	N
	$F_n$	Nazivna vučna sila – proizviđač	100000	N	100000	N
	$F_{loma}$	Prekidna sila užeta – prema normi	212878	N	210811	N
Brzine	$v_{min}$	Brzina praznog bubnja	1,48	m/s	1,5	m/s
	$v_{max}$	Brzina punog bubnja	2,5	m/s	2,49	m/s

U tablici 2 prikazane su izmjerene i proračunate značajke vitla Hittner 2 x 100 kN. Prema tim podacima zaključuje se da vitlo svojim dimenzijama, sigurnosnoj zoni, preporučenom užetu, proračunatoj vučnoj sili, brzini privitlavanja i ostalim sigurnosnim i tehničkim zahtjevima odgovara normama ISO 6816, ISO 6687 i ISO 4254-4.

### 2.2.2. Postupak privitlavanja

Kada skider dođe na lokaciju na kojoj je potrebno privući trupac, prvo se mora u potpunosti zaustaviti, te s pomoću kočnica i prednje i stražnje odzivne ploče stabilizirati. Skider radi u praznom hodu za vrijeme omatanja trupaca čeličnim užetom koje se odmotava s bubnjeva vitla. Nakon što su trupci sigurno pričvršćeni može se započeti s procesom privitlavanja. Taj proces odvija se sve dok se trupci ne privuku u potpunosti, tj. do stražnje zaštitne ploče. Tada se vitlo zakoči a skider kreće s izvlačenjem i prijenosom trupca [4].

Tokom vožnje povremeno može doći do zapinjanja trupaca, posebno kada skider naiđe na lošu podlogu. U takvim slučajevima potrebno je popustiti vitlo, premjestiti skider na stabilnu površinu i zatim ponovno koristiti vitlo kako bi se privukli trupci.

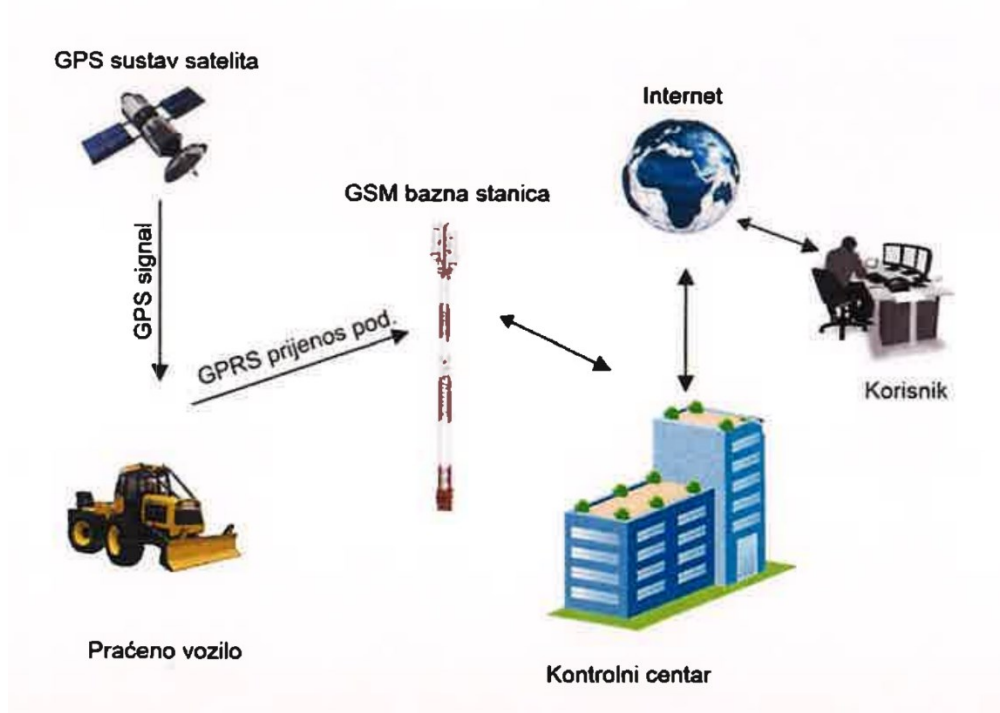
Slika 6 prikazuje proces prijenosa trupca s pomoću skidera EcoTrac 120V.



Slika 6. Prijenos trupca skiderom EcoTrac 120V [5]

### 3. MJERNA OPREMA

Kako bi se mogao pratiti i analizirati rad vozila potrebno je prikupljati određene podatke. U tu svrhu skideri su opremljeni sustavima za upravljanje i praćenje rada, tzv. *Flat Management System* (FMS) tvrtke Mobilisis. Praćenje položaja omogućuje GPS uređaj mobilne jedinice FMS sustava koji se ugrađuje na vozilo. Na istu jedinicu priključuju se i drugi razni pretvornici i senzori kako bi se došlo do drugih bitnih podataka, a prvenstveno informacija o potrošnji goriva pogonskog motora u raznim režimima rada. Sve bitne informacije šalju se u centralni server tvrtke Mobilisis koja kroz svoje korisničko sučelje omogućuje pregled pohranjenih podataka. Na slici 7 prikazana je komunikacijska shema FMS-a [1].



Slika 7. Komunikacijska shema FMS-a [1]

Osnovne komponente FMS-a ugrađene na skider su:

- WIGO-E mobilna jedinica
- GPS uređaj s GPS/GSM antenom
- Diferencijalni mjerac protoka goriva – DFM 100CD

### 3.1. Mobilna jedinica WIGO-E

Za prikupljanje podataka na skider EcoTrac140V ugrađena je mobilna jedinica WIGO-E. To je industrijski uređaj s pomoću kojega se povezuju senzori, strojevi i internetska platforma za prikupljanje i obradu očitanih podataka. Za prijenos podataka na web platforme koristi razne komunikacijske protokole (WLAN, LAN i GSM). Svi dobiveni podaci mogu se iskoristiti za optimizaciju rada ili povećanje produktivnosti. Na slici 8 prikazana je WIGO-E mobilna jedinica [6].



Slika 8. Mobilna jedinica WIGO-E [6]

Rad u šumskim uvjetima često kao posljedicu ima izostanak GSM signala, time i prestanak komunikacije što može voditi do gubitka podataka. Ova mobilna jedinica ima korisnu značajku da u takvom slučaju sve izmjerene podatke pohranjuje u svoju unutarnju memoriju, a u trenutku kada se vozilo nađe na području pokrivenom GSM signalom te pohranjene podatke šalje prema serveru [1].

### 3.2. GPS uređaj s GPS/GSM antenom

GPS uređaj je dio FMS-a, te se kao takav ugrađuje na skider zajedno s GPS/GSM antenom. S pomoću ovih uređaja prikupljeni podaci se prenose na server, ali se omogućuje i prijem satelitskog signala za rad GPS-a, tj. dobivanje lokacije ali i brzine vozila. Antena je prikazana na slici 9. Ova izvedba namijenjena je za strojeve koji rade u teškim terenskim uvjetima, kao i u uvjetima gdje mogu postojati poteškoće s prijemom signala GSM mreže [1].



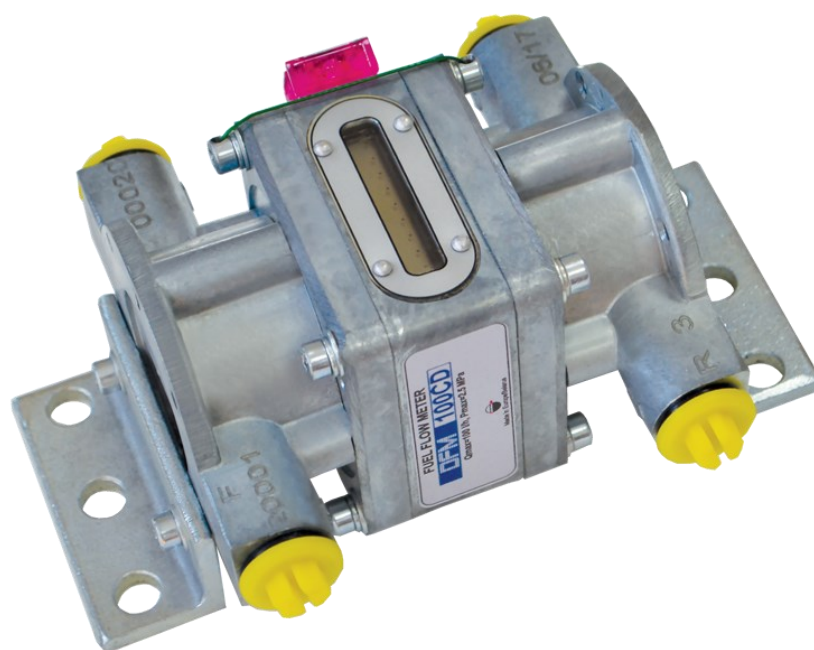
Slika 9. GPS/GSM antena [1]

Povezivanjem WIGO-E mobilne jedinice sa sensorima motora, osim GPS podataka o lokaciji dobivaju se i ostali bitni podaci o samom radu traktora kao što su informacije o potrošnji goriva, brzini vrtnje dizelskog motora, momentu motora i položaju papučice gasa. Oni se mjere i bilježe u intervalima od pet sekundi.

### 3.3. Diferencijalni mjerac protoka goriva – DFM 100CD

Kako bi dobili što preciznije podatke o potrošnji goriva, na skider se dodatno ugrađuje mjerac protoka goriva DFM 100CD koji je prikazan na slici 10. Preciznost mjerenja protoka goriva ovog uređaja je 0,001 L. Kroz mjerac prolazi dobavni vod goriva prema pogonskom motoru, kao i ostatak goriva koje se ne utroši i vraća u spremnik. Na taj način se vrši diferencijalna korekcija potrošnje goriva [1].





**Slika 10. Diferencijalni mjerac protoka goriva – DFM 100CD [7]**

## 4. ANALIZA PRIKUPLJENIH TERENSKIH PODATAKA

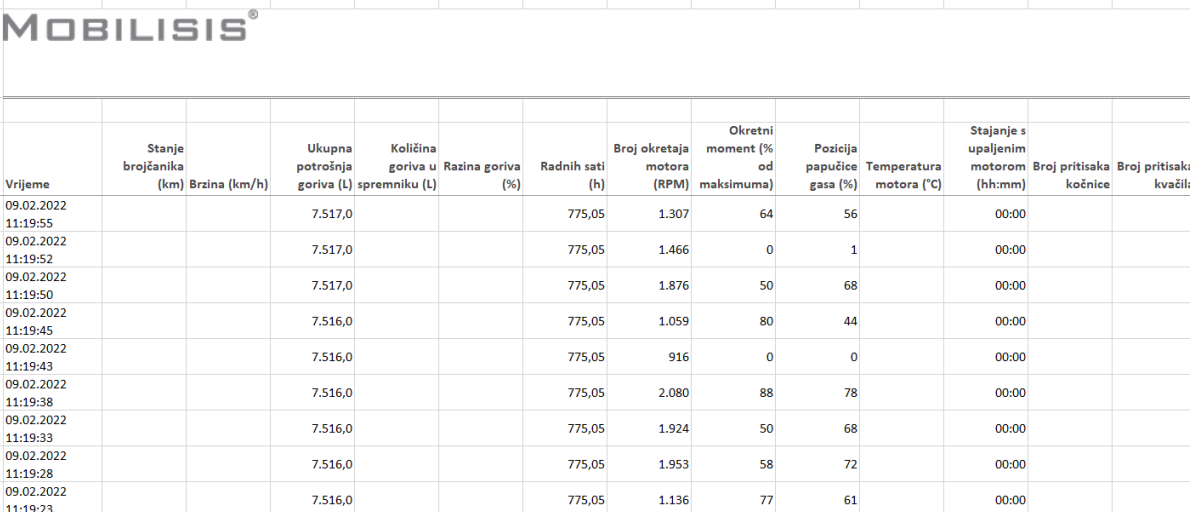
Ulazni podaci koji omogućuju daljnje razmatranje i proračun prikupljeni su putem ranije spomenutih mjernih uređaja. Za potrebe ovog rada odabrana su mjerenja zabilježena u dva radna dana 9. veljače 2022. i 10. veljače 2022. na području Bjelovarske županije. Sve izmjerene vrijednosti preuzete su u .xlsx formatu s portala tvrtke Mobilisis. Potrebni podaci zapisani su u različitim tablicama:

- FMS podaci
- GPS podaci
- Podaci s mjerača protoka goriva
- Izvještaj aktivnosti digitalnih ulaza

### 4.1. FMS podaci

FMS sustav za upravljanje vozilima omogućava praćenje vozila tako da prikuplja podatke s pomoću uređaja WIGO-E. Podaci koji se mjere ovim putem su ukupna potrošnja goriva, broj radnih sati vozila, broj okretaja motora, postotak okretnog momenta od maksimuma i pozicija papučice gasa. Za potrebe dobivanja relevantnih podataka za proračun iz ove tablice uzima se vrijednost broja okretaja motora. Tablični prikaz podataka prikazan je na slici 11.

FMS podaci | Bjelovar (EcoTrack 140) | 09.02.2022 00:00 - 23:59



Vrijeme	Stanje brojčanika		Ukupna potrošnja goriva (L)	Količina goriva u spremniku (L)	Razina goriva (%)	Radnih sati (h)	Broj okretaja motora (RPM)	Okretni moment (% od maksimuma)	Pozicija papučice gasa (%)	Temperatura motora (°C)	Stajanje s upaljenim motorom (hh:mm)	Broj pritisaka kočnice	Broj pritisaka kvačila
	(km)	Brzina (km/h)											
09.02.2022 11:19:55			7.517,0			775,05	1.307	64	56		00:00		
09.02.2022 11:19:52			7.517,0			775,05	1.466	0	1		00:00		
09.02.2022 11:19:50			7.517,0			775,05	1.876	50	68		00:00		
09.02.2022 11:19:45			7.516,0			775,05	1.059	80	44		00:00		
09.02.2022 11:19:43			7.516,0			775,05	916	0	0		00:00		
09.02.2022 11:19:38			7.516,0			775,05	2.080	88	78		00:00		
09.02.2022 11:19:33			7.516,0			775,05	1.924	50	68		00:00		
09.02.2022 11:19:28			7.516,0			775,05	1.953	58	72		00:00		
09.02.2022 11:19:23			7.516,0			775,05	1.136	77	61		00:00		

Slika 11. FMS podaci na dan 9. veljače 2022.

## 4.2. GPS podaci

GPS podaci prikupljeni s pomoću GPS uređaja i GPS/GSM antene pokazuju bitne informacije o lokaciji skidera za vrijeme njegovog rada. Osim samih lokacijskih podataka u obliku geografske visine i geografske širine u tablici su prikazani i podaci brzine traktora, nadmorske visine na kojoj se nalazi i smjeru kretanja u svakom trenutku mjerenja. Od ovih podataka, za daljnju analizu potrebno je koristiti podatke o brzini skidera. Tablični prikaz GPS podataka snimljenih na dan 9. veljače 2022. vidljiv je na slici 12.

GPS podaci | Bjelovar (EcoTrack 140) | 09.02.2022 00:00 - 23:59

**MOBILISIS®**

Vrijeme	Lat,Lon	Brzina (km/h)	Visina (m)	Smjer (°) Kontakt
09.02.2022 13:09:15	45.4970,16.8449	0	181	0 -
09.02.2022 13:08:50	45.4970,16.8449	0	181	0 -
09.02.2022 13:08:25	45.4970,16.8449	0	180	0 -
09.02.2022 13:08:23	45.4971,16.8449	7	180	167 -
09.02.2022 13:08:23	45.4971,16.8449	7	180	167 -
09.02.2022 13:08:20	45.4971,16.8449	6	181	165 -
09.02.2022 13:08:13	45.4972,16.8449	5	180	151 -
09.02.2022 13:08:11	45.4972,16.8448	6	180	165 -
09.02.2022 13:08:10	45.4972,16.8448	5	180	182 -
09.02.2022 13:08:09	45.4972,16.8448	5	180	199 -
09.02.2022 13:08:07	45.4973,16.8449	6	179	218 -
09.02.2022 13:07:59	45.4974,16.8450	6	175	235 -
09.02.2022 13:07:55	45.4974,16.8450	5	173	219 -
09.02.2022 13:07:54	45.4974,16.8450	5	173	207 -

Slika 12. GPS podaci na dan 9. veljače 2022.

## 4.3. Podaci s mjerača protoka goriva

Kao što je navedeno FMS tablica već sadrži podatke o ukupnoj potrošnji goriva, no točnost mjerenja nije dovoljno točna. Ugradnjom mjerača DFM 100D dobivaju se mjerenja s točnošću od 0,001 L u odnosu na točnost od 1 L dobivene iz FMS tablice. Protok se može očitati trenutno u svakom trenutku ili akumulirana vrijednost potrošnje, a moguće je pratiti i potrošnju u raznim režimima rada. Pored toga prikazani su i podaci o vremenu rada motora i trenutačnoj temperaturi goriva u spremniku. Tablični prikaz podataka s mjerača protoka goriva vidljiv je na slici 13.

Mjerač protoka goriva | Bjelovar (EcoTrack 140) | 09.02.2022

**MOBILISIS®**

Datum	Temperatura goriva (°C)	Mod mjerača	Trenutna potrošnja goriva (L/h)	Ukupno izmjerena potrošnja goriva (0.001 L)	Potrošnja goriva u radu na mjestu (0.001 L)	Potrošnja goriva u vožnji (0.001 L)	Potrošnja goriva u radu na maksimalnom protoku (0.001 L)	Potrošnja goriva u radu s manipulacijom dovoda ili povrata goriva (0.001 L)	Vrijeme rada motora prema zabilježenom protoku goriva (hh:mm)	Vrijeme rada motora u stajanju (hh:mm)	Vrijeme rada motora u vožnji prema optimalnom protoku (hh:mm)	Vrijeme rada motora s maksimalnim protokom (hh:mm)	Vrijeme rada motora s manipulacijom dovoda ili povrata goriva (hh:mm)	Vrijeme rada motora s uočenim problemom s isprevnim mjerenjem mjerača (hh:mm)
09.02.2022 13:27	66	1	0,09	495,414	66,859	416,8	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	66	1	0,11	495,419	66,859	416,805	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,03	495,424	66,859	416,81	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,11	495,434	66,859	416,82	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,14	495,444	66,859	416,83	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,12	495,454	66,859	416,84	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,42	495,484	66,859	416,87	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,54	495,504	66,859	416,89	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,78	495,539	66,859	416,925	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	1	0,74	495,574	66,859	416,96	11,755	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	2	0,8	495,624	66,859	416,98	11,785	3,98	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	3	1,14	495,664	66,859	416,98	11,825	4	54:52	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	2	0,92	495,759	66,859	416,98	11,92	4,015	54:53	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08
09.02.2022 13:27	65	2	0,8	495,804	66,859	416,98	11,965	4,015	54:53	31:51	22:49	00:00	00:02	00:08

**Slika 13. Podaci s mjerača protoka goriva na dan 9. veljače 2022.**

#### 4.4. Izvještaj aktivnosti digitalnih ulaza

Iz digitalnih ulaza mogu se iščitati podaci o trajanju i vremenu rada vitla ili motora pri niskim i visokim okretajima. Posebno su prikazana vremena rada lijevog i desnog bubnja hidrauličkog vitla, što je vidljivo na slici 14. U ovom radu režim rada vitla je dobiven iz podataka opterećenja motora iz FMS, GPS i tablice mjerača protoka goriva.

Početak aktivnosti	Kraj aktivnosti	Prijeđeni put (km)	Rad motora	Vitlo lijevo	Vitlo desno	Niski okretaji	Visoki okretaji
09.02.2022 09:16:10	09.02.2022 09:16:39	0,0					00:00:29
09.02.2022 09:16:40	09.02.2022 09:19:16	0,0				00:02:36	
09.02.2022 09:18:06	09.02.2022 09:18:14	0,0		00:00:08			
09.02.2022 09:18:38	09.02.2022 09:18:39	0,0		00:00:01			
09.02.2022 09:18:41	09.02.2022 09:18:43	0,0			00:00:02		
09.02.2022 09:19:00	09.02.2022 09:19:09	0,0			00:00:09		
09.02.2022 09:19:16	09.02.2022 09:19:26	0,0					00:00:10
09.02.2022 09:19:26	09.02.2022 09:22:30	0,0				00:03:04	
09.02.2022 09:21:43	09.02.2022 09:22:04	0,0		00:00:21			
09.02.2022 09:22:30	09.02.2022 09:22:32	0,0				00:00:02	
09.02.2022 09:22:30	09.02.2022 09:26:36	0,0					00:04:06
09.02.2022 09:26:36	09.02.2022 09:26:41	0,0				00:00:05	
09.02.2022 09:26:41	09.02.2022 09:30:19	0,0					00:03:38
09.02.2022 09:30:19	09.02.2022 09:30:38	0,0				00:00:19	
09.02.2022 09:30:23	09.02.2022 09:30:24	0,0			00:00:01		
09.02.2022 09:30:38	09.02.2022 09:30:41	0,0				00:00:03	
09.02.2022 09:30:38	09.02.2022 09:31:00	0,0					00:00:22
09.02.2022 09:31:00	09.02.2022 09:32:32	0,0				00:01:32	
09.02.2022 09:31:36	09.02.2022 09:31:47	0,0		00:00:11			
09.02.2022 09:31:39	09.02.2022 09:31:42	0,0			00:00:03		
09.02.2022 09:32:32	09.02.2022 09:32:39	0,0				00:00:07	00:00:07
09.02.2022 09:32:39	09.02.2022 09:32:50	0,0				00:00:11	
09.02.2022 09:32:50	09.02.2022 09:32:51	0,0				00:00:01	

Slika 14. Izvještaj aktivnosti digitalnih ulaza na dan 9. veljače 2022.

#### 4.5. Rukovanje podacima

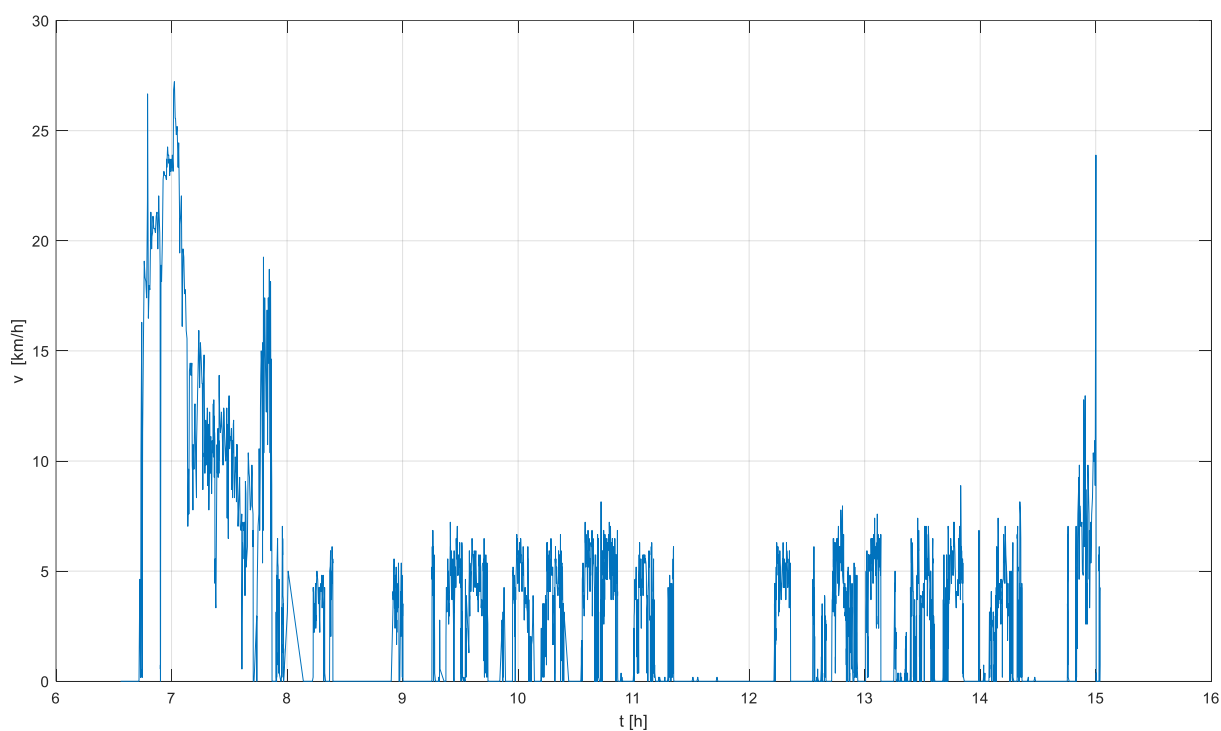
Kako bi se osigurali što točniji rezultati proračuna, potrebno je pravilno rukovati s dobivenim mjerenjima. U skupu svih dobivenih podataka potrebno je utvrditi one koji određuju opterećenja radnog ciklusa vitla. Nakon odabira reprezentativnih podataka potrebno je provjeriti koliko su precizni i jednoznačni. Uvidom u tablice vidljivo je po vremenu zapisa da su određena mjerenja višestruka i redundantna. Ovaj problem rješava se lakim filtriranjem kroz program Microsoft Excel.

Daljnja analiza podataka vrši se kroz programski paket MATLAB. Kako bi se moglo pristupiti preoblikovanju sustava, potrebno je odrediti opterećenje hidrauličkog vitla u trenutcima kada je pogonjeno. S tim ciljem u vidu potrebno je odrediti veličine koje će služiti za sam proračun opterećenja vitla, ali i one koje će ukazivati na trenutke u kojima je vitlo skidera aktivno.

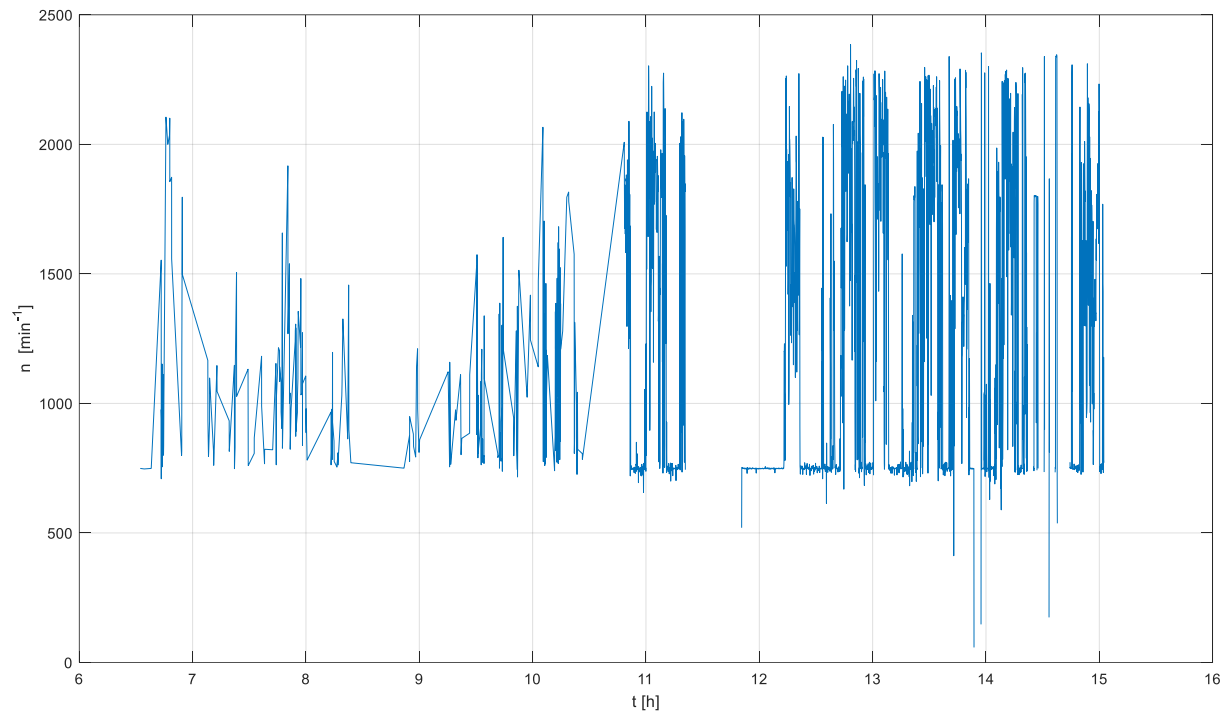
Pošto će proračun opterećenja vitla biti izrađen po modelu skalabilnog dizel motora koji je baziran na Willans-ovim linijama, koji će kasnije biti detaljnije opisan, za iznos momenta motora potrebno je koristiti podatke o potrošnji goriva i brzini vrtnje motora.

Kako bi se odredili trenutci u kojima je vitlo aktivno potrebno je uzeti u obzir da skider za vrijeme vitlanja miruje, a da bi se pogonila hidraulička crpka njegov dizel motor mora raditi. Tako se iz tablice GPS podataka uzimaju podaci o brzini traktora, a iz FMS tablice podaci o broju okretaja motora. Još se dodatno uzimaju mjerenja potrošnje goriva, te ih je sve zajedno potrebno dovesti u međuodnos. Da se proces vitlanja odvija može se zaključiti iz brzine traktora koja je jednaka nuli, a broj okretaja motora je povećan i uz to postoji značajnija potrošnja goriva.

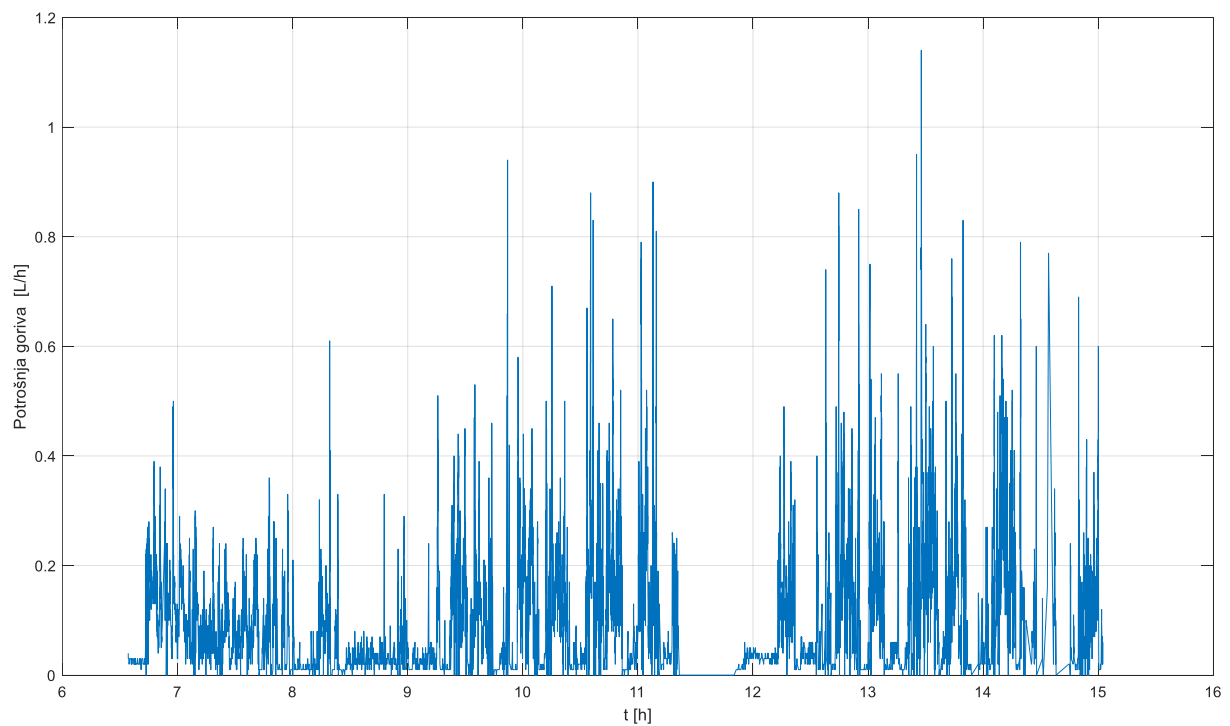
Prvi korak upravljanja podacima je učitavanje mjerenja iz tablice u MATLAB. Za svako mjerenje učitava se trenutak u kojima je mjereno i relevantni podatak iz određene tablice, tako da su spremljeni kao matrice. Na slici 15 prikazana je brzina traktora u vremenu, na slici 16 broj okretaja motora u vremenu, a na slici 17 trenutačna potrošnja goriva u vremenu.



**Slika 15. Brzina skidera u vremenu**

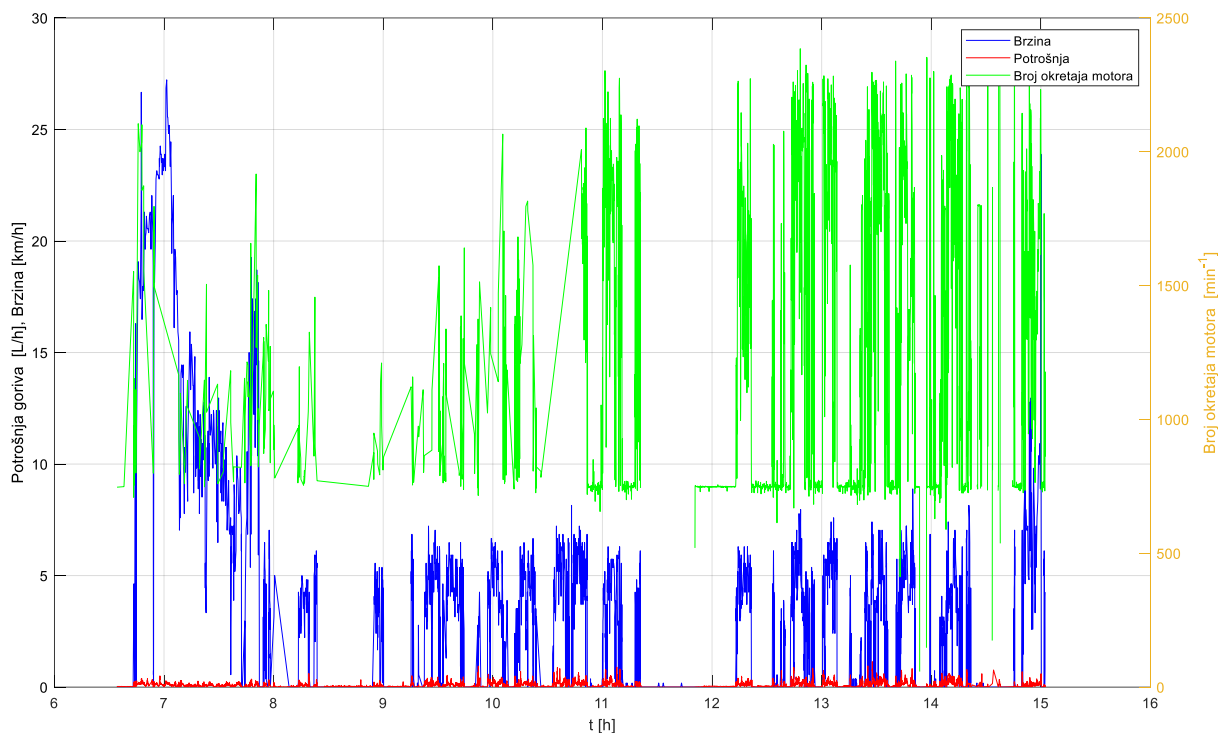


Slika 16. Broj okretaja motora u vremenu



Slika 17. Potrošnja goriva u vremenu

Kako su podaci izuzeti iz različitih tablica, mjerenja su zabilježena u različitim trenucima, kako bi se mogli uspoređivati rezultati u istim trenucima potrebno je interpolirati vrijednosti svake veličine koja se koristi u svakom zabilježenom trenutku. Nakon što se matrice vremena spoje u jednu, sortiraju vrijednosti i odbace duplikati odrađuje se interpolacija, te su grafovi sve tri veličine prikazane na slici 18.

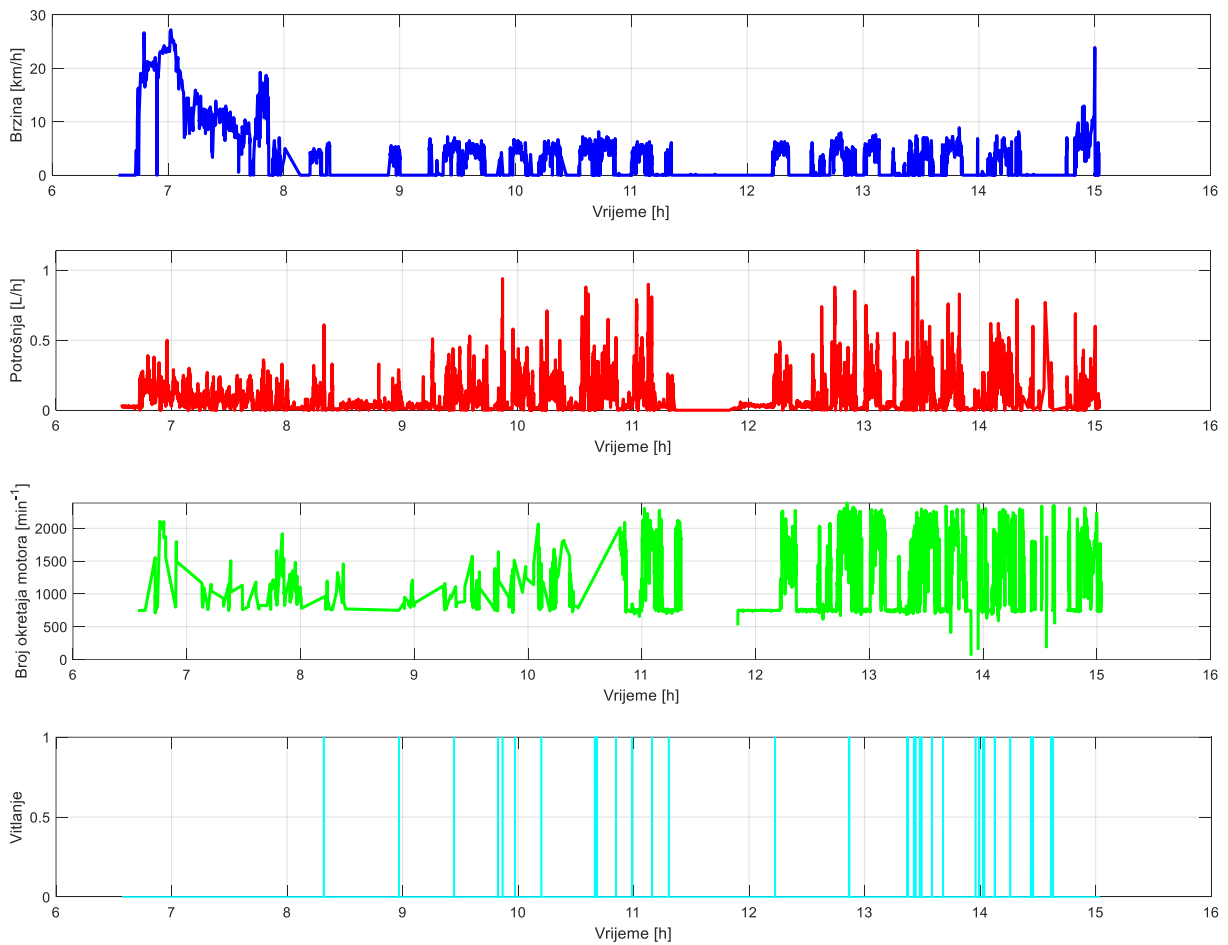


**Slika 18. Dijagram interpoliranih podataka**

Kako sada postoje podaci u svakoj točki, moguće je napraviti njihovu usporedbu. Postavljanjem uvjeta da brzina gibanja skidera mora biti nula, broj okretaja motora znatno prelazi vrijednosti koje dostiže u praznom hodu i da postoji znatna potrošnja goriva, dobivaju se podaci o statusu vitlanja. Da se radi o operaciji vitlanja može se gotovo sigurno utvrditi ako su sva tri uvjeta zadovoljena. Ako jedan od uvjeta nije zadovoljen tada vitlo ne radi.

Na slici 19 prikazan je dijagram statusa vitlanja ispod dijagrama brzine, potrošnje goriva i broja okretaja motora kako bi se mogli usporediti.





**Slika 19. Status vitlanja u odnosu na izmjerene podatke**

Iz navedenih dijagrama je vidljivo da za vrijeme stajanja skidera ponekad više puta počinje ciklus vitlanja. Prema tome potrebno je izračunati energiju utrošenu tijekom različitih ciklusa stajanja s pretpostavkom da će skider utrošiti manje energije u ciklusima u kojima stoji u praznom hodu u odnosu na cikluse u kojima tijekom stajanja vrši vitlanje.

## 5. OPTEREĆENJE RADNOG CIKLUSA VITLA

Koristeći sve potrebne uređene podatke pristupa se proračunu opterećenja vitla. Pošto mjerenje kumulativne potrošnje goriva ima veću točnost, iznosi potrošnje goriva izračunavaju se kao promjena ukupne potrošnje u vremenu između mjerenja. Ovi podaci tako su zadani kao volumni protok, a pošto se u proračunu koristi maseni protok potrebno je pomnožiti vrijednosti s gustoćom goriva, kako je dano u nastavku:

$$\int \dot{m}_f = \rho_f \cdot \int v_f dt \quad (1)$$

gdje se za gustoću dizelskog goriva uzima vrijednost  $\rho_f = 850 \text{ g/L}$  [8].

Kao drugi ulaz u proračunski model koristi se kutna brzina motora s unutarnjim izgaranjem. Kutna brzina izračunava se iz broja okretaja motora dobivenih iz FMS tablice. Mjerene podatke potrebno je pretvoriti u okretaje u sekundi.

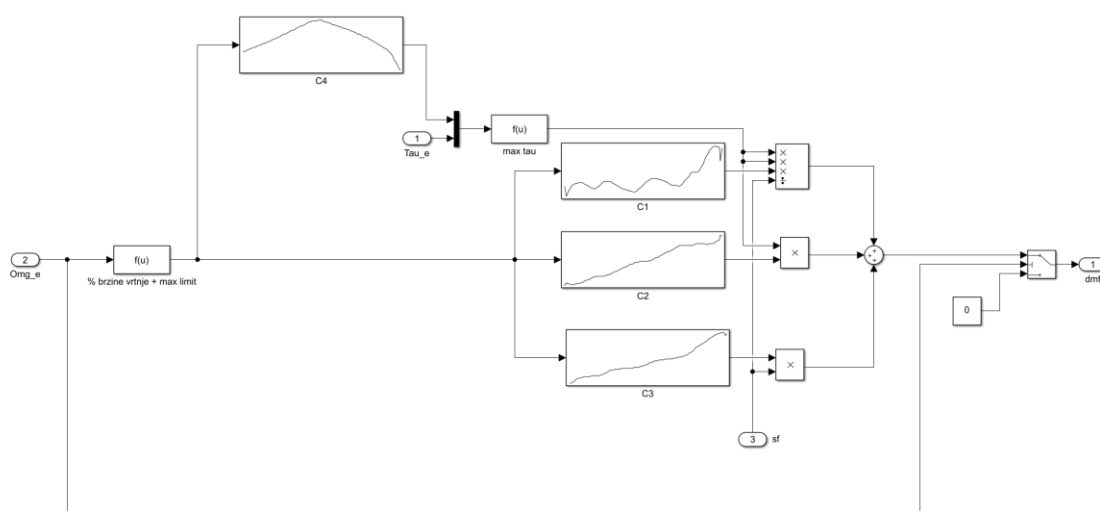
$$\omega_e = 2\pi n \quad (2)$$

### 5.1. Model pogona motora s unutarnjim izgaranjem

Statički model motora s unutarnjim izgaranjem, tj. skalabilni dizel motor baziran na Willans-ovim linijama napravljen je u programskom paketu MATLAB. Ovaj model prikazan na slici 20 za kutnu brzinu motora  $\omega_e$  i moment  $\tau_e$  izračunava potrošnju goriva u gramima po sekundi. Još jedan ulaz u ovaj model je faktor skaliranja  $s_p$ , no pošto motor nije skaliran njegov iznos je 1. Izračun se zasniva na Willans-ovim koeficijentima  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$  koji su bilježeni ovisno o postotku maksimuma kutne brzine motora. Kada su određeni svi potrebni parametri, trenutna potrošnja goriva proračunava se prema formuli kako slijedi:

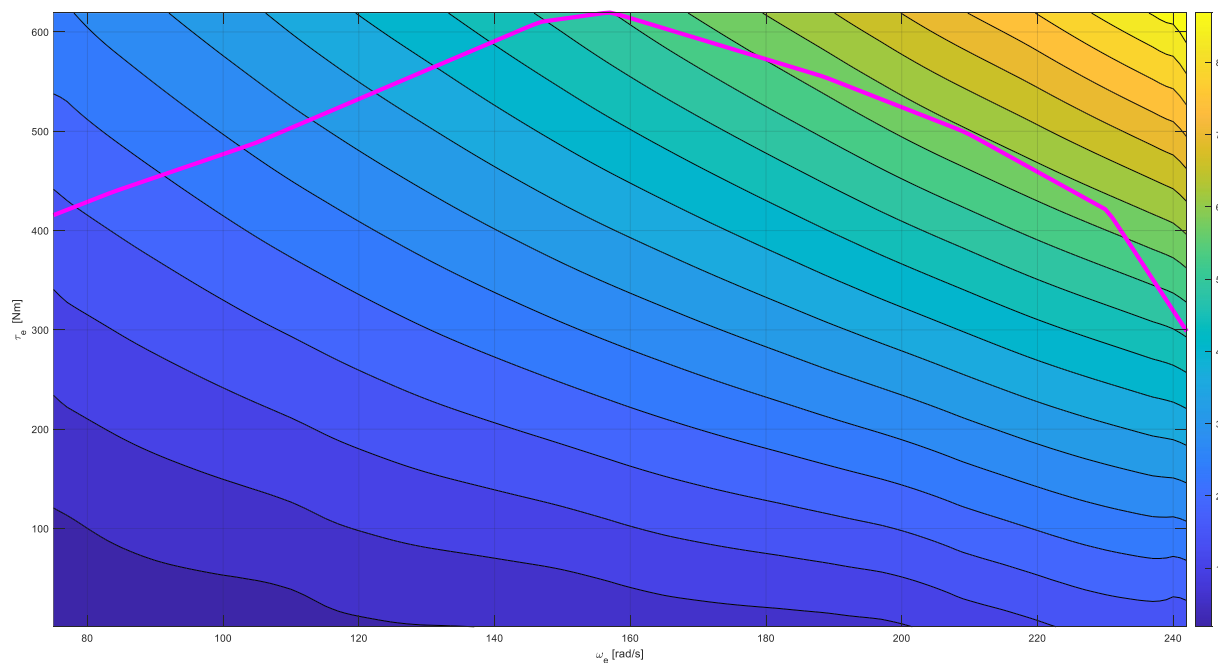
$$\dot{m}_f(\tau_e, \omega_e, s_p) = \frac{\tau_e^2}{s_p} c_1(\omega_e) + \tau_e c_2(\omega_e) + s_p c_3(\omega_e) \quad (3)$$

U mapi C4 nalazi se momentna karakteristika motora koja se uspoređuje s ulaznim momentom, te u slučaju da je isti moment veći od maksimalnog u proračunu se koristi maksimalni moment motora [8].

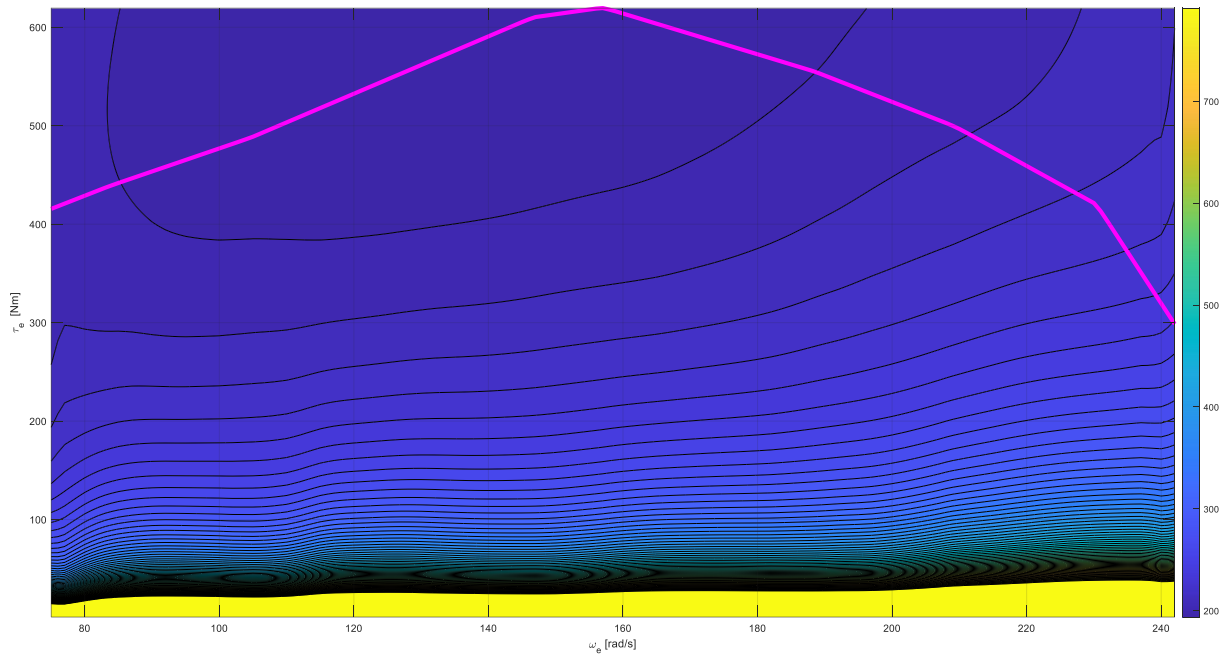


Slika 20. Model skalabilnog dizel motora baziran na Willans-ovim linijama [8]

U MATLAB-u su također izrađene i mape potrošnje goriva [8]. Na slici 21 prikazana je mapa potrošnje s krivuljom maksimalnog momenta koji motor postiže, a na slici 22 prikazana je mapa specifične potrošnje goriva.



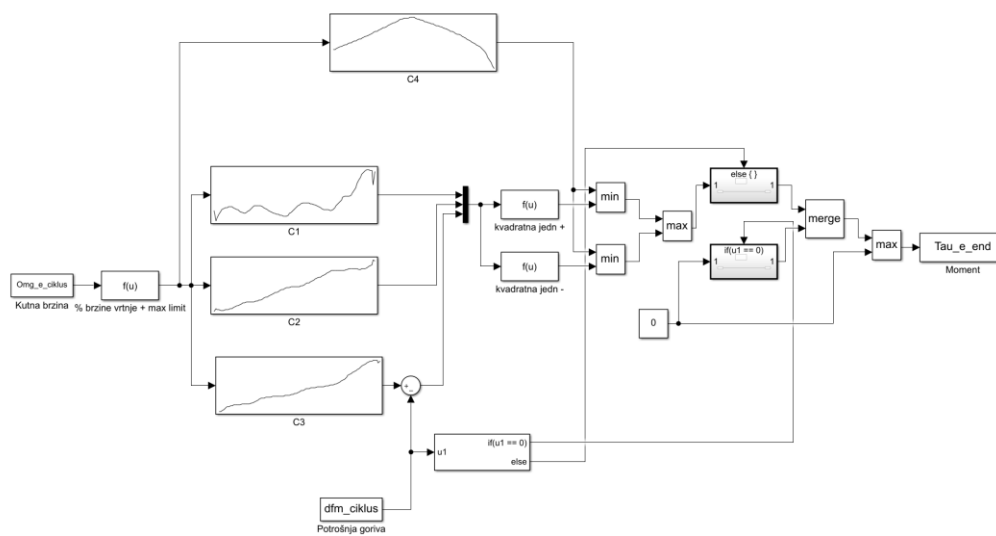
Slika 21. Mapa potrošnje goriva s maksimalnim momentom [8]



Slika 22. Mapa specifične potrošnje goriva s maksimalnim momentom [8]

## 5.2. Modifikacija modela

Za razliku od zadanog modela motora s unutarnjim izgaranjem, radi postizanja momenta koji se razvija na vitlu za vrijeme rada, kao ulaz u model potrebno je postaviti potrošnju goriva. Zbog toga se pristupa modifikaciji postojećeg modela. Modificirani model prikazan je na slici 23.



Slika 23. Modificirani model skalabilnog dizel motora baziran na Willans-ovim linijama

Kako u ovom slučaju motor nije skaliran, u modificiranom modelu nije uzet u obzir faktor skaliranja. Ako se prema formuli (3) računa moment, dobiva se kvadratna jednadžba za koju su potrebni koeficijenti  $c_1$ ,  $c_2$  te razlika koeficijenta  $c_3$  i potrošnje goriva. Na izlazima iz kvadratne jednadžbe rezultat se uspoređuje s maksimalnim momentom pri određenoj kutnoj brzini motora, pa se u slučaju da je rezultat veći od maksimalnog kao valjani rezultat uzima maksimalan moment. Za svako mjerenje jedan rezultat kvadratne jednadžbe daje pozitivan broj, a drugi negativan. Kao moguće rješenje odabire se samo pozitivan rezultat.

U slučajevima kada je potrošnja goriva jednaka nuli, umjesto proračuna kao izlazni moment zapisuje se nula. Kako se uz izmjerene vrijednosti trenutne potrošnje goriva nalaze i neke interpolirane vrijednosti, ovim postupkom može doći do pogrešnih iznosa potrošnje koja daju nerealne kompleksne vrijednosti te se i u tim slučajevima moment postavlja na nulu. Ovim korakom se i poboljšava točnost proračuna, jer se prilikom izrazito niske potrošnje goriva može pretpostaviti da se sam proces vitlanja ne odvija u tom trenutku.

### 5.3. Račun opterećenja

Za dobivanje pravilnih rezultata, potrebno je točno odrediti ulazne podatke za model u MATLAB skripti. Kako bi se dobili rezultati svakog pojedinog perioda kada skider stoji i vitlo je pogonjeno, moraju se prvo odrediti periodi stajanja. Nakon određivanja indeksa u kojima proces počinje i u kojem završava iz matrice ukupnih podataka se izuzimaju vrijednosti i zapisuju u nove matrice koje služe kao ulaz u model.

Pozivanjem modela za svaki ciklus, kao izlaz se dobiva matrica izračunatih momenata u svakoj točki. Nakon toga računa se snaga u svakom trenutku prema formuli kako slijedi:

$$P_v = \omega_e \tau_e \quad (4)$$

Nadalje se integracijom snage u vremenu dobiva ukupna energija, tj. rad koji se utrošio u ciklusu:

$$W_v = \int P_v dt \quad (5)$$

Nakon što su sve vrijednosti izračunate, svaka se zapisuje u matricu u kojoj ostaju rezultati mjerenja svakog ciklusa, a uspoređivanjem ukupnog rada s prethodnim, sprema se iznos rada u ciklusu u kojemu je maksimalan. Potom počinje proces traženja idućeg ciklusa i obavlja se proračun ispočetka.

Na Sliku 24 prikazan je dio skripte koji obavlja ovaj proračun.

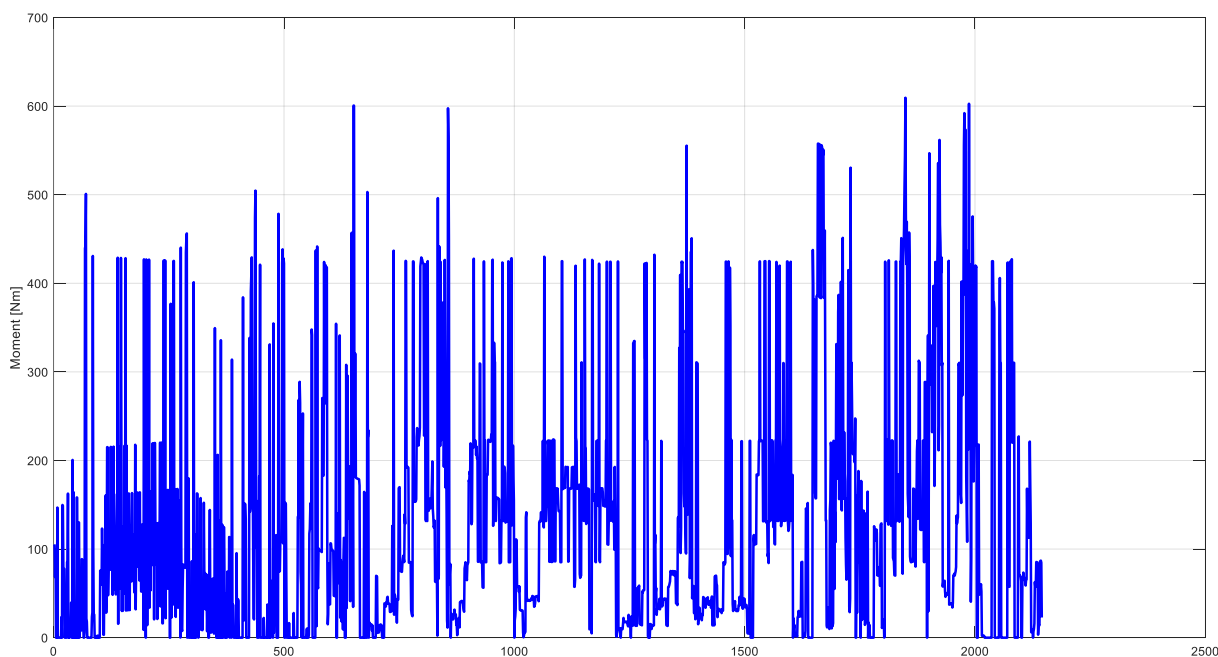
```

for i = 2:length(brzina_92)
    if brzina_92(i) <= 0.2 && brzina_92(i-1) > 0.2
        u_ciklusu = true;
        pocetak_ciklusa = i;
    elseif u_ciklusu && brzina_92(i) >= 0.2
        u_ciklusu = false;
        kraj_ciklusa = i - 1;
        if pocetak_ciklusa < kraj_ciklusa
            vrijeme_ciklus = t_92(pocetak_ciklusa:kraj_ciklusa);
            indeks_ciklus = 1:length(vrijeme_ciklus);
            Omg_e_ciklus = Omg_e(pocetak_ciklusa:kraj_ciklusa);
            dfm_ciklus = dfm(pocetak_ciklusa:kraj_ciklusa);
            if any(isnan(Omg_e_ciklus))
                continue;
            end
            Omg_e_ciklus = [indeks_ciklus', Omg_e_ciklus];
            dfm_ciklus = [indeks_ciklus', dfm_ciklus];
            simOut = sim(modelPath, 'StartTime', num2str(1), 'StopTime', num2str(indeks_ciklus(end)), 'ExternalInput', {'Omg_e_ciklus' 'dfm_ciklus'});
            Taue_ciklus = simOut.Tau_e_end;
            P_ciklus = Taue_ciklus .* Omg_e_ciklus(:, 2);
            W_ciklus = trapz(vrijeme_ciklus, P_ciklus);
            vrijeme_ciklusi = [vrijeme_ciklusi, vrijeme_ciklus];
            Omg_e_ciklusi = [Omg_e_ciklusi; Omg_e_ciklus(:, 2)];
            dfm_ciklusi = [dfm_ciklusi; dfm_ciklus(:, 2)];
            Taue_ciklusi = [Taue_ciklusi; Taue_ciklus];
            P_ciklusi = [P_ciklusi; P_ciklus];
            W_ciklusi = [W_ciklusi; W_ciklus];
            if W_ciklus > W_max
                W_max = W_ciklus;
                W_max_indeks = size(W_ciklusi, 2);
            end
        end
    end
end
end
end

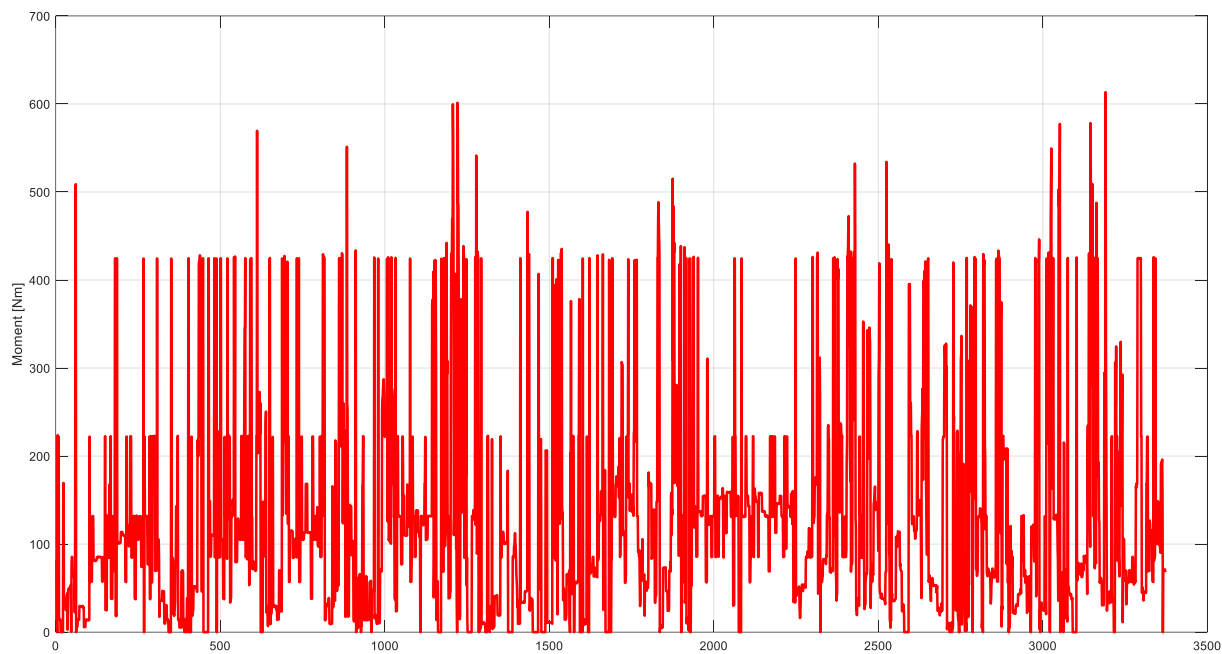
```

**Slika 24. Primjer MATLAB skripte za izračun opterećenja**

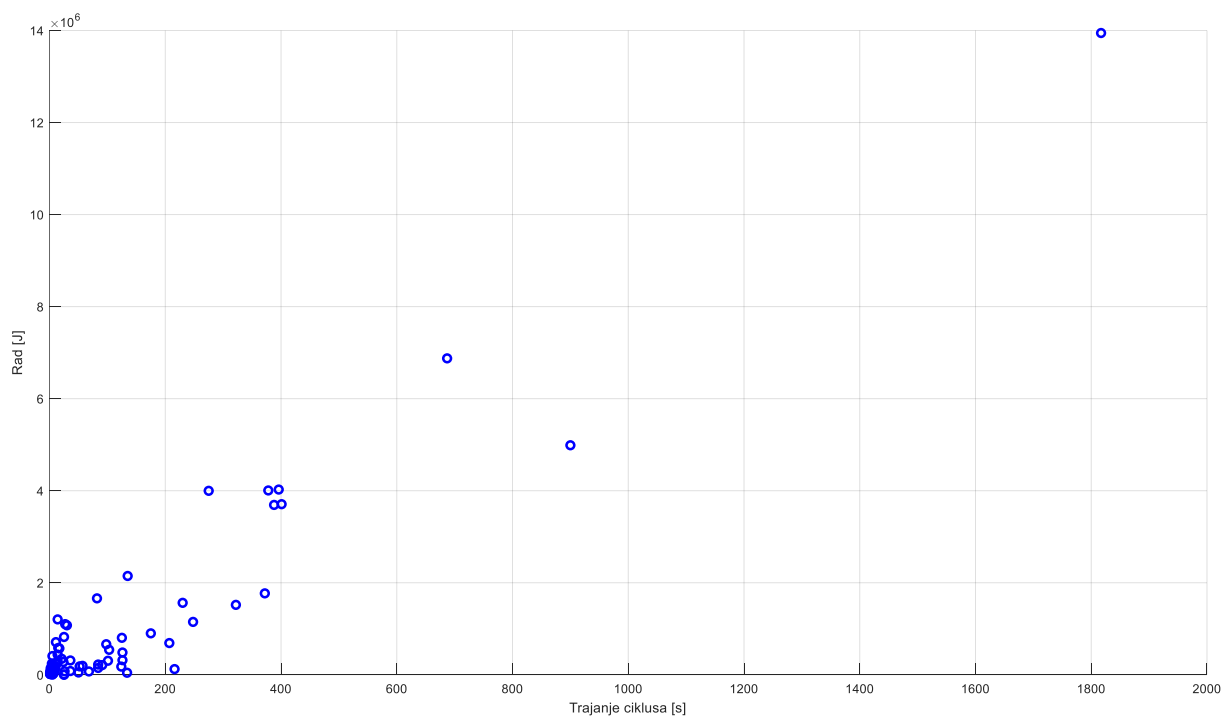
Rezultati pokretanja simulacije prikazani su grafovima. Na slici 25 prikazani su svi momenti koji su dobiveni u svakom ciklusu kao rezultat simulacije na datum 9. veljače 2022., a na slici 26 vidljivi su momenti dobiveni na datum 10. veljače 2022. Na slici 27 su vidljive ukupne energije potrošene u pojedinom ciklusu u odnosu na vrijeme njihovog trajanja na datum 9. veljače 2022., a na slici 28 na datum 10. veljače 2022.



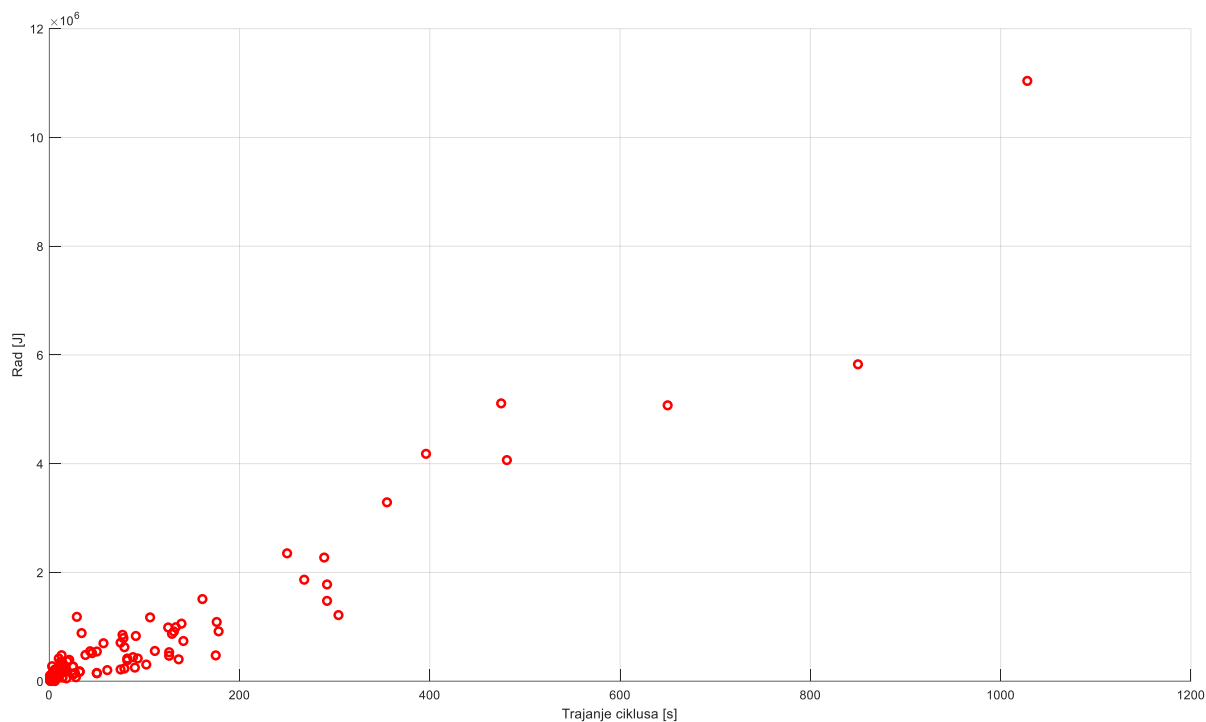
**Slika 25. Rezultati simulacije ( $\tau_c$ ) za 9. veljače 2022.**



Slika 26. Rezultati simulacije ( $\tau_c$ ) za 10. veljače 2022.



Slika 27. Rezultati simulacije ( $W_c$  prema trajanju ciklusa) za 9. veljače 2022.



**Slika 28. Rezultati simulacije ( $W_e$  prema trajanju ciklusa) za 10. veljače 2022.**

Prema momentnom dijagramu može se zaključiti kako veći dio vremena motor radi na malom opterećenju, međutim postoje kratkotrajni nagli porasti, što upućuje na povećani moment u početku vitlanja, nakon kojeg za nastavak procesa potreban moment pada.

Dijagram rezultata utrošene energije služi za određivanje ciklusa u kojemu je rad maksimalan. Vidljivo je da postoje iznosi utrošene energije koje odskaku od ostatka rezultata, pa je prije određivanja potrebne energije za nastavak proračuna potrebno provjeriti jesu li ti maksimalni iznosi točni.

U tablici 3 prikazani su podaci za pet ciklusa u kojima je utrošeno najviše energije na dan 9. veljače 2022.

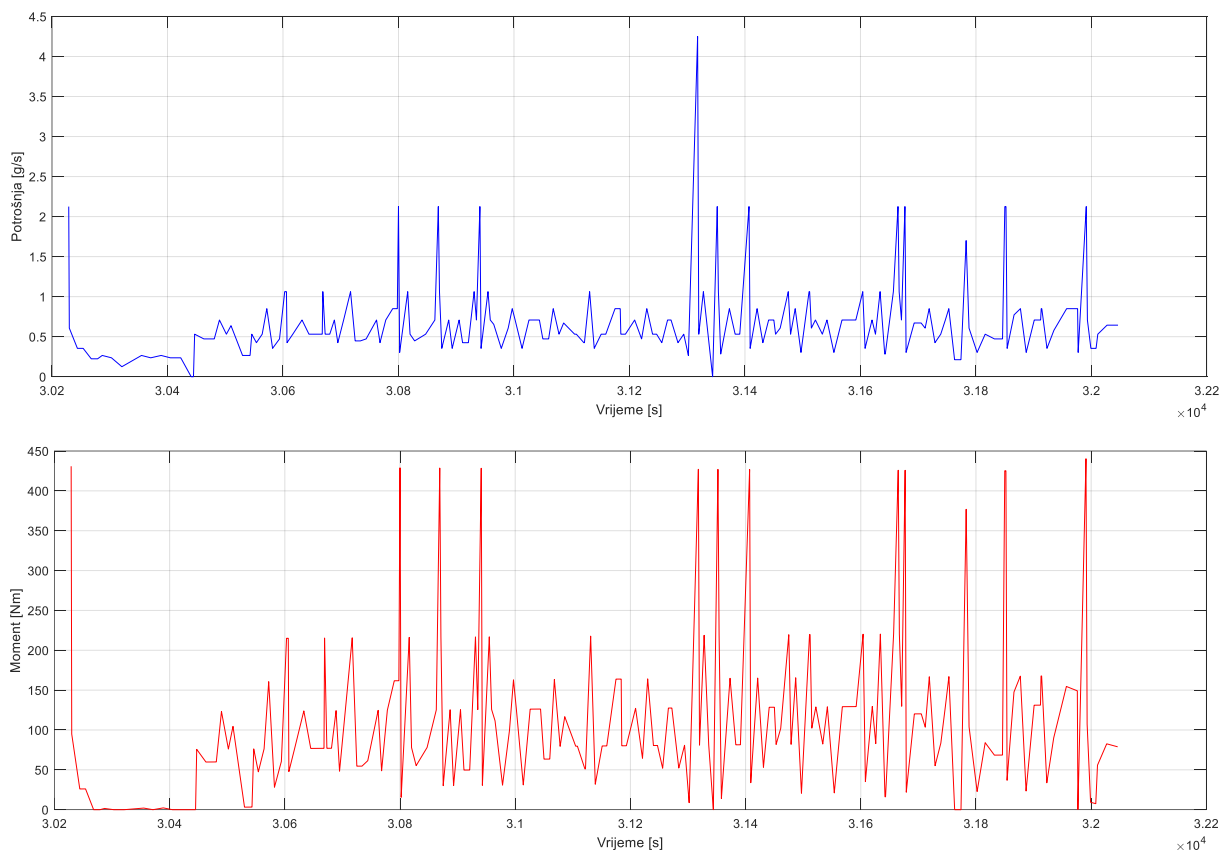
**Tablica 3. Rad ciklusa u odnosu na vrijeme trajanja**

Ciklus	Rad [J]	Trajanje ciklusa [s]
29.	4005500	378
34.	4025100	396
12.	4987700	900
35.	6875700	687
10.	13945000	1817



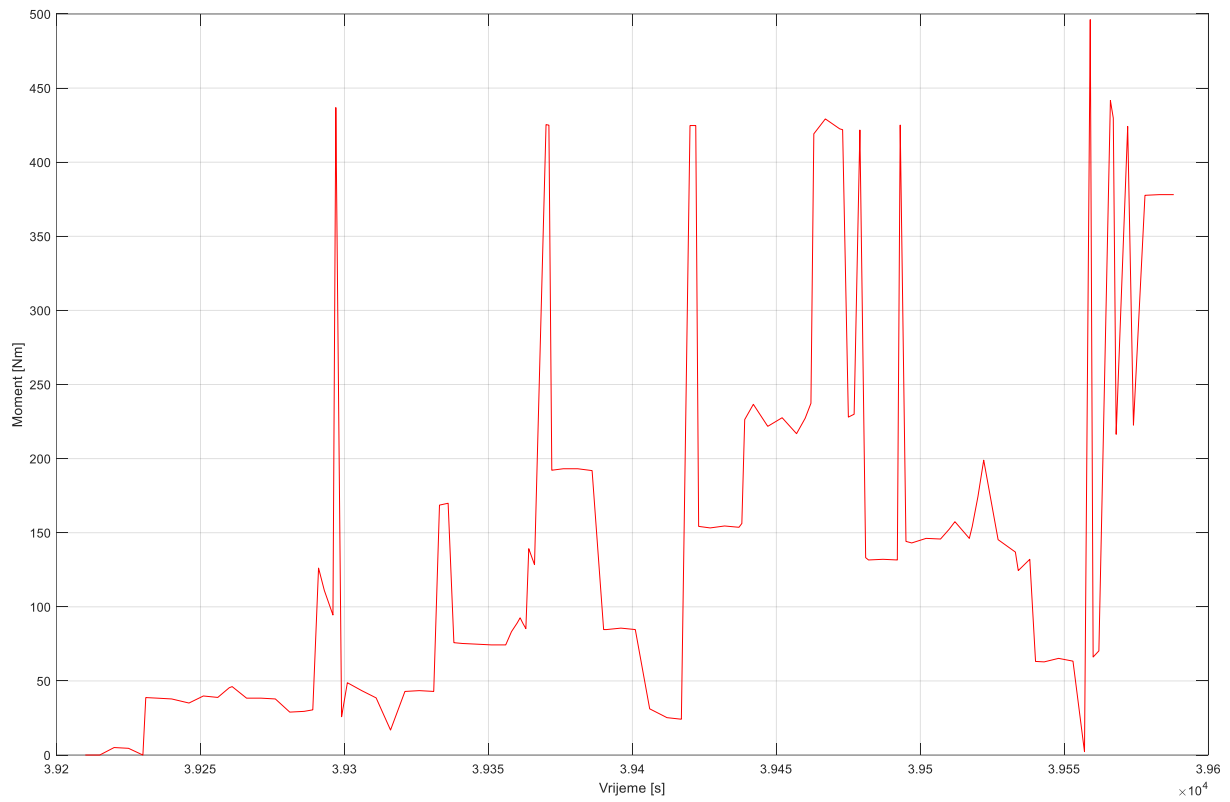
## 5.4. Provjera rezultata

U svrhu provjere rezultata potrebno je prikazati i obraditi cikluse u kojemu dobivena energija znatno odskaje od ostalih. Na slici 29 prikazan je graf momenta u vremenu i potrošnje goriva u vremenu.



**Slika 29. Ciklus s najvećom utrošenom energijom na dan 9. veljače 2022.**

Dijagram potvrđuje da je visoki iznos utrošene energije u ovom ciklusu zahvaljujući dugom vremenu stajanja skidera, koji većinu vremena radi u praznom hod. To je također vidljivo po tome da ne postoje dugotrajniji iznosi povećanog momenta. Stoga se za daljnji proračun određuje maksimalna potrebna energija u kraćem vremenskom periodu, gdje su vrijednosti momenta povišene kroz duže vrijeme za razliku od kratkotrajnih povećanja. Jedan takav ciklus prikazan je na slici 30.

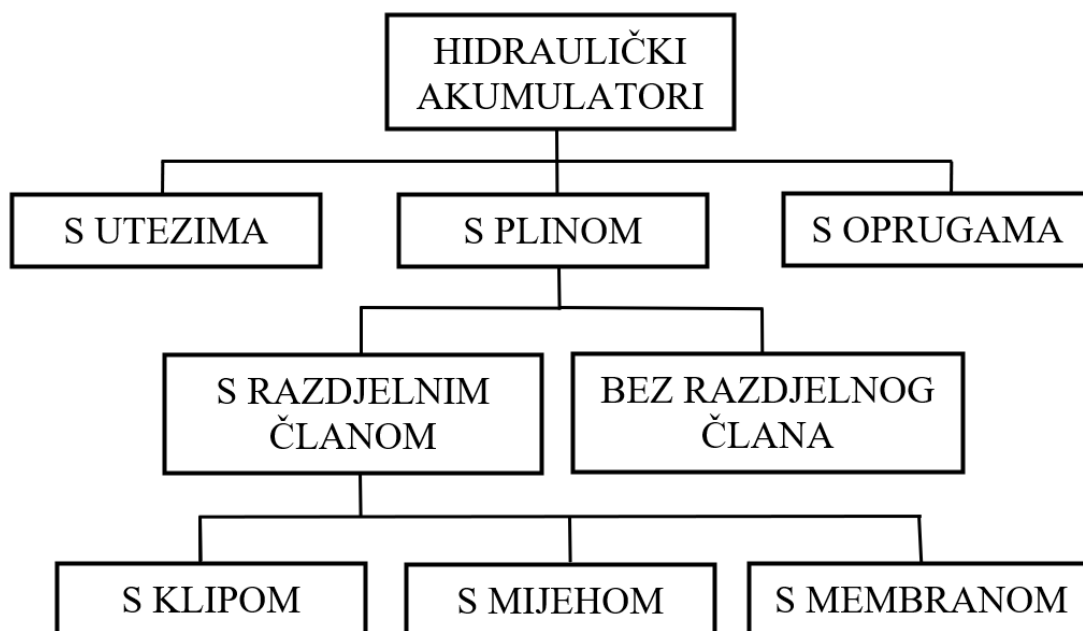


**Slika 30. Ciklus na dan 9. veljače 2022.**

## 6. HIDRAULIČKI AKUMULATOR

Hidraulički akumulatori su komponente koje se koriste u hidrauličkim sustavima koji imaju svrhu pohranjivanja hidrauličke energije, a njihovo djelovanje temelji se na različitim principima. Kako bi se pohranio višak hidrauličke energije ili omogućio njezinu upotrebu u hitnim situacijama, akumulatori koriste povećanje potencijalne energije. To se postiže podizanjem, sabijanjem opruge ili stlačivanjem plina. Kada je hidraulička energija ponovno potrebna, potencijalna energija se pretvara natrag u hidrauličku. Prema načinu pohrane energije akumulatori se klasificiraju kao akumulatori s masom, oprugom ili plinom. Najčešći su hidropneumatski akumulatori koji koriste plin, a konkretno se dijele na tri vrste: klipne, membranske i s mijehom [10]. Podjela hidrauličkih akumulatora prikazana je na slici 31.

Iako je osnovna uloga hidrauličkog akumulatora u hidraulički krugovima pohrana energije, oni imaju više funkcija. Pohranjuju energiju u hidrauličkim sustavima koji je kratko koriste, pokrivaju potrebe za kratkotrajnom vršnom hidrauličkom energijom, služe u hitnim situacijama, kompenziraju curenje, amortiziraju hidrauličke udare te izjednačavaju neravnomjeran protok [10].



Slika 31. Podjela hidrauličkih akumulatora [11]

Različiti tipovi hidrauličkih akumulatora imaju različite značajke i primjene. Značajke plinskih akumulatora dane su u tablici 4.

**Tablica 4. Osnovne značajke plinskih akumulatora [11]**

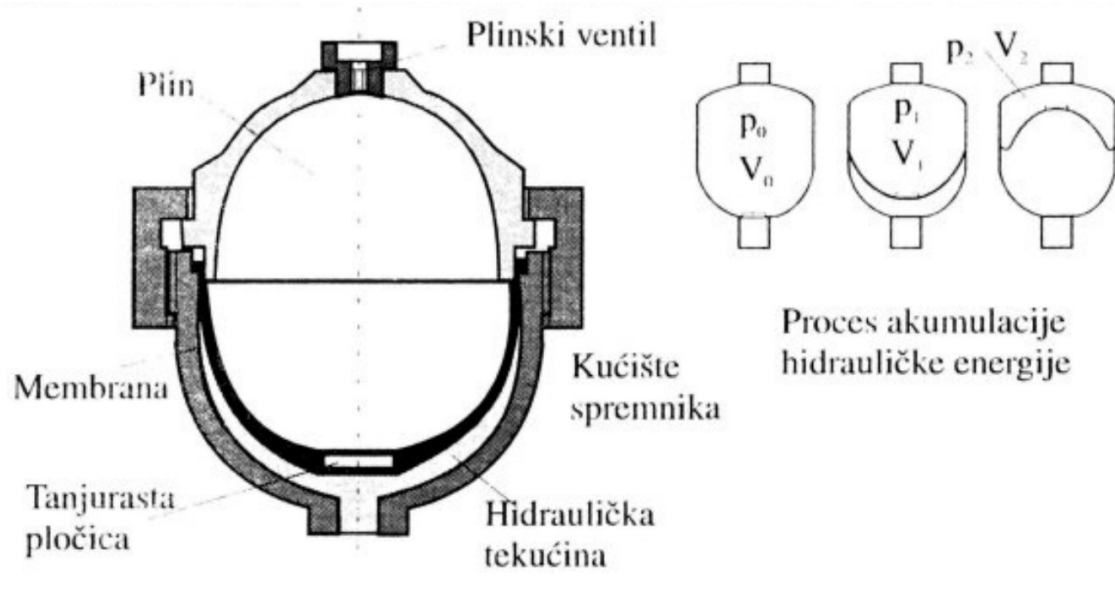
KLIPNI	MEMBRANSKI		S MIJEHOM	
	Zavareni	S navojem	v-tlačni	n-tlačni
Do 250 L	Do 3,5 L	Do 10 L	Do 50 L	Do 450 L
Max. dozv. brz. klipa Do 3,5 m/s (3 m/s)	4-6 L/s	4-6 L/s	Do 40 L/s	Do 140 L/s
	Max protok		Max protok	
Do 350 bar	Do 210 bar	Do 400 bar	Do 550 bar	Do 35 bar
Vertikalna ugradnja, Sporije reagiraju	U zrakoplovima se dosta koriste			

### 6.1. Membranski akumulatori

Membranski hidraulički akumulatori su vrsta hidropneumatskih akumulatora s razdjelnim članom. Imaju sferični oblik, pri čemu je njihovo središte vodoravno podijeljeno elastičnom membranom koja razdvaja volumen ulja od komprimiranog plina. Ovi akumulatori često se primjenjuju za manje volumene, bilo za kompenzaciju vršnog tlaka ili za ublažavanje nejednakosti protoka i tlaka. Maksimalni omjer tlakova kod ovih akumulatora iznosi 1:10.

Kako bi se osigurala sigurnost, u većini slučajeva kao radni medij koristi se plin dušik, dok upotreba zraka nije dopuštena zbog opasnosti od eksplozije [12].

Hidraulički akumulator s membranom prikazan je na slici 32. Osim membrane, ovaj tip akumulatora konstrukcijski mora sadržavati kućište spremnika, tanjurastu pločicu i plinski ventil.



Slika 32. Hidropneumatski akumulator s membranom [11]

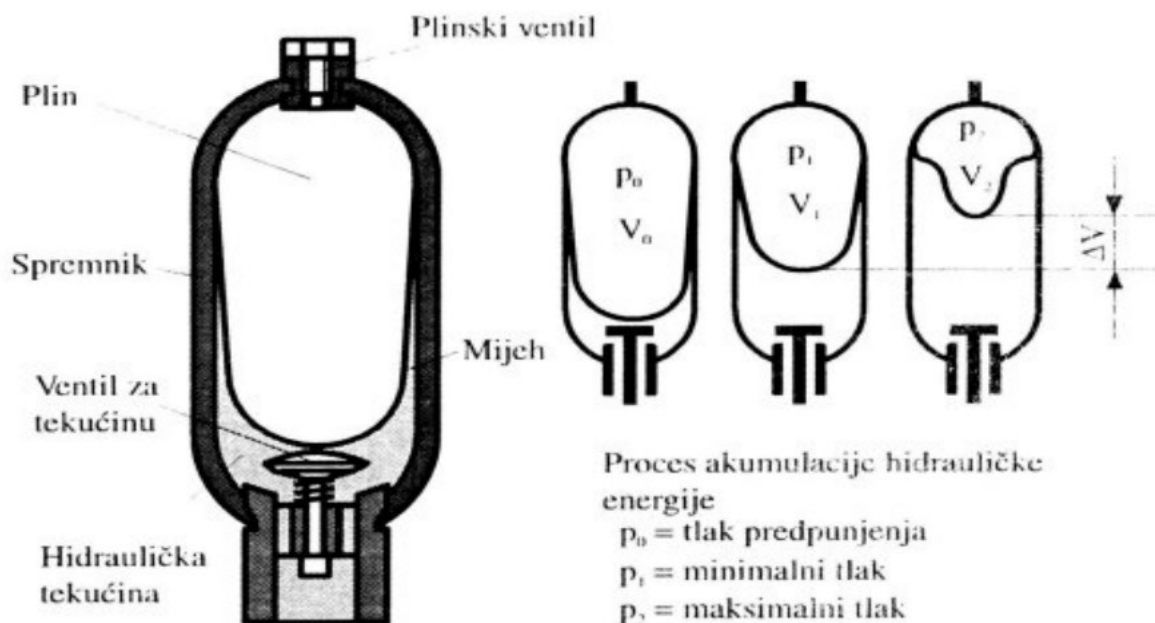
## 6.2. Akumulatori s mijehom

Hidropneumatski akumulatori s mijehom sastoje se od čelične posude ispunjene uljem u kojoj se nalazi elastični mijeh prethodno ispunjen plinom. Plin se puni kroz gornji ventil, a na donjem priključku za ulje smješten je tanjurasti ventil koji sprječava izlaz mijeha i štiti ga od oštećenja [12].

Ako je tlak ulja veći od tlaka plina, ulje kroz tanjurasti ventil ulazi u akumulator, smanjuje se volumen mijeha, a plin se komprimira. Ovaj tip akumulatora odlikuje se apsolutnim brtvljenjem plina i ulja i brzim reagiranjem [12].

Maksimalni odnos tlakova u akumulatoru iznosi 1:4, a apsolutni tlak predpunjenja  $p_0$  mora iznositi između 70 % i 90 % minimalnog radnog tlaka fluida  $p_1$ , čime se sprječava stalni dodir mijeha i tanjurastog ventila i moguća oštećenja [12].

Izgled hidropneumatskog akumulatora s mijehom prikazan je na slici 33.



Slika 33. Hidropneumatski akumulator s mijehom [11]

### 6.3. Politropska promjena stanja

Promjena stanja plina u hidropneumatskim akumulatorima opisuje se politropskom promjenom

$$pV^n = konst \quad (6)$$

gdje su:

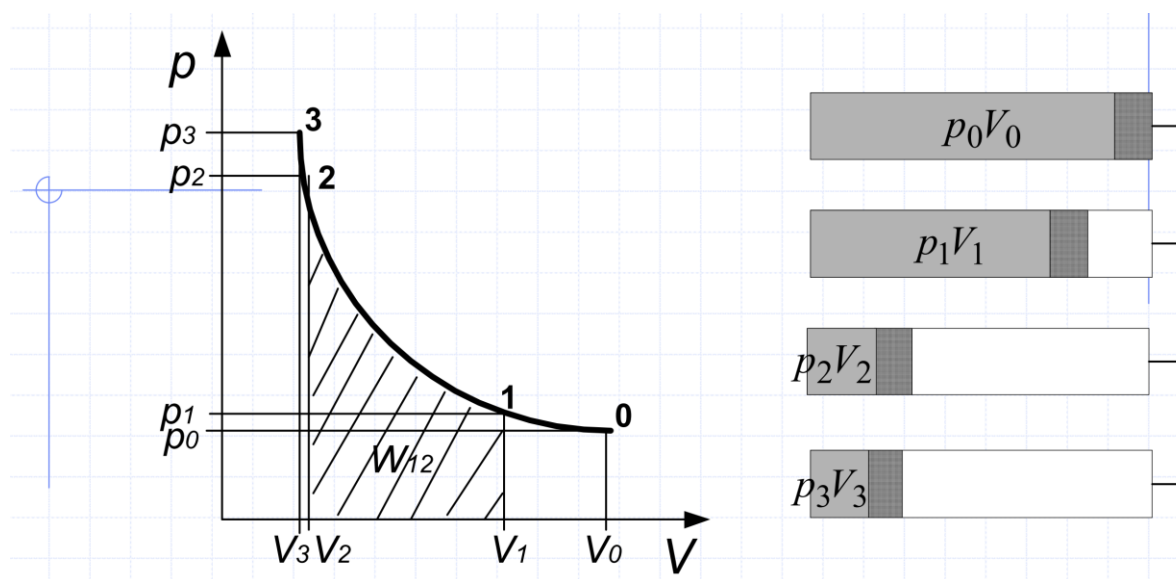
$n$  – eksponent politrope,

$p$  – apsolutni tlak plina,

$V$  – apsolutni volumen plina.

U slučaju vrlo sporog procesa promjene stanja plina, temperatura plina ostaje konstantna, što definira izotermnu promjenu stanja ( $n = 1$ ). S druge strane, u slučaju brzih procesa, gdje nema razmjene topline plina s okolinom, govorimo o adijabatskoj promjeni stanja ( $n = \kappa$ ). Eksponent izentrope za zrak i dušik iznosi  $\kappa = 1,4$ . U praksi, procesi promjene stanja plina koji traju manje od oko jedne minute često se odvijaju otprilike adijabatski, dok se procesi koji traju dulje od oko tri minute često opisuju otprilike izentropski. Svi ostali procesi su koji se nalaze između ovih graničnih vrijednosti, opisani su politropskim procesom gdje je  $1 < n < 1,4$  [12].

Na slici 34 prikazana je promjena stanja plina u hidropneumatskom akumulatoru u  $p$ - $V$  dijagramu.



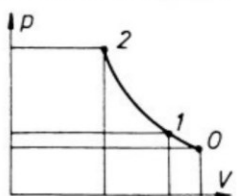
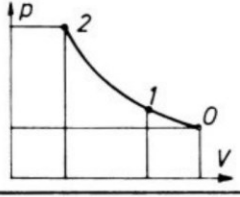
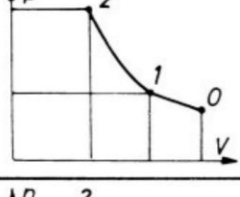
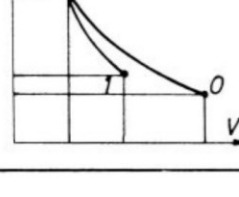
Slika 34. Promjene stanja plina u hidropneumatskom akumulatoru [11]

Vrijednosti sa slike su kako slijedi:

- $p_0$  – tlak predpunjenja plina,
- $p_1$  – minimalni radni tlak,
- $p_2$  – maksimalni radni tlak,
- $p_3$  – maksimalni tlak,
- $V_0$  – volumen predpunjenja,
- $V_1$  – maksimalni volumen,
- $V_2$  – minimalni radni volumen,
- $V_3$  – minimalni volumen,
- $W_{12}$  – tehnički rad akumulatora.

Ovisno o primjeni hidropneumatskog akumulatora opisane su promjene stanja plina između radnih točaka. Prema primjeni tako se promjene mogu odrediti za slučajeve kada se akumulator koristi za akumuliranje energije, kompenziranje izgubljenog ulja, opružni sustav kod vozila ili kao sigurnosna funkcija. U tablici 5 prikazani su ovi kriteriji upotrebe akumulatora.

Tablica 5. Kriteriji upotrebe hidropneumatskih akumulatora [11]

	Proces	Kriterij upotrebe
	$0 \rightarrow 1$ adiabatsko punjenje $1 \leftrightarrow 2$ adiabatski proces	Kod akumuliranja energije $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,362 V_0$
	$0 \rightarrow 1 \leftrightarrow 2$ izotermički proces	Kompenzacija izgubljenog ulja $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,45 V_0$
	$0 \rightarrow 1$ izotermički punjenje $1 \leftrightarrow 2$ adiabatski proces	Opužni sistem kod vozila $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,351 V_0$
	$0 \rightarrow 1$ izotermički proces $2 \rightarrow 1$ adiabatski proces	Sigurnosna funkcija $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,288 V_0$

#### 6.4. Izentropa ili ravnotežna adijabata

Izentropa, opisuje proces u termodinamici kada nema izmjene topline s okolinom. Tijekom izentropskog procesa entropija sustava ostaje konstantna. Adijabatski proces označava proces tijekom kojeg nema prijenosa topline između sustava i okoline. Ako je taj proces ujedno i reverzibilan, tada je i izentropan. Stoga se izentropa ujedno može nazvati i ravnotežnom adijabatom [13].

Za ostvarenje izentropne potrebno je da granica sustava bude nepropusna za toplinski tok, ali mora omogućavati promjenu snage. Izmjena topline može se također spriječiti i brzim odvijanjem procesa, ali ne smije narušiti ravnotežni tijek odvijanja procesa [13].

U stvarnim procesima se, zbog strujanja koje se nerijetko odvija velikim brzinama pa je vrijeme boravka plina u stroju vrlo kratko, često i ne stigne izmijeniti primjetan iznos topline. Uzme li se u obzir maseni protok plina, u takvim slučajevima dobije se vrlo malena specifična izmijenjena topline i ona se često zanemaruje [13].



U slučaju izentropske promjene jednadžba izentropije glasi:

$$pV^\kappa = konst \quad (7)$$

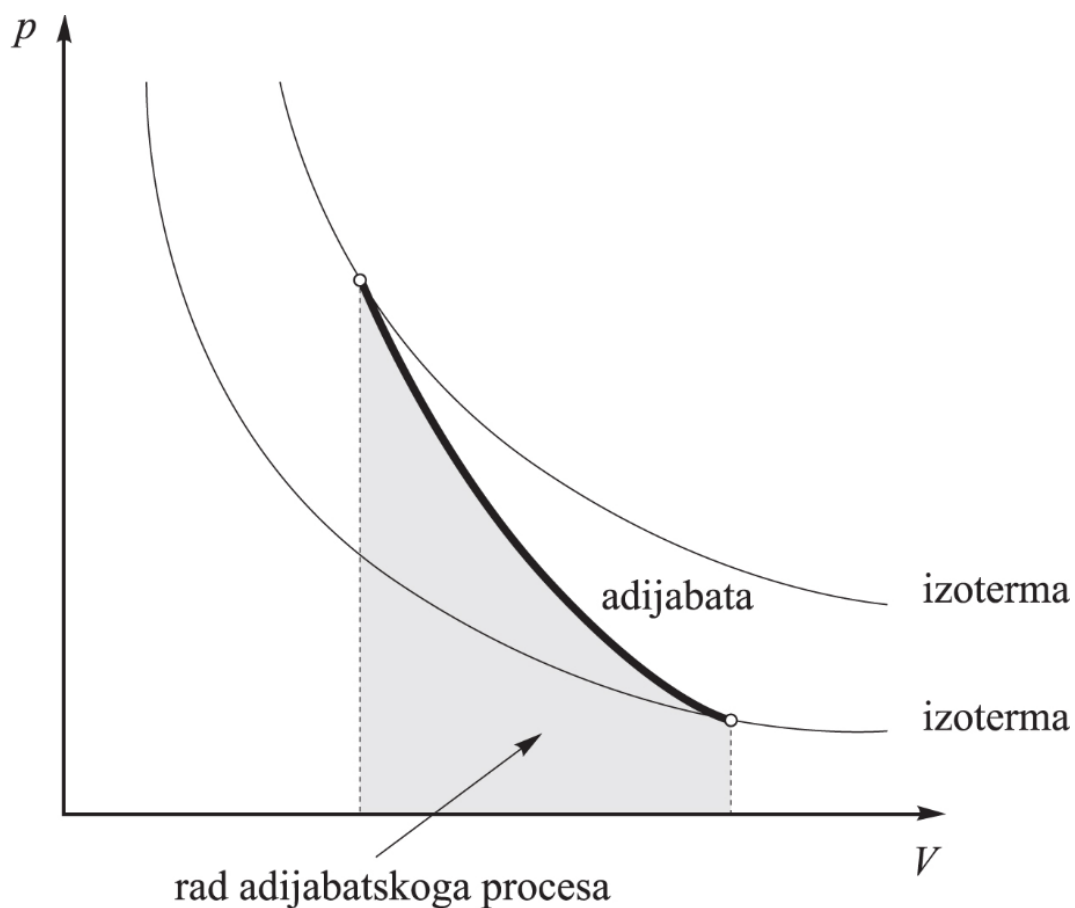
gdje su:

$\kappa$  – eksponent izentropije,

$p$  – apsolutni tlak plina,

$V$  – apsolutni volumen plina.

Na slici 35 prikazan je adijabatski proces promjene stanja plina.



Slika 35. Adijabatski proces promjene stanja plina [14]

## 7. MODELIRANJE HIDRAULIČKOG AKUMULATORA

Izlazni podaci modificiranog računalnog modela motora s unutarnjim izgaranjem omogućuju proračun i dimenzioniranje hidrauličkog pneumatskog akumulatora. S pomoću poznate energije potrebne za odrađivanje cijelog radnog ciklusa vitla, potrebno je doznati ukupni volumen koji hidraulički akumulator mora imati da bi zadovoljio proces vitlanja.

Za proračun akumulatora uzimaju se obzir hidropneumatski akumulatori.

### 7.1. Izračun minimalnog i maksimalnog radnog volumena

Kako bi se izračunao minimalni radni tlak hidropneumatskog akumulatora, potrebno je znati energiju koju mora moći predati u sustav. Pošto se sva energija koju hidraulički akumulator s plinom predaje sustavu pohranjuje u samom plinu pod tlakom, potrebno je odrediti koja je promjena stanja plina u pitanju.

Prema tablici 5 kriterija upotrebe hidropneumatskih akumulatora vidljivo je da se za potrebu akumuliranja energije promjena stanja plina, kako od točke predpunjenja do radne točke s minimalnim radnim tlakom, tako i do točke s maksimalnim radnim tlakom odvija adijabatski. Izraz prema kojemu se računa tehnički rad adijabatske promjene je kako slijedi:

$$W_{teh} = \kappa \frac{p_2 V_2}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] \quad (8)$$

Prema ovom izrazu moguće je izračunati iznos minimalnog radnog volumena ako je pored rada poznat potreban eksponent izentropije, minimalni radni tlak i maksimalni radni tlak.

Pošto se u hidrauličkim akumulatorima kao radni medij koristi dušik, iznos eksponenta izentropije iznosi  $\kappa = 1,4$ .

Za određivanje tlakova između kojih sustav radi u hidropneumatskom akumulatoru uzimaju se veličine koje se koriste pri konvencionalnom pogonu hidrauličkog vitla. Prema tome hidraulička pumpa koju pokreće motor s unutarnjim izgaranjem daje tlakove u sustavu ovisno o broju okretaja motora. Hidraulička pumpa tako pri različitim uvjetima daje radne tlakove između 250 i 420 bara. Minimalni radni tlak akumulatora zbog toga iznosi  $p_1 = 250$  bar, a maksimalni radni tlak iznosi  $p_2 = 420$  bar.

Nakon što se odredi minimalni radni volumen, maksimalni radni volumen može se izračunati koristeći izraz koji povezuje stanje plina u dvije radne točke povezane adijabatskom promjenom u nastavku:

$$V_1 = V_2 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (9)$$

Kada su oba volumena plina u hidropneumatskom akumulatoru poznata izračunava se njihova razlika.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (10)$$

### 7.2. Izračun potrebnog volumena hidrauličkog akumulatora

Potreban volumen hidrauličkog akumulatora, označen kao  $V_0$ , određuje se koristeći tlak predpunjenja  $p_0$ , minimalni radni tlak  $p_1$ , maksimalni radni tlak  $p_2$ , eksponent izentrope  $\kappa$  i promjenu volumena plina u akumulatoru  $\Delta V$ .

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left[\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]} \quad (11)$$

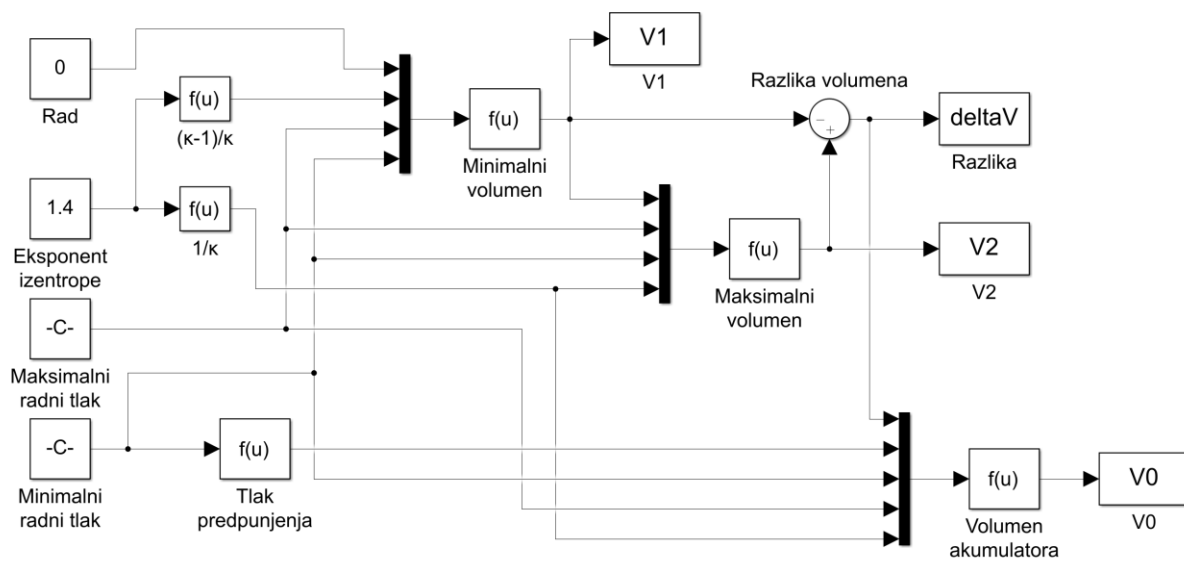
Tlak predpunjenja  $p_0$  izračunava se prema izrazu iz tablice 5 za kriterij upotrebe kod akumuliranja energije.

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1 \quad (12)$$

Pošto su svi potrebni podaci dostupni, može se pristupiti dimenzioniranju hidropneumatskog akumulatora.

### 7.3. Računalni model hidrauličkog akumulatora

Prema opisanom postupku pristupa se izradi računalnog modela hidropneumatskog akumulatora. Računalni model izrađuje se u programskom paketu MATLAB Simulink.



Slika 36. Računalni model hidrauličkog akumulatora

Na slici 36 prikazan je završeni model proračuna volumena za hidropneumatski akumulator. Na lijevoj strani modela postavljeni su ulazi kao blokovi koji daju konstantnu vrijednost. Iste vrijednosti prolaze kroz dani set izraza kako bi se dobili rezultati minimalnog volumena plina u akumulatoru, maksimalni volumen plina u akumulatoru, njihova razlika i u konačnici potrebni volumen hidropneumatskog akumulatora.

U ovom parametriziranom modelu moguće je prema potrebnoj energiji i tlakovima u sustavu dimenzionirati bilo koji akumulator u slučaju da mu je svrha akumuliranje energije.

## 8. REZULTATI SIMULACIJA

Prije dobivanja rezultata računalnog modela potrebno je provjeriti može li, korištenjem hidropneumatskog akumulatora, hidromotor koji pokreće vitlo predati dovoljan moment da bi se vitlanje moglo odvititi. Ako se koristi isti hidromotor kao i u konvencionalnom pogonu, pri maksimalnom radnom tlaku, na glavno vratilo vitla predaje se moment od 907 Nm, a pri minimalnom taj moment iznosi 540 Nm. Usporede li se ovi iznosi s izračunatima koji su prikazani na slici 25, vidi se da momenti razvijeni u vitlanju rijetko prelaze minimalni od 540 Nm koji hidropneumatski akumulator daje, a nikada ne dostižu maksimalni. Trenutci u kojima i prelaze su kratkotrajni, te ako se uzme u obzir da se oni nalaze na početku procesa vitlanja u kojemu je akumulator pun i može stvoriti daleko veći moment koji je potreban za vitlanje, može se reći da hidropneumatski akumulator učinkovito podržava proces vitlanja.

### 8.1. Rezultati ciklusa s maksimalnom energijom

Da bi se dobili rezultati proračuna akumulatora, potrebno je odabrati pravi ciklus u kojemu je utrošeno najviše energije. Prema tome se izabire ciklus prikazan na slici 30. U ovom slučaju ukupno utrošena energija u ciklusu iznosi  $W_v = 4005500$  J.

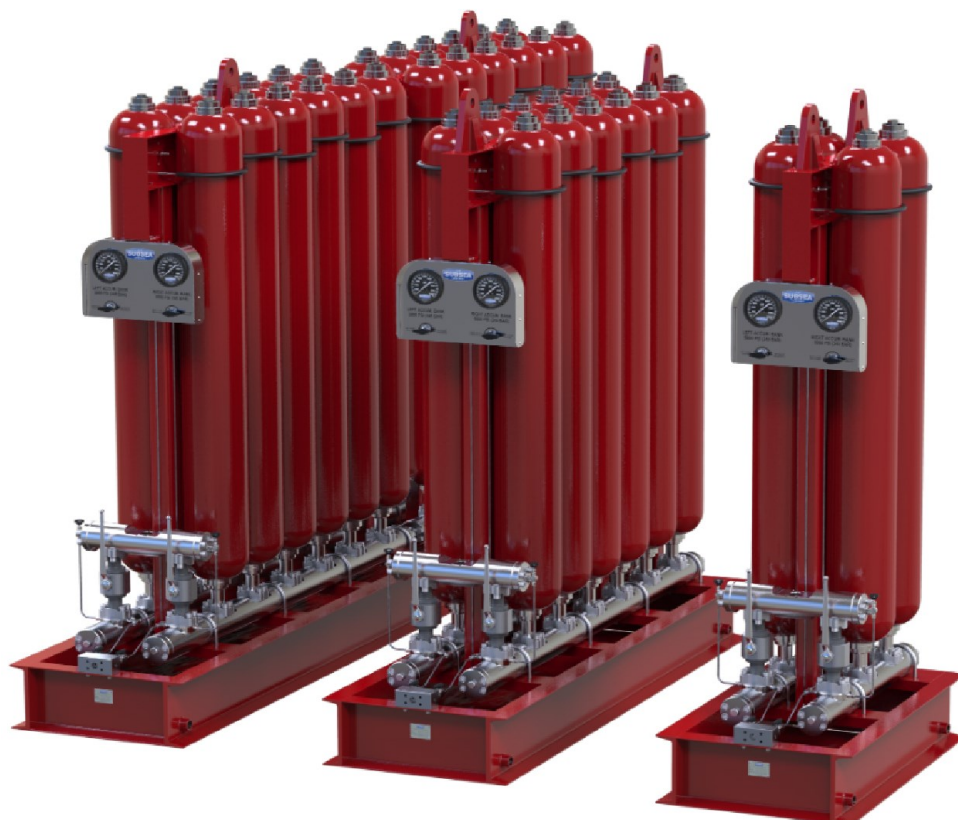
Izjednačavanjem utrošene energije vitlanja  $W_v$  s tehničkim radom  $W_{teh}$  i pokretanjem simulacije potreban volumen akumulatora iznosi  $V_0 = 0,3089$  m<sup>3</sup>, tj.  $V_0 = 308,9$  L. Usporedbom rezultata s tablicom 4 osnovnih značajki plinskih akumulatora vidljivo je da se prema volumenu može odabrati n-tlačni akumulator s mijehom koji može imati volumen do 450 L. Ipak pogleda li se maksimalni tlak od 35 bar, zaključuje se da ova vrsta akumulatora nije pogodna. V-tlačni akumulator s mijehom ipak podržava ove visoke tlakove, no maksimalni volumen ove vrste akumulatora iznosi 50 L.

Membranski hidropneumatski akumulatori s navojem su također visokotlačni i podržavaju tlakove do 400 bar. Promjenama u hidrauličkom sustavu mogao bi se potencijalno prilagoditi radni tlak kako bi se mogla odabrati ova vrsta akumulatora, no i njihov maksimalni volumen iznosi 10 L pa nisu pogodni za ovu upotrebu. Zavareni membranski akumulatori imaju niži maksimalni tlak i još manje dozvoljene volumene, te se ne razmatraju.

Iako ne postoji jedan akumulator koji može podnijeti visoke tlakove, a da uz to ima dovoljan volumen potreban za rad jednog ciklusa vitlanja, može se iskoristiti stalak hidropneumatskih akumulatora. Na isti je moguće postaviti više akumulatora i tako postići potreban volumen od

308,9 L. Točnije, koriste li se n-tlačni akumulatori s mijehom s maksimalnim iznosom volumena, potrebno ih je postaviti devet na stalak kako bi se dobio volumen od 450 L.

Na slici 37 je prikazan primjer stalka s akumulatorima koji proizvodi tvrtka *The Subsea Company*.

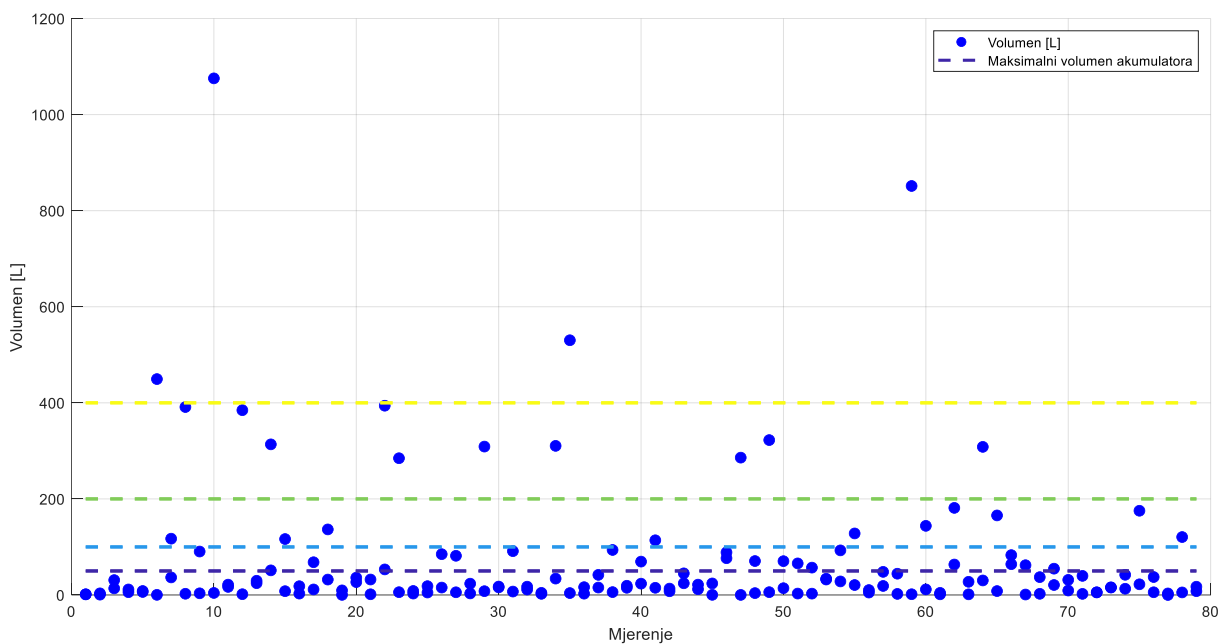


**Slika 37. Stalak s akumulatorima [15]**

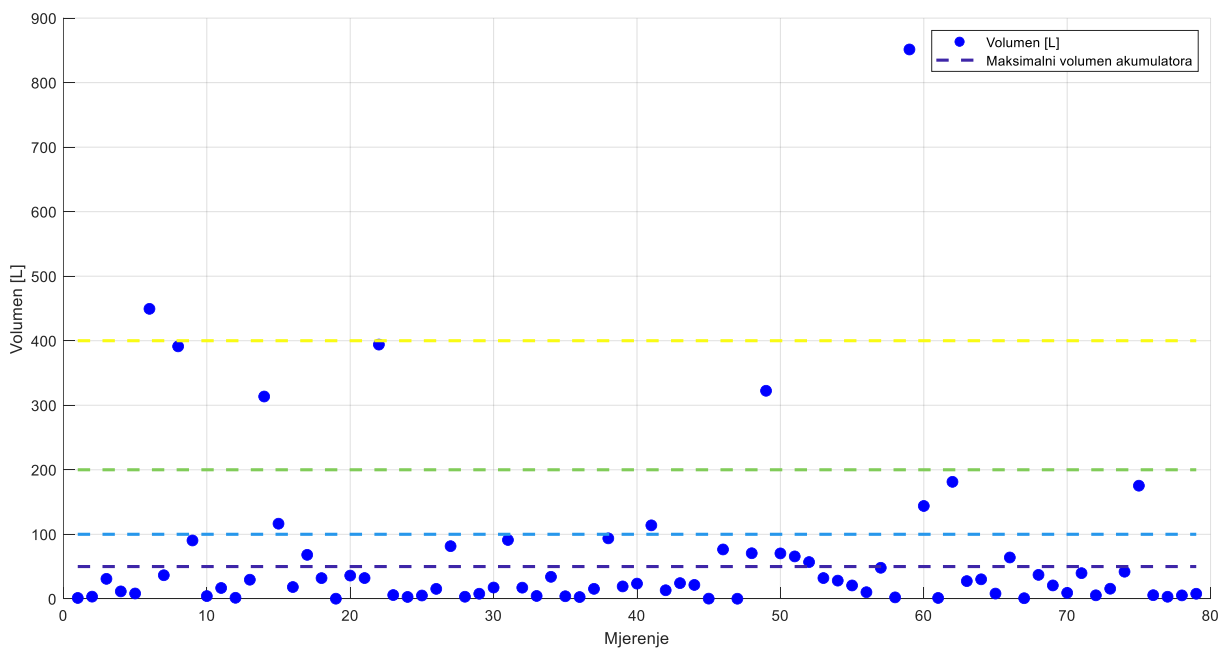
Iako je korištenjem stalka s akumulatorima moguće zadovoljiti potrebe vitla, ovakav veliki dodatni volumen neprikladan je za montažu na skider. Nadalje, pošto su kućišta hidrauličkih akumulatora izvedena od čelika, značajno bi povećali masu skidera zajedno sa uljem koje također nema zanemarivu masu. Iz ovog razloga, prije bilo kakve implementacije akumulatora, potrebno je provesti analize kako bi se utvrdilo na koji način nova opterećenja utječu na ostale aspekte rada skidera.

## 8.2. Rezultati svih ciklusa

Pošto je rezultat odabranog ciklusa nepovoljan, u računalni model kao ulaz postavlja se matrica izračunatih utrošenih energija u svakom ciklusu. Na taj način dobivaju se potrebni volumeni hidropneumatskih akumulatora za sve cikluse vitlanja jednog radnog dana. Na slici 38 prikazani su ovi rezultati za mjerenja na dan 9. veljače 2022., a na slici 39 na dan 10. veljače 2022.



Slika 38. Volumen po ciklusu na dan 9. veljače 2022.



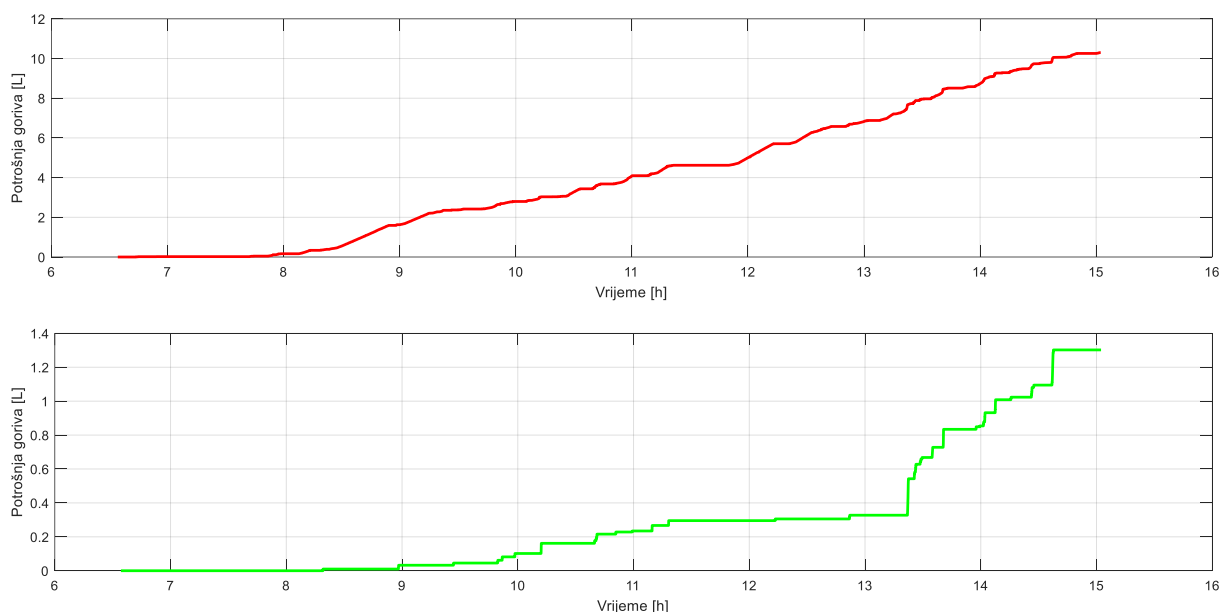
Slika 39. Volumen po ciklusu na dan 10. veljače 2022.

Na dijagramima su postavljene horizontalne linije koje označavaju maksimalni volumen jednog ili više v-tlačnog hidropneumatskog akumulatora s mijehom. Linije su postavljene na volumenima iznosa 50 L, 100 L, 200 L i 400 L. Vidljivo je da u oba radna dana postoji ukupno šest ciklusa kojima je potreban volumen veći od 400 L, četrnaest ciklusa kojima je potreban volumen između 200 L i 400 L, petnaest ciklusa zahtjeva volumen između 100 L i 200 L, dok je za ostatak, tj. veliku većinu ciklusa dovoljno postaviti jedan ili dva akumulatora volumena 50 L. Stoga bi se dodatkom takva dva akumulatora ukupnog volumena 100 L mogla zadovoljiti većina ciklusa vitlanja, a što bi moglo biti i tehnički izvedivo.

### 8.3. Ukupno potrošeno gorivo za vrijeme vitlanja

Montažom hidrauličkog akumulatora na skider za potrebe vitlanja omogućilo bi se smanjenje ukupno utrošenog goriva kroz dan. Na slici 40 linijom crvene boje prikazana je kumulativna potrošnja goriva skidera kada on stoji, tj. kada mu je izmjerena brzina jednaka nuli, na radni dan 9. veljače. 2022.

Kako sva utrošena energija za vrijeme stajanja skidera podrazumijeva potrošnju goriva i u trenucima kada vitlo ne radi, na istoj slici 40 prikazana je linijom zelene boje kumulativna potrošnja goriva samo kada se vitlanje odvija prema slici 19 na radni dan 9. veljače 2022.



**Slika 40. Potrošnja goriva za vrijeme stajanja skidera na dan 9. veljače 2022.**



Prema dijagramima se vidi kako je za vrijeme stajanja skidera ukupno potrošeno gorivo iznosilo 10,3 L, dok je za vrijeme trajanja ciklusa vitlanja potrošeno 1,3 L goriva. Prema ukupnoj potrošnji goriva na radni dan 9. veljače 2022. od 68,3 L, 15,08 % goriva potrošeno je dok je skider bio na mjestu, a za vitlanje je potrošeno 1,91 %.

Na dan 10. veljače 2022. dok je brzina skidera jednaka nuli, ukupno potrošeno gorivo iznosilo je 10,5 L, dok je za vrijeme trajanja samih ciklusa vitlanja bilo potrošeno 0,8 L goriva. Usporedno s ukupnom potrošnjom goriva na taj radni dan od 73,1 L, za vrijeme mirovanja skidera utrošeno je 14,36 % goriva, dok je za cikluse vitlanja potrošeno 1,09 %.

Pri radu skidera često motor s unutarnjim izgaranjem radi, čak i kada stoji na mjestu, kako bi vitlo bilo spremno. Integracijom hidrauličkog akumulatora i odgovarajućeg sustava upravljanja koji automatski kontrolira isključivanje i uključivanje motora s unutarnjim izgaranjem, moguće je omogućiti rad s vitlom bez upaljenog motora, aktivirajući ga samo prema potrebi, npr. kada se akumulator isprazni. Očekuje se da bi rezultati ovoga bili ušteda goriva i smanjenje emisija štetnih plinova, jer bi motor češće bio isključen tijekom praznog hoda. Važno je napomenuti da je potrebno puniti akumulator, ali uz adekvatno upravljanje. Punjenje se može ostvariti tijekom vožnje u uvjetima manjeg opterećenja, čime bi se postigla optimalna upotreba motora s unutarnjim izgaranjem.

## **9. ZAKLJUČAK**

Ovo istraživanje fokusirano je na poboljšanje učinkovitosti pogona hidrauličkog vitla skidera dodavanjem hidrauličkog akumulatora. Rad započinje uvodom u šumski traktor i karakteristikama hidrauličkog vitla. Zatim su opisani mjerni uređaji korišteni pri prikupljanju podataka o radu vitla i analizirani su terenski podaci koristeći modificirani model motora s unutarnjim izgaranjem. Naglasak rada je na predloženoj modifikaciji hidrauličkog sustava koja uključuje hidraulički akumulator. Objasnjeno je načelo rada akumulatora i kako može biti iskorišten za optimizaciju energetske učinkovitosti vitla.

Dodatno je opisan proračun volumena hidrauličkoga akumulatora s pomoću parametriziranog računalnog modela. Rezultati simulacija pružaju uvid u rad vitla s uvođenjem hidrauličkog akumulatora, s time da pokazuju nepovoljne rezultate u smislu da dobiveni potrebni volumeni premašuju dozvoljene granične vrijednosti. Predloženo je korištenje stalka s akumulatorima kako bi se dosegli potrebni volumenski iznosi, s napomenom o nepraktičnosti montaže na skider i nužnim analizama dodatnog opterećenja koje nastaje zbog znatnog povećanja mase skidera.

Rezultati također pokazuju koliko se goriva stvarno troši dok skider stoji, a to vrijeme najčešće korespondira s radom vitla. Dodavanjem hidropneumatskog akumulatora koji omogućuje rad vitla bez uključenog motora s unutarnjim izgaranjem moguće je ostvariti dodatne uštede goriva.

## LITERATURA

- [1] HiSkid: <https://www.hiskid.hr> [pristup 28.12.2023.]
- [2] Hittner: <https://hittner.hr> [pristup 28.12.2023.]
- [3] Izvješće o ispitivanju tehničkih i ergonomskih značajki akidera „Ecotrac 120 V“ i „Ecotrac 140V“: <https://www.hiskid.hr/wp-content/uploads/2021/05/1-Izvjesce-Ecotrac-skideri.pdf> [pristup 28.12.2023.]
- [4] Karlušić J, Cipek M, Pavković D, Benić J, Šitum Ž, Pandur Z, Šušnjar M. Simulation Models of Skidder Conventional and Hybrid Drive. *Forests*. 2020; 11(9):921. <https://doi.org/10.3390/f11090921> [pristup 28.12.2023.]
- [5] Benić J, Karlušić J, Šitum Ž, Cipek M, Pavković D. Direct Driven Hydraulic System for Skidders. *Energies*. 2022; 15(7):2321. <https://doi.org/10.3390/en15072321> [pristup 28.12.2023.]
- [6] Mobilisis: <https://www.mobilisis.hr/wigo-e> [pristup 29.12.2023.]
- [7] Technoton: <https://e-shop.jv-technoton.com/product/dfm-100cd/> [pristup 29.12.2023.]
- [8] Čolak A. Električni pogon šumskog zglobnog traktora (skidera) [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2023 [pristup 4.1.2024.]  
Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:401845>
- [9] Schaschke C, Fletcher I, Glen N. Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature. *Processes*. 2013; 1(2):30-48. <https://doi.org/10.3390/pr1020030> [pristup 5.1.2024.]
- [10] Petrić J. Hidraulika i pneumatika, 1. dio: Hidraulika. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [11] Petrić J. Predavanja iz pneumatika i hidraulika, 1. dio: Hidraulika. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019.
- [12] Korbar R. Pneumatika i hidraulika. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2007.
- [13] Halasz B. Uvod u Termodinamiku, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [14] Hrvatska Enciklopedija: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=481> [pristup 12.1.2024.]
- [15] The subsea company: <http://thesubsea.com/2019/10/accumulator-racks/> [pristup 15.1.2024.]