

ŠOLSKI CENTER CELJE



Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

Raziskovalna naloga

# MINI DRON

Avtorja:

Jakob ARLIČ, M-3. c

Urban PUŠNIK, M-3. c

Mentor:

Martin Amon, mag. inž. str.



## **POVZETEK**

Mini droni so brezpilotna zračna plovila (UAV), ki jih s pomočjo daljinskega upravljalnika upravljamo na daljavo in spadajo v velikostni obseg, predpisan s predpono »MINI«.

Raziskovalna naloga vsebuje podrobnejšo predstavitev sestave drona, samo izdelavo okvirja, primerjavo in raziskavo celotne zmogljivosti dronov.

Prvi sklop raziskovalne naloge vsebuje zastavljena vprašanje in hipoteze. V drugem sklopu je podrobneje opisana delitev dronov in njihove splošne značilnosti. Tretji sklop zajema opis komponent in potek sestave dronov. V četrtem sklopu so opisane baterije. Peti sklop govori o 3D-tehnologiji in digitalnem okolju. Šesti sklop vsebuje potek sestave izdelanih dronov. Sedmi sklop govori o konfiguraciji. Osmi razdelek govori o dodatnih komponentah, vključenih v naš projekt, v devetem pa so predstavljeni rezultati. Deseta točka predstavlja analizo projekta in podaja ugotovitve. V enajstem sklopu pa je opisana zakonodaja, ki jo je potrebno upoštevati ob uporabi drona.

**Ključne besede:** mini droni, sestava, raziskava, primerjava

# ABSTRACT

Mini drones are unmanned aerial vehicles (UAV) which are controlled via a remote controller and fall within the size range of a »MINI« drone.

The research papers contains a more detailed presentation of the drone assembly, the construction of the frame itself, a comparison and research of the overall capabilities of drones.

The first part of the paper contains questions and hypotheses, while the second describes the division of drones into categories and drones in general. The third part includes a description of the components and the process of building drones. The fourth part describes the batteries, whereas the fifth talks about the 3D technology and the digital environment. The sixth part contains the procedure of drone assembly and the seventh deals with the configuration. The eighth part talks about the additional components involved in our project and the ninth presents the results. The tenth part offers the project analysis as well as the presentation of the findings. The paper concludes with an overview of the legislation that must be complied with when using a drone.

**Key words:** Mini drones, build, comparison

# Kazalo vsebine

1 UVOD .....	1
1.1 HIPOTEZE .....	1
2 DRONI .....	2
2.1 KAJ SO DRONI? .....	2
2.2 DELITEV GLEDE NA NAČIN UPORABE .....	2
2.2.1 DIRKALNI DRONI .....	2
2.2.2 SINEMATSKI DRONI .....	3
2.2.3 FREESTYLE DRONI (PROSTI SLOG) .....	5
2.3 DELITEV GLEDE NA VELIKOST .....	6
2.4 NAČINI LETENJA .....	8
2.4.1 VISUAL LINE OF SIGHT (linija vidnega polja) .....	8
2.4.2 FPV (FIRST-PERSON VIEW – POGLED V PRVI OSEBI) .....	8
2.5 NAČINI KRMILJENJA DRONOV .....	9
2.5.1 LEVEL NAČIN .....	9
2.5.2 HORIZON NAČIN .....	10
2.5.3 AKRO NAČIN .....	10
2.5.4 3D-NAČIN .....	10
3 SESTAVA IN KOMPONENTE FPV-DRONOV .....	11
3.1 OKVIR – ŠASIJA .....	11
3.2 POGON .....	11
3.2.1 FLIGHT CONTROLLER (FC) .....	11
3.2.2 ELECTRIC SPEED CONTROLLER (ESC) – ELEKTRONSKI KRMILNIK HITROSTI .....	12
3.2.3 MOTORJI .....	13
3.2.4 PROPELERJI .....	13
3.2.5 BATERIJA .....	14
3.3 FPV-KOMPONENTE .....	14
3.3.1 ANALOG vs. DIGITAL .....	15
3.3.2 KAMERA .....	15
3.3.3 VIDEOTRANSMITTER = VTX (VIDEO ODDAJNIK) .....	16
3.3.4 FPV-OČALA (SPREJEMNIK) .....	16
3.3.5 ANTENA .....	17
3.4 KRMILJENJE .....	18

3.4.1	ODDAJNIK (RC – REMOTE CONTROL = DALJINSKI UPRAVLJALNIK)....	18
3.4.2	SPREJEMNIK.....	18
3.5	DODATKI.....	19
4	LIPO BATERIJE.....	20
4.1	KARAKTERISTIKE LIPO BATERIJ.....	21
4.1.1	ŠTEVILO CELIC IN IMENOVANA (NOMINALNA) NAPETOST.....	21
4.1.2	KAPACITIVNOST.....	22
4.1.3	C KARAKTERISTIKA.....	23
4.2	LIPO POLNJENJE.....	24
4.3	LIPO PRAZNJENJE.....	25
5	3D-TEHNOLOGIJE.....	27
5.1	OPIS MATERIALOV.....	28
5.2	IZBIRA MATERIALA.....	29
5.3	VRSTE IN DELOVANJE 3D-TISKALNIKA.....	30
5.3.1	SLA 3D-tiskalniki.....	30
5.3.2	FDM ali FFM 3D-tiskalniki.....	30
5.3.3	SLS 3D-tiskalniki.....	30
5.4	3D-SLICER.....	31
5.5	KONSTRUIRANJE IN NAČRTOVANJE IZDELKA V DIGITALNEM OKOLJU ...	32
6	IZDELAVA DRONOV.....	37
6.1	TOOTHPICK DRON.....	37
6.1.1	IZBOR KOMPONENT.....	37
6.1.2	NAČRTOVANJE IN IZDELAVA DELOV.....	38
6.1.3	SESTAVA.....	38
6.2	KLASIČEN 3-COLSKI DRON.....	40
6.2.1	IZBOR KOMPONENT.....	40
6.2.2	NAČRTOVANJE IN IZDELAVA DELOV.....	41
6.2.3	SESTAVA.....	41
7.1	BETAFLIGHT.....	43
7.2	KONFIGURACIJA NAŠIH DRONOV.....	43
7.2.1	SETUP.....	43
7.2.2	PRIKLJUČKI (PORTS).....	43
7.2.3	KONFIGURACIJA (CONFIGURATION).....	44
7.2.4	DALJINEC + SPREJEMNIK (RECEIVER).....	44
7.2.5	FUNKCIJE (MODES).....	45

7.2.6 MOTORJI (MOTORS) .....	45
7.2.7 VIDEOODDAJNIK (VIDEOTRANSMITTER) .....	46
7.2.8 OSD .....	46
7.3 BLHELI .....	47
8 OSTALE KOMPONENTE IN PRIPOMOČKI .....	49
8.1 DALJINSKI UPRAVLJALNIK .....	49
8.2 FPV-OČALA .....	49
8.3 UPORABLJENI POLNILCI .....	50
9 SPECIFIKACIJE TESTIRANIH DRONOV .....	52
9.1 POSTOPEK MERJENJA DVIŽNE SILE .....	52
9.2 REZULTATI .....	53
9.2.1 DVIŽNA MASA .....	53
9.2.3 ČAS LETENJA .....	53
9.2.4 ZANIMIVOSTI .....	53
9.2.5 PRIMERJALNI GRAFIKON .....	54
10 UGOTOVITVE .....	56
10.1 POTRJEVANJE HIPOTEZ .....	56
10.2 SE SESTAVA MINI DRONA IZPLAČA? .....	60
11 ZAKONODAJA .....	61
11.1 KRATEK POVZETEK KATEGORIJ .....	61
11.2 PRAVILA .....	62
11.2.1 VIZUALNI VID ZRAKOPLOVA (VISUAL LINE OF SIGHT) .....	63
11.2.2 LETENJE FPV (FIRST PERSON VIEW) .....	63
11.3 REGISTRACIJA .....	63
11.4 IZPIT .....	64
12 ZAKLJUČEK .....	65
VIRI .....	66

## Kazalo slik

Slika 1: FPV dirkalni dron .....	2
Slika 2: Sinematski dron .....	4
Slika 3: Chase quad .....	4
Slika 4: Cinewhoop .....	5
Slika 5: Freestyle dron.....	6
Slika 6: Rotorbase .....	7
Slika 7: Letenje v vidnem polju .....	8
Slika 8: FPV-letenje .....	9
Slika 9: Okvir drona .....	11
Slika 10: Krmilnik leta .....	12
Slika 11: ESC .....	12
Slika 12: Motorji .....	13
Slika 13: Propelerji.....	14
Slika 14: LiPo baterija.....	14
Slika 15: FPV-kamera .....	15
Slika 16: VTX .....	16
Slika 17: FPV-očala .....	17
Slika 18: FPV-antena .....	17
Slika 19: RC-daljinec .....	18
Slika 20: Sprejemnik .....	19
Slika 21: GoPro .....	19
Slika 22: Uporabljene baterije.....	20
Slika 23: Karakteristike baterije .....	23
Slika 24: STL-datoteka.....	32
Slika 25: 3D parametrično modeliranje .....	33
Slika 26: 3D točkovno modeliranje.....	33
Slika 27: Sketch za extrude .....	35
Slika 28: Extrude .....	35
Slika 29: Sketch za revolve .....	35
Slika 30: Revolve .....	35
Slika 31: Helical sweep .....	36
Slika 32: Hole.....	36
Slika 33: Toothpick dron 3D model.....	39
Slika 34: Toothpick dron.....	39
Slika 35: 3"-dron 3D model.....	41
Slika 36: 3"-dron .....	42
Slika 37: Setup .....	43
Slika 38: Priključki.....	44
Slika 39: Konfiguracija .....	44
Slika 40: Sprejemnik .....	45
Slika 41: Funkcije.....	45
Slika 42: Motorji .....	46
Slika 43: Videotransmitter .....	46
Slika 44: OSD.....	47
Slika 45: BIHeli .....	48



Slika 46: Daljinec .....	49
Slika 47: FPV-očala .....	50
Slika 48: iMAX .....	50
Slika 49:ISDT Q6.....	51
Slika 50: Testiranje.....	53
Slika 51: Neuspešno testiranje .....	54
Slika 52: Zlomljen okvir .....	57
Slika 53: Popravek .....	57
Slika 54: Mesh managing .....	58
Slika 55: Material properties .....	59
Slika 56: Izračun simulacije .....	59

## **Kazalo grafov in tabel**

Tabela 1: Delitev dronov .....	7
Tabela 2: Lastnosti uporabljenih baterij .....	20
Tabela 3: Napetostne stopnje .....	22
Tabela 4: Čas polnjenja baterij v minutah.....	25
Tabela 5: Specifikacije dronov.....	52
Graf 1: Dvižne masa dronov .....	54

## **Zahvala**

Iskreno bi se rada zahvalila mentorju, g. Martinu Amonu, za vso pomoč pri procesu izdelovanja raziskovalne naloge. Zahvalo prav tako izrekava tudi najini profesorici slovenščine, ge. Brigiti Renner, za vso pomoč in nasvete pri oblikovanju raziskovalne naloge in pa najini profesorici angleščine, ge. Simoni Tadeji Ribič, za pomoč pri oblikovanju angleškega besedila.

# 1 UVOD

Za raziskovalno nalogo Mini dron smo se odločili, ker smo na podlagi našega zanimanja za FPV (First Person View – pogled v prvi osebi) drone želeli raziskati potek izdelave, konstruiranja in ekonomično dostopnost FPV-dronov. Posledično pa smo hoteli ugotoviti razlike v potencialu posamičnega drona.

## 1.1 HIPOTEZE

1. FPV-drona lahko sestavimo z vsoto denarja, ki ne presega 50 €.
2. Dvižna masa sestavljenega mini drona je večja od 50 % lastne teže.
3. Najdražji dron bo imel največjo dvižno silo in bo imel najdaljši čas letenja.
4. Sila večjega Freestyla 3" se ne bo razlikovala od moči manjšega Toothpick drona za več kot 20 %, prav tako se časovna zmogljivost ne bo razlikovala za 20 %.
5. 3D natisnjeni okvirji ne bodo prenesli trka oz. padca drona.
6. Pri manjših dronih se bo povečeval vpliv dejavnikov zunanjih sil.
7. 3D natisnjen okvir ne bo oteževal letanja zaradi lastnosti materialov.

## 2 DRONI

### 2.1 KAJ SO DRONI?

Droni so brezpilotna zračna plovila, krmiljena s pomočjo daljinskih upravljalnikov. Beseda dron izhaja iz angleškega termina »drone«, prav tako pa bi v terminološkem slovarju zasledili sinonime, kot so letalnik brez pilota, robotski trot, brezpilotno letalo. V grobem se droni delijo na dve vrsti, in sicer na plovila lažja od zraka, npr. zračni balon, cepelin, zračna ladja ..., in na brezpilotna zračna plovila, ki so težja od zraka, npr. zračni helikopter, kvadrokopter, heksakopter ...

V okviru raziskovalne naloge smo se osredotočili na manjše drone, ki delujejo s pomočjo FPV-tehnologije.

### 2.2 DELITEV GLEDE NA NAČIN UPORABE

#### 2.2.1 DIRKALNI DRONI

Ob omembi FPV-dronov večinoma pomislimo na dirkalne drone. Tovrstni droni so hitri in piloti, ki jih upravljajo, so običajno zelo izurjeni, njihovi refleksni čas je zelo hiter, njihovi gibi pa so sunkoviti, ostri in natančni, saj morajo izvajati natančne gibe, da se lahko čim hitreje orientirajo po progi. Prav tako so njihove oblike kompaktnejše za maksimalno aerodinamičnost.



*Slika 1: FPV dirkalni dron*

(Vir: <https://dronerush.com/best-racing-drones-speed-agility-fpv-5971/>)

Najbolj znani organizatorji dirk so MultiGP, poleg njih pa so ustanovili še The Drone Racing League (DRL), ki je televizijska oddaja, v kateri povabijo pilote na dirko, kasneje pa to zmontirajo v enourne televizijske šove.

Drone Racing League je za pravičnost pri dirkanju ustvaril več razredov za dirkanje. Razredi dronov so se določile na podlagi velikosti, moči in teže dronov, da so lahko letalci zmagovali zaradi svojih spretnosti in ne le zaradi premoči njihovih dronov. Nekateri razredi imajo več regulacij kot drugi in tako so nastale odprti razredi, v katerih morajo imeti piloti drone le določene velikosti, določene moči motorjev, baterij in drugih tehnologij pa so izbirni.

### **2.2.2 SINEMATSKI DRONI**

V to kategorijo uvrščamo drone, kot so DJI-ov Phantom ali Mavic (po navadi stanejo od 500 € do nekaj 1.000 €), kot tudi tiste, uporabljene za snemanje dogodkov in filmov. Ti običajno stanejo nad 10.000 €, saj so namensko narejeni in opremljeni s toliko stabilizacije, da so na meji nosilnosti. Hitrost in možnost približati se nekemu objektu (tudi premikajočemu) ločita FPV sinematske drone od omenjenih.

Sinematski FPV droni so podobni ostalim FPV-dronom, a so vedno opremljeni s kamero (GoPro ali Insta360), ki omogoča snemanje poleta v zelo dobri kakovosti. Na delovanje samega drona pa kamera nima velikega vpliva, zahvaljujoč njeni majhni teži. Tovrstni piloti morajo biti sposobni izvajati gladke, čiste gibe pri višji hitrosti.

Sinematske drone razdelimo v skupine glede na njihovo uporabo; s tem se prilagaja njihova velikost:

- Za snemanje narave in za bolj oddaljene polete se uporabljajo droni s 6-, 7-colskimi propelerji, ki so narejeni namensko za letenje, ki traja dalj časa. Prav tako so opremljeni z močnejšimi oddajniki za video kot tudi boljšimi sprejemniki za signal daljinca.



*Slika 2: Sinematski dron*

(Vir: <https://rotorbuilds.com/build/15806>)

- Zelo priljubljeno je tudi lovljenje premikajočih objektov (chase quad). Piloti najraje lovijo dirkalne in drift avtomobile. Za tovrstno snemanje so najpogosteje uporabljeni lahki droni s 5-colskimi propelerji zaradi njihove hitrosti in njihove sposobnosti manevriranja.



*Slika 3: Chase quad*

(Vir: <https://dronesbarcelona.es/en/cinematic-fpv-drone>)

- Novejša različica sinematskih dronov so t. i. cinewhoopi. Propelerji so velikosti 2–4 col, njihova posebnost pa so okvirji, ki imajo zaščito okoli propelerjev, zaradi česar so najpogosteje uporabljeni za snemanje v zaprtih prostorih kot tudi v bližini ljudi in s tem zmanjšajo nevarnost tovrstnega letenja.



*Slika 4: Cinewhoop*

(Vir: <https://dronenodes.com/flight-bumblebee-cinewhoop-review-hit-or-miss/>)

### **2.2.3 FREESTYLE DRONI (PROSTI SLOG)**

Freestyle letenje je način umetnostnega izražanja; pilot izvaja z dronom razne trike, ki morajo biti med seboj povezani čim bolj tekoče in gladko. Piloti, ki letijo freestyle, imajo svoje drone običajno opremljene z akcijsko kamero, nato pa posnetke objavljajo na družabnih omrežjih (Instagram, Youtube ...). Letenje prostega sloga privlači največ novih letalcev, saj nima dorečenih pravil in omejitev, vsak pa se lahko izraža po svoje.

V kategorijo freestyle FPV-droni bi lahko uvrstili tako rekoč vse drone, s katerimi lahko izvajamo trike, od najmanjših do največjih, a najpogosteje so za tovrstno letenje uporabljeni droni s 5-colskimi propelerji (t. i. 5 incherji). Poleg bi lahko dodali tudi manjše drone, kot so tinywhoopi in toothpicki (velikosti med 1- in 3-colskimi propelerji). [4]





*Slika 5: Freestyle dron*

(Vir: osebni vir)

### **2.3 DELITEV GLEDE NA VELIKOST**

FPV-drone pa delimo tudi glede na njihovo velikost in obliko. Delimo jih po velikosti propelerjev in po t. i. rotorbasu, ki predstavlja medosno razdaljo nasprotnih si motorjev (diagonala). V spodnjo tabelo smo dodali razrede, po katerih se ti delijo. [4]



*Slika 6: Rotorbase*

(Vir: osebni vir)

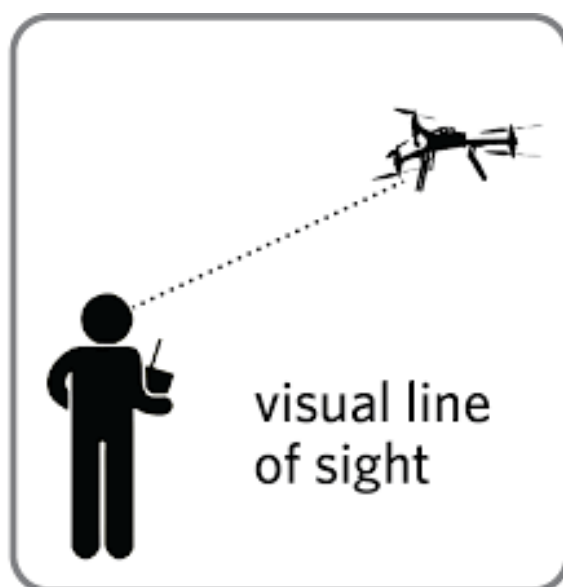
*Tabela 1: Delitev dronov*

RAZRED	PROPELERJI (")	ROTORBASE (mm)	TIP
NANO	1–1.5	<100	TINYWHOOP
	2	~120	TOOTHPICK
MICRO	3	~150	
	4	~190	DIRKALNI in FREESTYLE
MINI	5	~225	
	6	~250	
	7	~280	ZA DALJŠE RAZDALJE
X-CLASS	12–18	>1000	BAMFs

## 2.4 NAČINI LETENJA

### 2.4.1 VISUAL LINE OF SIGHT (*linija vidnega polja*)

Takšne vrste letenje je najpogostejše pri letenju modelnih letal, helikopterjev in cenejših dronov, ki običajno nimajo kamere. Samo ime letenja pove, da je objekt, ki ga nadzorujemo, v vidnem polju upravljalca. Zato moramo biti pozorni, da pogled na krmiljeni objekt ne zastirajo ovire, ki bi lahko prekinile očesni stik z zrakoplovom. Kot ovire štejemo stavbe, drevesa, naravne geografske reliefne enote (hribi, velike skale ...), slabe vremenske pogoje ali pa človeške dejavnike (npr. vozila).



*Slika 7: Letenje v vidnem polju*

(<http://www.droneuplift.com/the-ultimate-fpv-system-guide-everything-explained/>)

### 2.4.2 FPV (*FIRST-PERSON VIEW – POGLED V PRVI OSEBI*)

FPV-letenje je najbolj razširjeno med ljubitelji, ki upravljajo različne vrste dronov pa tudi letala (s FPV-kamerami). Ljudje uporabljajo omenjene FPV-sisteme tudi v drugih vejah, kot so avtomobili ali helikopterji, a v teh primerih je to redkeje prakticirano. V FPV spadajo vsi objekti, ki se nadzorujejo s pomočjo kamere. Le ta s pomočjo oddajnika pošilja analogni ali digitalni signal do pilota – ta signal najpogosteje sprejema z namenskimi očali in temu primerno odreagira z daljinskim upravljalnikom.

Lahko bi rekli, da poteka nadzorovanje FPV-drona kot nekakšno delovanje sistema v povratni zanki, pri čemer pilot opravlja nalogo primerjalnika. Pilot pošlje vhodni signal (input) v daljinca, ta nato posreduje signal dronu, ki ga lahko štejemo kot izhodne informacije (output). Signal, katerega prejmejo očala, pa lahko v tem primeru enačimo s povratno informacijo (feedback). Glede na prejete informacije pilot ponovno pošlje vhodni signal z daljinskim upravljalnikom dronu in s tem spremeni pozicijo ali stanje drona.



*Slika 8: FPV-letenje*

(<https://www.freevector.com/fpv-vector-illustration-25023>)

## **2.5 NAČINI KRMILJENJA DRONOV**

Poznamo več vrst načinov krmiljenja brezpilotnikov, le ti pa se med seboj razlikujejo po načinu nadzorovanja motorjev s krmilnikom leta. Nekateri omogočajo pilotu več, nekateri pa manj nadzora nad dronom.

### **2.5.1 LEVEL NAČIN**

Dron se s pomočjo krmilnika in giroskopa obdrži na uravnovešenem položaju (ostane na mestu), njegov nagib se spreminja glede na premik krmilnih palčk na daljincu. V tem načinu moramo krmilne palčke konstantno držati in ko jih spustimo, se dron uravna. Samo gibanje je tako omejeno in posledično izniči možnost izvajanja obratov. Krmiljenje v tem načinu je lažje, manj nevarno in primerno za začetnike.

### ***2.5.2 HORIZON NAČIN***

Podobno kot pri level načinu se bo dron vrnil v uravnovešeno stanje. V tem načinu gibanje ni omejeno, lahko izvedemo razne obrate in dron se še vedno uravnovesi ob spustu kontrolnih palčk. Ta način predstavlja nekaj med level in acro načinom, a med piloti FPV ni priljubljen.

### ***2.5.3 AKRO NAČIN***

Akrobatski način omogoča pilotu izvajanje vseh mogočih trikov in manevrov, pri tem pa ga prisili, da nenehno prilagaja paličice glede na polet. V primeru, da pilot odmakne roke s krmilnih paličic, se bo dron še vedno gibal v zadnji določeni smeri, saj ga krmilnik ne bo izravnal. Vožnja v tem načinu je za začetnike lahko težavna in zastrašujoča.

### ***2.5.4 3D-NAČIN***

3D-krmiljenje je podobno acro načinu, razlikuje pa se v tem, da ima 3D-način opcijo pospeševanja v nasprotno smer, kar dosežemo s spremembo rotacije na propelerjih. Za takšen način so potrebni specializirani propelerji, katerih krivulja je nevtralna za obe rotacijske smeri.

[8]

## 3 SESTAVA IN KOMPONENTE FPV-DRONOV

### 3.1 OKVIR – ŠASIJA

Na okvir so pritrjene vse komponente drona. Najpogosteje so okvirji narejeni iz več izrezanih kosov karbonskih vlaken. Kljub pogostosti karbona pa smo v raziskovalni nalogi okvirje izdelali s pomočjo 3D-tehnologije, za material pa so uporabljeni plastični polimeri.



*Slika 9: Okvir drona*

(Vir: osebni vir)

### 3.2 POGON

#### 3.2.1 FLIGHT CONTROLLER (FC)

To je krmilnik, ki povezuje vse električne komponente drona, interpretira naše vhode (inpute) in jih pretvori v gibanje. S tem nadzira hitrost vrtenja motorjev. Krmilniki prispejo že s programsko opremo, do katere dostopamo s pomočjo računalnika; najpogostejši so konfiguratorji Betaflight, KISS, EmuFlight, iNav in FalcoX/FlightOne. S pomočjo teh programov lahko spreminjamo nastavitve drona. Najbolj uporabljen program je Betaflight, zato je tudi največ možnosti, da najdemo pomoč na spletu. Najpogostejše velikosti krmilnikov so 30.5 mm x 30.5 mm, 20 mm x 20 mm, 16 mm x 16 mm, krmilniki za najmanjše drone pa so običajno združeni z ESC-jem (Electric Speed Controller) in sprejemnikom.



*Slika 10: Krmilnik leta*

(Vir: <https://www.szttfuav.com/diy-components/flight-controller/>)

### **3.2.2 ELECTRIC SPEED CONTROLLER (ESC) – ELEKTRONSKI KRMILNIK HITROSTI**

Elektronski krmilniki hitrosti se najpogosteje prodajajo v dve verzijah, in sicer vsak ESC posebej za vsak motor ali pa 4 ESC-ji na eni ploščici (4v1 ESC). ESC-ji imajo oznako toka (izraženo v amperih), ki nam pove, koliko toka lahko gre hkrati skozi ESC, preden se lahko ta uniči. ESC-ji imajo svojo programsko opremo tako kot krmilniki, najbolj sta uporabljena BLHeli\_32 in KISS, prav tako pa imajo različne protokole (to so jeziki, ki jih uporabljajo ESC-ji za komuniciranje), določajo podatke, kot je hitrost vrtenja motorjev (najpogostejši so OneShot, MultiShot, DShot, ProShot).



*Slika 11: ESC*

(Vir: <https://fettec.net/en/shop/fettec-4in1-esc-45a>)

### 3.2.3 MOTORJI

Najpogosteje uporabljeni so brezkrtačni motorji. Pomembni podatki motorjev so njihova oznaka, npr. 2207 – prvi dve številki predstavljata premer rotorja, drugi dve pa višino navitij. Pomemben podatek je prav tako hitrost vrtenja, RPM (obrati na minuto), ki pa so pri brezkrtačnih motorjih označeni z oznako KV, ki nam pove, koliko obratov na minuto bo naredil motor z 1 V. Torej, v primeru, da ima motor oznako 2550 KV in nanj priklopimo polno 4s LiPo baterijo (napetost katere znaša 16,8 V) lahko izračunamo RPM. V našem primeru je to:

$$2550 \text{ KV} \times 16,8 \text{ V} = 42,840 \text{ RPM}$$



Slika 12: Motorji

(Vir: <https://www.aliexpress.com/i/4000680513131.html>)

### 3.2.4 PROPELERJI

Propelerji ustvarjajo dvižno silo s pomočjo rotacije. Najpogosteje so označeni s tremi številkami, ki označujejo glavne parametre propelerjev v obliki: AA x BB x C. Prva številka AA nam pove premer propelerja (najpogosteje v colah), druga številka BB opisuje naklon krakov propelerja, zadnja številka C pa izraža število krakov. Najpopularnejši propelerji so tisti s tremi kraki, saj je najboljša kombinacija vseh karakteristik (teže, odzivnosti, "oprijema" in sile vzgona propelerjev). Običajno se prodajajo v paketih po 2 propelerja, orientacije vrtenja v smeri urinega kazalca (označeno s CW – clockwise), in 2 propelerja z orientacijo vrtenja v nasprotni smeri urinega kazalca (CCW – counter clock wise).





Slika 13: Propelerji

(Vir: <https://dronenodes.com/quadcopter-props-best-picks-characteristics/>)

### 3.2.5 BATERIJA

Najboljšo zmogljivost za FPV-drone nudijo LiPo baterije, ki pa imajo svoje slabosti. Več o tem v poglavju 4.



Slika 14: LiPo baterija

(Vir: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-graphene-1500mah-4s-75c-lipo-pack.html?queryID=f7f81a7205643e5ca9de628392474dbb&objectID=84593&indexName=hbk\\_live\\_magento\\_en\\_us\\_products](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-graphene-1500mah-4s-75c-lipo-pack.html?queryID=f7f81a7205643e5ca9de628392474dbb&objectID=84593&indexName=hbk_live_magento_en_us_products))

## 3.3 FPV-KOMPONENTE

FPV-komponente nam omogočajo FPV-letenje, in sicer so to kamera, videooddajnik in FPV-očala. V začetku FPV-ja so obstajali le analogni sistemi, saj so omogočali hiter prenos podatkov

iz premikajočega drona do pilota, saj je ideja HD-sistema izgledala nedosegljiva. V avgustu 2019 je podjetju DJI uspelo nemogoče z njihovim digitalnim FPV-sistemom z zelo nizko latenco (zamik/zakasnitev signala; čas, ko VTX odda signal, do trenutka, ko ga pilot prejme). S tem se je odprl nov svet za ljubitelje in navdušence FPV-ja, prav tako pa tudi za druga podjetja, ki so že proizvajala FPV-sisteme. Z letom 2021 je DJI že dal v prodajo svoj V2 digitalni sistem, prav tako tudi svoj FPV-dron. Začenja se tudi prodaja drugih digitalnih sistemov podjetij, kot so FAT SHARK (znani po svojih analognih očalih), z njihovim SHARK BYTE sistemom, za katerega predvidevajo, da bi lahko izzval zmogljivost sistema DJI, a zaenkrat jim to še ne uspeva.

### **3.3.1 ANALOG vs. DIGITAL**

- Latenca: analogni signal omogoča hitro pošiljanje signala = ima majhno latenco, česar digitalni sistemi do izida DJI-sistema niso dosegali.
- Kakovost signala: pri analognem signalu prihaja ob večji oddaljenosti do prekinjanja signala (t. i. sneg) in slabšanja slike, posledično slabša vidljivost in na koncu tudi izguba signala.

### **3.3.2 KAMERA**

Zajema sliko in pošilja podatke oddajniku signala. Cenovno se gibljejo med 15 € in 50 €, dobavljive pa so v štirih velikostih: standardni (28 mm), mini (21 mm), micro (19 mm) in nano (14 mm).



*Slika 15: FPV-kamera*

(Vir: [https://www.banggood.com/Foxeer-Razer-Mini-1-or-3-CMOS-HD-5MP-2\\_1mm-M12-Lens-1200TVL-4-3-or-16-9-NTSC-or-PAL-Switchable-FPV-Camera-For-RC-Drone-p-1578759.html?cur\\_warehouse=CN&ID=5304995222376269620](https://www.banggood.com/Foxeer-Razer-Mini-1-or-3-CMOS-HD-5MP-2_1mm-M12-Lens-1200TVL-4-3-or-16-9-NTSC-or-PAL-Switchable-FPV-Camera-For-RC-Drone-p-1578759.html?cur_warehouse=CN&ID=5304995222376269620))

### 3.3.3 VIDEOTRANSMITTER = VTX (VIDEO ODDAJNIK)

Oddaja videosignal na določeni frekvenci in z določeno močjo, ki jo določimo sami. Za frekvence določimo pas signala (A, B, E, F, R, I), za vsak pas določimo kanal (od 1 do 8). Moč oddajnikov lahko sega do 1000 mW, a v večini predelov sveta moč uradno ne bi smela prekoračiti 25 mW. Na VTX se običajno priključi eno anteno, najpogosteje je to OMNI-antena – oddaja signal v vse smeri, kar je nujno, saj se droni konstantno obračajo.



Slika 16: VTX

(Vir: <https://oscarliang.com/rush-vtx-tank-plus-race-mini-tiny/>)

### 3.3.4 FPV-OČALA (SPREJEMNIK)

Sprejemajo signal in nam ga prikazujejo na ekranu v očalih. Večina očal omogoča snemanje leta (DVR), tako lahko ob koncu pogledamo, kako smo leteli. V primeru, da nimamo na dronu videokamere ali pa smo ga izgubili, si lahko pomagamo z videom na očalih, da ga najdemo. Na očalih se uporabljata po 2 anteni, običajno ena OMNI- in ena PATCH-antena (usmerjena antena – ima boljši signal, a le v smeri, kamor je obrnjena). Ti anteni se uporabljata v kombinaciji s tehnologijo na očalih, imenovano diverziteteta (diversity), kar pomeni, da bo na ekranu vedno prikazan najmočnejši signal.



*Slika 17: FPV-očala*

(Vir: <https://www.amazon.com/EACHINE-Goggles-800x480-Diversity-Headset/dp/B076BWMTL7>)

### **3.3.5 ANTENA**

Antene imajo dve vrsti polarizacije: levo (LCHP) in desno (RCHP); v primeru, da je na dronu antena desne polarizacije, mora biti enako na očalih. Najpogosteje uporabljeni konektorji anten so U.FL, MMCX, SMA. Kot smo že omenili, imamo OMNI-antene in PATCH-antene. Pod OMNI-antene spadajo LOLLOPOP, PAGODA IN STUBBY; pod PATCH-antene pa spadajo PATCH, HELIKS, CLOVER, ANTENE.



*Slika 18: FPV-antena*

(Vir: <https://www.amazon.com/-/es/usmile-Foxeer-Lollipop-Quadcopter-Transmisor/dp/B07T61ZJDP>)

## 3.4 KRMILJENJE

### 3.4.1 ODDAJNIK (RC – REMOTE CONTROL = DALJINSKI UPRAVLJALNIK)

S premikanjem krmilnih palčk na daljinskem upravljalniku spremenimo naš vhod (input) v signal, ki ga daljinec pošlje sprejemniku na dronu.



*Slika 19: RC-daljinec*

(Vir: <http://www.nefolk.org/radijsko-vodene-igrace/00092502723.html>)

### 3.4.2 SPREJEMNIK

Sprejemniki imajo svoje protokole in jih lahko povežemo le z daljincem, ki deluje z enakim protokolom. Sprejemnik sprejema naše vhode vsakega na svojem kanalu. Potrebujemo minimalno štiri za osnovne funkcije premikanja drona, poleg tega pa potrebujemo dodatne kanale za zagon drona, piskanje (v primeru izgube drona), načine letenja in vse, kar dopušča program. Telemetrija je povratni signal, ki ga pošilja sprejemnik nazaj do daljinca (če tega nima, nam na daljincu ne predvaja znaka za uspešno povezavo), prav tako pa nas opozarja na slab signal ali njegovo izgubo.



*Slika 20: Sprejemnik*

(Vir: <https://www.getfpv.com/flysky-fs-ia6b-receiver-6ch-2-4g-afhds-2a-telemetry-receiver.html>)

### **3.5 DODATKI**

Na FPV-dronih sta še dve zelo pogosti komponenti, to sta kamera, za snemanje boljše slike poletov drona, in piskač (t. i. Beeper), ki opozarja na stanje baterije.



*Slika 21: GoPro*

(Vir: <https://www.mimovrste.com/sportne-kamere/gopro-hero-8-sportna-kamera-crna>)

[4]

## 4 LIPO BATERIJE

LiPo baterije so glavna izbira vseh FPV-pilotov, saj prenesejo velike obremenitve, hkrati pa so zelo lahke, saj nimajo dodatnih senzorjev ali zaščite v primerjavi z baterijo, ki jo lahko npr. najdemo v dronu, kot je DJI-Phantom 4. Baterija tega drona je veliko težja, saj ima dodatne senzorje, ki spremljajo stanje baterije, poleg tega pa ima trdo ohišje za zaščito. V spodnji tabeli so prikazane vse baterije, ki smo jih uporabljali v raziskovalni nalogi, in njihove teže. Za primerjavo pa smo dodali nekaj specifikacij baterije omenjenega DJI-drona.

*Tabela 2: Lastnosti uporabljenih baterij*

Baterija	Eachine	Turnigy Nano-Tech	Turnigy Graphene	Turnigy	Turnigy	Turnigy	DJI
Celice/ napetost v V	1S/3.7	1S/3.7	1S/3.7	2S/7.4	3S/11.1	4S/14.8	4S/14.8
mAh	150	650	600	500	500	1500	5350
C	30	70	75	20	20	75	/
Teža (g)	6	20	31	33	47	202	462



*Slika 22: Uporabljene baterije*

(Vir: osebni vir)

## 4.1 KARAKTERISTIKE LIPO BATERIJ

LiPo baterije imajo tri pomembne karakteristike: število celic in napetost, kapacitivnost in karakteristiko C.

### 4.1.1 ŠTEVILO CELIC IN IMENOVANA (NOMINALNA) NAPETOST

LiPo baterije so sestavljene iz več LiPo celic, vezanih v zaporedni vezavi. Število celic nam pove, koliko jih je zaporedno vezanih v določeni bateriji.

#### 4S – 4-celična LiPo baterija (4 zaporedno vezane celice)

Poleg tega števila imamo na bateriji napisano še t. i. nominalno napetost. To je le reklamirana napetost baterije in za pilote FPV-ja nima pomena. Reklamirana napetost ene celice je 3.7 V. Napetost večcelične baterije dobimo tako, da zmnožimo napetost celice s številom celic baterije.

$$4S: 4 \times 3.7 \text{ V} = 14.8 \text{ V}$$

Poleg nominalne napetosti obstajajo še 4 stopnje napetosti, ki so za pilote kritičnega pomena:

- 3.0 V/celica (nevarnost) – to je stopnja, pod katero napetost naše baterije ne sme pasti, saj bo imela nepopravljivo škodo. V primeru, da pade napetost celic baterije pod 3.0 V, se le te poškodujejo, poveča se jim notranja upornost, kar lahko povzroči ob večjih obremenitvah (letenje) veliko segrevanje, ki lahko posledično pripelje do eksplozije baterije. Prav tako lahko baterija enostavno preneha delovati med letom in povzroči, da dron strmoglavi. S tem lahko pride do velike škode v primerjavi z eno baterijo.
- 3.5 V/celica (pristanek) – med samim poletom je potrebno spremljati napetostno stopnjo baterije, saj padec napetosti ni linearen. Ko enkrat doseže napetost 3.5 V, začne ta hitreje padati, zato je dobro, da vedno pristanemo, preden baterija dejansko doseže to napetostno stanje. Prav tako se pozna padec napetosti na delovanju drona, ki postane nezanesljiv.
- 3.8 V/celico (shranjevanje) – to napetostno stanje predstavlja najbolj stabilno točko baterije. Baterije »grede« v tem stanju iz tovarne, prav tako pa jih moramo po vsakem poletu napolnit/izprazniti nazaj v to stanje, saj LiPo baterije ne smejo biti predolgo polne ali prazne. Če pustimo baterije polne/prazne več kot 48 ur, bo njihovo delovanje



poslabšano, pospešila pa se bo celična razgradnja, ki lahko povzroči težave v bateriji (eksplozija, ogenj – lahko se zgodi tudi med samim polnjenjem). 3.8 V je približno 40 % polna baterija.

- 4.2 V/celica (polno) – to je maksimalna napetost posamezne celice baterije in je lahko v tem stanju le nek določen čas. Kot smo že večkrat omenili, lahko baterija eksplodira, kar se lahko zgodi tudi v primeru, če jo prenapolnimo (več kot 4.2 V).

Baterije, ki se uporabljajo v nano dronih in tinywhoopih so najpogostejše 1- in 2-celične baterije, pri mikro in toothpick dronih se uporabljajo 2- in 3-celične baterije, 4- in 6-celične baterije se uporabljajo na dronih s propelerji, velikosti med 4 in 7 inchi, 5-celične baterije pa se uporabljajo redkeje, največkrat na FPV-dronih (velikosti med 4 in 7 inchov), narejenih za letenje na daljše razdalje in dalj časa.

Tabela 3: Napetostne stopnje

Število celic	1 S	2 S	3 S	4 S	5 S	6 S
Nevarnost	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0
Čas pristanka	3.5	7.0	10.5	14.0	17.5	21.0
Nominalna	3.7	7.4	11.1	14.8	18.5	22.2
Shranjevalna	3.8	7.6	11.4	15.2	19.0	22.8
Maksimalna	4.2	8.4	12.6	16.8	21.0	25.2

#### **4.1.2 KAPACITIVNOST**

Kapacitivnost LiPo baterije je zmerjena v miliamperskih urah (mAh), pri čemer je 1000 mA enako 1 A. Dejansko pa nam kapaciteta pove, koliko toka lahko baterija konstantno dovaja v roku ene ure. Npr. LiPo baterija s kapaciteto 1500 mAh lahko dovaja 1.5 A eno uro, preden se izprani. Za pilote pa je uporabna iz dveh razlogov:

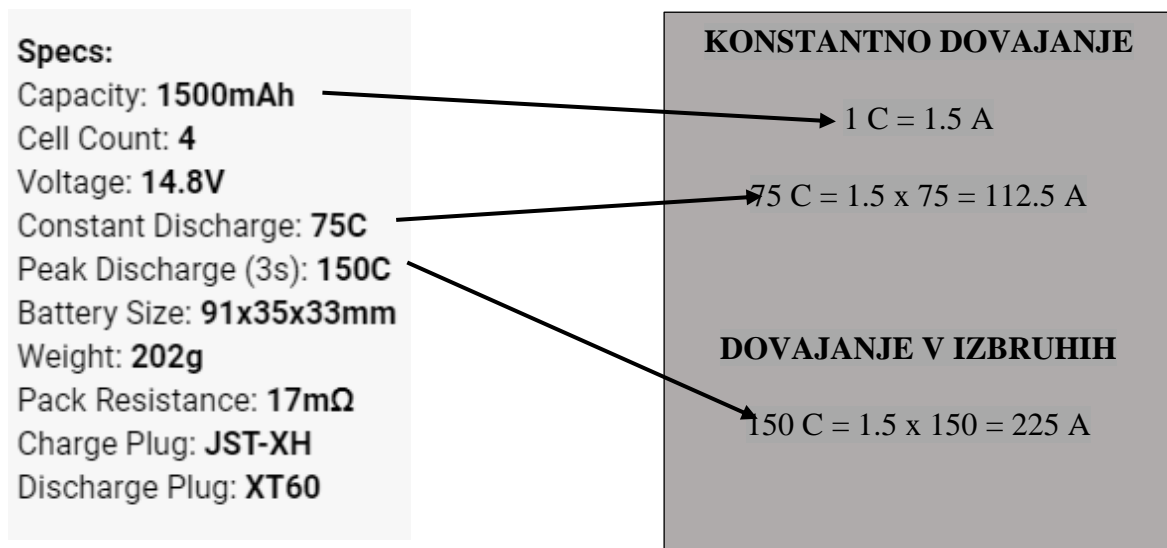
- Primarno nam predstavlja približen čas letenja. Če bi vsi parametri baterije ostali enaki, bi večja kapaciteta baterije pomenila daljši čas letenja, a seveda se z večjo kapaciteto poveča tudi teža same baterije, kar pomeni, da potrebuje dron večjo silo, da lahko opravi

enak premik kot pa z manjšo (lažjo) baterijo. Za različne razrede dronov se uporabljajo baterije različnih kapacitivnosti. V primeru dirkalnih dronov se uporabljajo baterije z 900 ali manj mAh, saj morajo biti droni v zraku krajši čas. Za freestyle letenje se uporabljajo baterije med 1100 in 1550 mAh, medtem ko uporabljajo droni za daljše razdalje baterije med 1800 in 2200 mAh.

- Poleg tega se kapacitivnost uporablja za preračun karakteristike C. "1 C" je enak vrednosti kapacitivnosti baterije v Ah, zato pretvorimo 1500 mAh v 1.5 Ah (delimo s 1000). Tako predstavlja 1.5 Ah 1 C naše baterije.

#### 4.1.3 C KARAKTERISTIKA

Kot smo ugotovili, lahko naša 1500 mAh baterija dovaja konstantno 1.5 A za 60 min. Seveda za tovrstne drone 1.5 A ni veliko, saj lahko FPV-droni zahtevajo tudi do 150 A. Karakteristika C nam pove, koliko toka lahko baterija naenkrat dovaja. LiPo baterije imajo 2 različni vrednosti C; četudi nista napisani na bateriji, lahko ta drugi podatek najdemo v navodilih baterije. Prva vrednost nam predstavlja največjo konstantno vrednost dovajanja baterije, v našem primeru je to 75 C. Druga vrednost pa nam pove izbruh dovajanja baterije v manjših časovnih ciklih (do 10 sec), v našem primeru naj bi to bilo 150 C. Prav zaradi velikih vrednosti C so LiPo baterije idealne za FPV-drone.



Slika 23: Karakteristike baterije

(Vir: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-graphene-1500mah-4s-75c-lipo-pack.html?queryID=f7f81a7205643e5ca9de628392474dbb&objectID=84593&indexName=hbk\\_live\\_magento\\_en\\_us\\_products](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-graphene-1500mah-4s-75c-lipo-pack.html?queryID=f7f81a7205643e5ca9de628392474dbb&objectID=84593&indexName=hbk_live_magento_en_us_products))

## 4.2 LIPO POLNJENJE

Kljub temu da se lahko LiPo baterije praznijo s 100 C hitrostmi in več, jih lahko polnimo le s hitrostmi do 5 C; odvisno od posameznega proizvajalca nekatere baterije lahko polnimo le s hitrostmi do 3 C. Idealna hitrost polnjenja za baterije pa je 1 C. LiPo polnilci po večini zaznajo število celic baterije, kapacitivnosti pa ne, zato jo moramo določiti sami pred pričetkom polnjenja. Če želimo napolniti 1500 mAh baterijo na 1 C, bi se ta polnila iz nič 50–70 min, če jo polnimo na 2 C, se čas polnjenja približno razpolovi. Prehitro polnjenje LiPo baterij pospešuje celično razgradnjo, prav tako pa ni dovolj časa, da se celice balansirajo. Nevarnost prenapolnjenja je redka, saj polnilci ne dopuščajo polnjenja nad 4.2 V, razen v primeru, da nastavimo drug tip baterije, npr. namesto LiPo nastavimo LiHV (visoko napetostna LiPo baterija), ki ima maksimalno napetost 4.35 V.

Za polnjenje baterij poznamo dva načina:

- Prvi in najvarnejši način je, da polnimo vsako baterijo zase. V tem primeru je najboljša odločitev polnilec s 4 neodvisnimi izhodi za polnjenje, saj lahko tako napolnimo 4 baterije v 30 min (2 C) in 12 baterij v 90 min.
- Drugi način je manj varen in lahko skrajša življenjski razpon LiPo baterije. Gre za vzporedno hkratno polnjenje več baterij na enem izhodu polnilca. Tovrstno polnjenje je mogoče s posebnimi ploščicami za vzporedno polnjenje. Pri tem se moramo držati nekaj pravil:
  - Hkrati lahko polnimo le več baterij z enakim številom celic. V primeru, da bi polnili eno 6S baterijo in eno 4S baterijo, bi večja napetost S baterije preskočila v 4S baterijo, kar bi povečalo napetost teh celic nad 4.2 V. To bi lahko ponovno povzročilo eksplozijo, ogenj ali pa drugače uničilo baterijo.
  - Za baterije, ki jih priključimo vzporedno, ni dovolj, da so si enake po številu celic, ampak morajo imeti podobne napetosti celic. Če ima ena baterija napetost celic 3.4 V, druga pa 3.9 V, se lahko poškodujejo, enako kot če bi polnili baterije z različnim številom celic. Idealno stanje bi bilo, da se napetosti celotnih baterij ne razlikujejo za več kot 0.2 V.
  - Ko priklapljamo baterije v ploščico, moramo najprej priklopiti glavni priključek, da se napetosti med baterijami uravnajo, in šele zatem balansni kabel. Obratno velja ob koncu polnjenja.

- Pomembno se je zavedati, da se ob zaporedni vezavi amperi seštevajo. To pomeni, da v primeru, ko polnimo 4 baterije, ki imajo  $1\text{ C} = 1.5\text{ A}$ , se to sešteje v  $6\text{ A}$ . V tem primeru je potrebno imeti dovolj močan polnilec, ki lahko dovaja dovolj toka, saj je v primeru 4 baterij  $1\text{ C}$  enak  $6\text{ A}$ , kar veliko cenejših polnilcev ne more omogočati.

*Tabela 4: Čas polnjenja baterij v minutah*

Hitrost polnjenja	Eachine 1S	Turnigy Nano-Tech 1S	Turnigy Graphene 1S	Turnigy 2S	Turnigy 3S	Turnigy 4S
1 C	~10	~25	~25			~35
2 C	/	~10	~10	~24		~16

### 4.3 LIPO PRAZNJENJE

Praznjenje baterij je zelo pomembno, saj ni dobro, da so predolgo polne ali prazne. V primeru, da baterije ne moremo sprazniti s poletom, je pametno, da jih priklopimo v polnilec, saj ima ta poleg polnjenja tudi možnost praznjenja.

#### **Kako lahko spremljamo stanje baterije med letom?**

- Če letimo »line of sight«, je najboljša rešitev t. i. »beeper« (tester napetosti), ki ga priklopimo v balansirni kabel. Nato na njem nastavimo željeno vrednost napetosti baterije, pri kateri nas začne opozarjati. Npr. napetost lahko nastavimo na  $3.5\text{ V}$  in ko bodo celice dosegle to vrednost, bo začel piskati za opozorilo.
- V primeru letanja FPV pa imamo na naših FPV-očalih t. i. OSD (on screen display), ki nam prikazuje podatke na zaslonu. Lahko nam prikazuje veliko različnih podatkov, kot so napetost baterije, poraba, časovnice ... Najpomembnejši podatki, iz katerih lahko razberemo, koliko časa še lahko letimo, so:
  - napetost celice: pametno je začeti razmišljati o pristajanju, ko napetost doseže  $3.6\text{ V}$ . Ne smemo pa se zanašati le na napetost, saj ko drastično povečamo moč vrtenja z daljincem, pride do pojava, ki ga v FPV poimenujejo »voltage sag«. To pomeni, da napetost drastično pade ob povečanju hitrosti vrtenja in se vrne nazaj na normalno stopnjo napetosti, ko zmanjšamo hitrost.
  - porabljene mAh: ta podatek nam pove, koliko mAh smo porabili. Zanj velja pravilo, da se ne porabi več kot  $80\%$  mAh, kar pomeni, da pri bateriji s  $1500$

mAh ne porabimo več kot 1200 mAh. Podatek ni popolnoma zanesljiv, saj mora biti baterija pred pričetkom polna. Zpomniti si moramo, koliko mAh sploh ima določena baterija in kot zadnje, se moramo zavedati, da se v primeru izklopa baterije (ob padcu), števcu na očalih resetirajo, baterija pa ne.

- stoparica poleta: šteje čas, kako dolgo letimo. Čas letenja se razlikuje od vsakega drona, komponent in velikosti baterije. Prav tako se stoparica resetira ob izklopu baterije.

[4]

## 5 3D-TEHNOLOGIJE

Kratica 3D ali z besedo » 3 dimensional« pomeni premikanje, ustvarjanje, izdelovanje, opazovanje ne zgolj na sami ravnini, ki jo (večinoma) definirata osi x in y, temveč v prostoru, čigar volumen dosežemo z dodatkom tretje osi (os z).

Torej, če po predhodni pojasnitvi združimo besede 3-dimenzionalen in tehnologija, dobimo nabor tehnoloških postopkov, ki delujejo na principu izdelovanja objekta, ki ima poleg širine in dolžine znano tudi višino.

V grobem lahko stroje, ki obsegajo 3D-tehnologijo, razdelimo v dve ključni skupini, in sicer na:

- stroje, ki dodajajo material,
- stroje, ki odvijajo material.

V raziskovalni nalogi smo se odločili za prvo opcijo in sicer za 3D-tiskanje. To je postopek dodajanja materiala, natančneje nanašanje plasti eno na drugo, s čimer ustvarjamo predmet, objekt, po digitalnem 3D-modelu, o katerem bomo govorili kasneje.

3D-tiskalniki so v 21. stoletju v porastu, cena pa jim je močno padla, kar posledično vpliva na precejšnjo pogostost tudi v domači rabi. Uporabljajo se predvsem pri izdelovanju prototipov, najdemo pa jih v različnih panogah (inženirstvo, avtomobilska, letalska in vesoljska industrija, obutev ...).

Tehnologija je tako napredovala, da je možno tiskati objekte iz ogromno različnih materialov, npr. gume, plastike, kovine ..., kar pa je odvisno od lastnosti in zmogljivosti tiskalnika ter najpomembneje, potreb uporabnika.

V raziskovalni nalogi so bile tako naše potrebe material, katerega lastnosti so, da je:

- lahek,
- vzdržljiv,
- prožen,
- trden,
- cenovno ugoden.

Na podlagi naštetih pogojev smo sprejeli odločitev, da bo ohišje ali okvir drona narejen iz »plastičnih polimerov«.

Beseda »plastičen polimer« je širok pojem, v 3D-tiskanju pa je brez natančno definiranih oznak ali imen popolnoma neuporabna, saj se za tisk uporablja veliko vrst, ki se ločijo po trdoti, trdnosti, masi, odpornosti, barvi ...

Najbolj znani so materiali z oznakami:

- PLA
- PETG
- ASA
- ABS
- TPU

[2, 15]

## 5.1 OPIS MATERIALOV

V tem podpoglavju bomo opisali materiale za 3D-tisk. Poznamo več vrst tiskalnikov, ki uporabljajo različne materiale. Spodaj opisani materiali se uporabljajo za FMD- ali FFM-tiskalnike (slednji je uporabljen za to nalogo).

PLA – (ang. Polylactic acid, Polylactide) je polilaktična kislina, ki je termoplastični material, določa pa ga kemična sestava  $(C_3H_4O_2)_n$  ali  $[-C(CH_3)HC(=O)O-]_n$ . Material je postal popularen, saj je pridobljen ekonomično, in sicer iz obnovljivih virov. Leta 2010 je bil drugi najbolj uporabljen material iz družine bioplastik, še vedno pa njegovo uporabo ovirajo fizične pomanjkljivosti, ki otežujejo obdelavo. Hkrati je zelo primeren tako za začetnike kot tudi bolj izkušene, saj ga je lahko tiskati, je cenovno ugoden, izdelki, narejeni iz omenjenega materiala pa so lahko uporabljeni v veliko panogah.

PETG – (ang. Polyethylene terephthalate glycol) je polietilni tereftalat glikol. Spada med termoplastične poliestre, zagotavlja pa kemično odpornost, trpežnost in dobre oblikovne značilnosti. Pogosto ga zasledimo v proizvodnji plastenk. Je odporen na udarce, vendar pa ima malo mehkejšo zasnovo, zato se hitreje obrabi. Če ga primerjamo s PLA-materialom, je slednji bistveno bolj žilav.

ABS – (ang. Acrylonitrile butadiene styrene) je akrilonitril butadien stiren. Kot prejšnji materiali tudi ABS spada med termoplaste, primeren pa je za brizganje; v inženiringu ga uporabljajo zaradi lahke obdelave in nizkih stroškov. V primerjavi s PLA-jem je zagotovo manj žilav, je pa zato bolj trd, hkrati pa tudi lažji.

TPU – (ang. Thermoplastic elastomers) so termoplastični elastomeri, vrsta kopolimerov, ki so sestavljeni iz materialov s tako termoplastičnimi kot elastomernimi lastnostmi. Primerni so za komponente, ki so obremenjene s tlačnimi in nateznimi napetostmi, saj je njihova glavna lastnost durabilnost, elastičnost.

ASA – (ang. Acrylonitrile styrene acrylate ) je akrilonitril stiren akrilat. Pogosto je uporabljen v avtomobilski industriji pa tudi v 3D-izdelavi prototipov. Glavna željena lastnost materiala je vremenska odpornost, torej UV-rezistenca. [2,15]

## **5.2 IZBIRA MATERIALA**

Izbira materialov je ne samo na področju 3D-tiskanja, temveč v praktično vseh panogah zelo pomemben dejavnik, ki vpliva na kakovost in izgled izdelka. Potrebno je izbrati material z lastnostmi, ki so pogoj za pravilno funkcioniranje izdelka. Trdnost, žilavost, temperaturna odpornost, električna upornost, relativni koeficient trenja, cena ... so lastnosti, ki se razlikujejo glede na različne vrste materialov, posledično izberemo material, ki nam najbolj ustreza za naš izdelek.

Tako smo tudi pri izdelavi upoštevali lastnosti materialov, hkrati pa imeli v mislih, da je izdelek, ki ga izdelujemo, prototip in bodo najverjetneje potrebni popravki, rekonstruiranje in naknadna obdelava, obenem pa mora biti cenovno ugoden. Na podlagi pogojev smo se odločili za 3D-tisk, ki ima veliko prednosti (natisnemo lahko skoraj kakršno koli obliko, postopek je lahko ponovljiv ...). Tako smo za poskusno tiskanje izbrali material PLA (polilaktična kislina), za finalni tisk pa njegovo različico – PLA strong.



## 5.3 VRSTE IN DELOVANJE 3D-TISKALNIKA

Tiskalnike za izdelavo 3-dimenzionalnih izdelkov poznamo v različnih verzijah, ločimo pa jih na tri glavne skupine.

### 5.3.1 SLA 3D-tiskalniki

*»Uporabljajo fotopolimerizacijo za izdelavo trdega modela iz tekočih materialov s pomočjo ultravijoličnih laserskih žarkov. Za vsako plast laserski žarek sledi prečnemu prerezu površine tekočega materiala. Izpostavljenost površine tekočega materiala ultravijoličnemu žarku laserja povzroči trdenje materiala ter spajanje s prejšnjo plastjo. Po vzorcu sledenja se SLA-plošča tiskalnika spušča za debelino enega sloja, kar znaša približno od 0.05 mm do 0.15 mm. Postopek se ponavlja tako dolgo, dokler celoten 3D-model ni izdelan. Stereolitografija zahteva uporabo podporne strukture, ki služi pritrjevanju modela na SLA-ploščo. Tehniko je izumil Charles Hull leta 1986.«*

[1]

### 5.3.2 FDM ali FFM 3D-tiskalniki

*»Uporabljajo plastično nitko ali kovinsko žico, ki je odvita iz tuljave in je namenjena dobavljanju materiala do brizgalne šobe, ki lahko dobavo vklaplja in izklaplja. Šoba je segreta do temperature, ki material topi in se lahko premika horizontalno ter vertikalno s pomočjo številnih krmilnih mehanizmov, ki so vodeni s pomočjo CAM programskega paketa. Model je izdelan na principu iztiskanja tekočega materiala skozi šobe za izdelavo plasti, ki se takoj po iztisu strdijo. FDM-tehnologijo je izumil Scott Crump v poznih 80. letih prejšnjega stoletja. Programski paket, ki je dostavljen s FDM 3D-tiskalnikom, avtomatično izdeluje podporne elemente pri modelu, v kolikor so potrebni. Tiskalnik iztiska dva različna materiala, enega za izdelavo modela, drugega pa za izdelavo podpornih elementov.«*

[1]

### 5.3.3 SLS 3D-tiskalniki

*»Uporabljajo laserje visokih moči za zlivanje delcev praha plastike, kovine, keramike ali stekla v maso, ki ima željeno tridimenzionalno obliko. Laser selektivno zliva material iz prahu s predhodnim skeniranjem plasti, ki ga izdelata 3D modelirni program. Po vsakem prečnem*

*skeniranju se posteljica prahu pomakne navzdol za debelino ene plasti, nato je nova plast prahu uporabljena na površini. Proces se ponavlja tako dolgo, dokler model ni izdelan. Ves nedotaknjen prašni material postane podporni element, kar je tudi velika prednost pred SLA 3D-tiskalniki. Neuporabljen prah se namreč lahko uporabi tudi za naslednje 3D-tiskanje. SLS-tehnologijo je razvil in patentiral dr. Carl Deckard v srednjih 80. letih prejšnjega stoletja.«*

[1]

## **5.4 3D-SLICER**

Kadar izdelujemo izdelek tako, da ga želimo natisniti s 3D-tiskalnikom, moramo uporabiti t. i. CAD/CAM (angl. Computer Aided Design)/(angl. Computer Aided Manufacturing) postopek, pri katerem gre za načrtovanje in konstruiranje s pomočjo računalnika (CAD), katerega kasneje s pomočjo računalniško podprte proizvodnje izdelamo (CAM).

V takšnih procesih izdelovanja potrebujemo nekakšen »vmesni« program, ki poskrbi, da model, ki ga izoblikujemo, pretvori v skupek informacij, ki so razumljive stroju, na katerem želimo stvar izvršiti. To je tako imenovana G-koda.

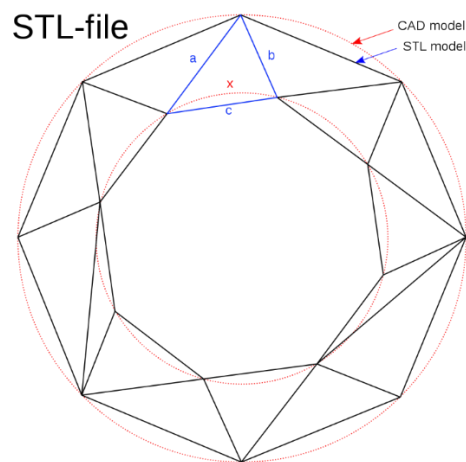
Pri 3D-tisku je ta »vmesni« program 3D-slicer, ki poskrbi za »prevod« modela D v program (G-kodo) kot tudi vizualizacijo modela. Omogoča pa tudi določitev pozicije predmeta na 3D-tiskalnikov in izbor parametrov tiskanja, ki vplivajo na kakovost tiska, trdnost, čas izdelave itd. [7,13]

Pogoj za vnos modela v 3D-slicer je, da izvozimo datoteko v format STL.

STL-oblika datoteke je izvorno namenjena za stereolitografijo CAD, ustvarili pa so jo 3D SYSTEMS. Temelji na opisovanju 3D površinske geometrije, brez kakršnih koli barv ali pa materialov itd. Kratica izvira namreč iz imena *STANDARD TRIANGLE LANGUAGE*, iz česar lahko razberemo, da gre za poenostavljeno triangulirano površino, ki je urejena po desnem pravilu, v 3-osnem kartezijskem koordinatnem sistemu.

Kot smo že omenili, 3D-tiskalnik strjuje ali pa dodaja material sloj za slojem, kar zahteva vrsto zaprtih 2D-kontur, ki se med selitvijo slojev napolnijo s strjenim materialom. Za prikaz in razdelitev 2-dimenzionalnih poligonov poskrbi programska oprema (3D-slicer), debelino slojev in ostale parametre pa lahko, kot že rečeno, določamo v samem programu, pri čemer pa moramo

paziti, če bodo sloji večji, bo obdelava časovno krajša, vendar pa se temu primerno kakovost izdelka poslabša.



*Slika 24: STL-datoteka*

(Vir: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(file\\_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)))

3D-slicer, uporabljen v raziskovalni nalogi, je slicer ULTIMAKER CURA, ki je trenutno najpopularnejši na trgu. Pri zbiru smo upoštevali široko ponudbo funkcij, možnosti, predvsem pa je pretehtal brezplačen prenos.

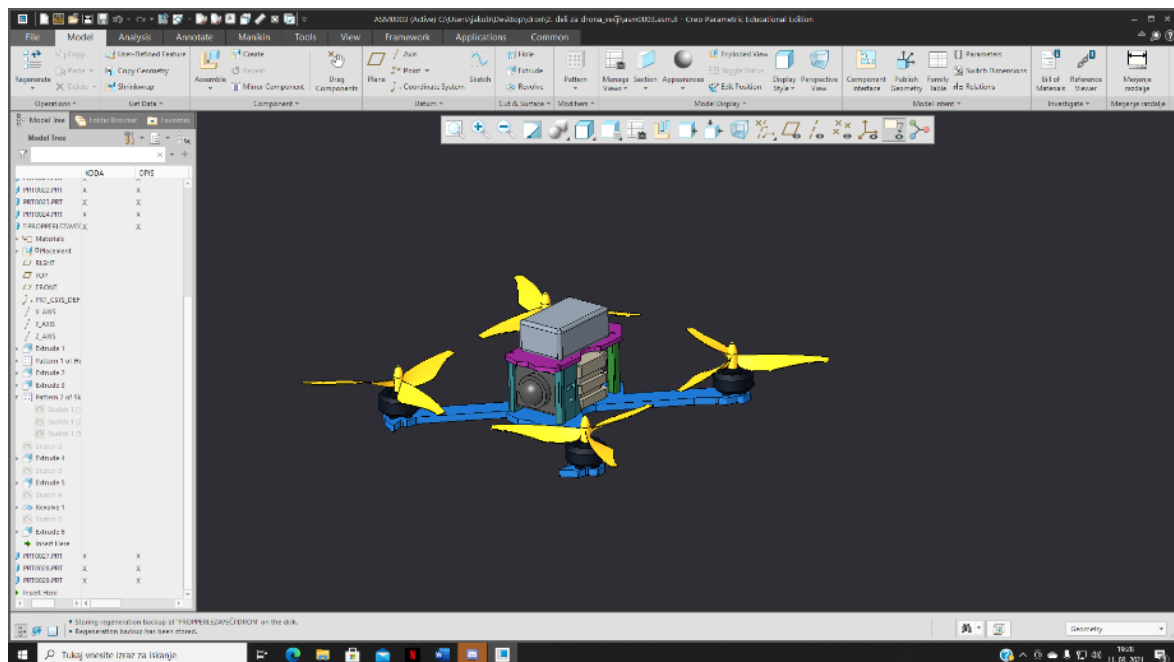
[14]

## **5.5 KONSTRUIRANJE IN NAČRTOVANJE IZDELKA V DIGITALNEM OKOLJU**

Za izdelavo 3D-objekta je potrebno izdelek načrtovati, ga zmodelirati, ustvariti v programu in s tehnologijo CAD/CAM nato izdelati. Programi omogočajo veliko funkcij, ki jih lahko uporabimo pri sami izdelavi.

Pri 3D-programih je vredno poudariti, da so si podobni, a hkrati vsebujejo različne pristope in omogočajo vsak svoje posebnosti. Na splošno 3D-modeliranje delimo na dve osnovni skupini:

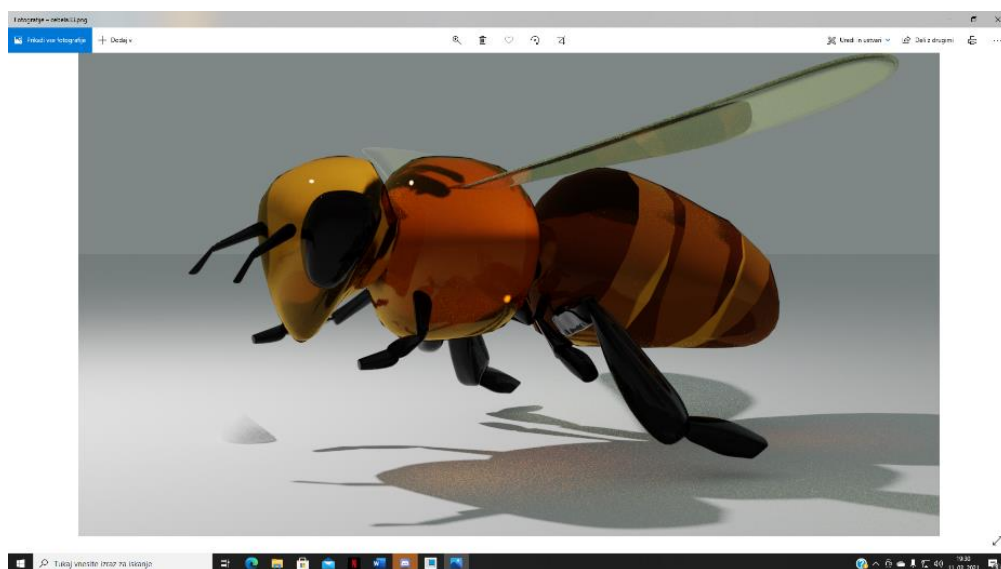
## Parametrično 3D-modeliranje



Slika 25: 3D parametrično modeliranje

(Vir: osebni vir)

## Prosto (freestyle) 3D-modeliranje



Slika 26: 3D točkovno modeliranje

(Vir: osebni vir)

Prav tako je s programi. Nekateri so specialno določeni za izdelavo izdelkov, ki morajo dosegati standarde in tolerance, in kjer ni prav nobena mera naključna, spet drugi pa temeljijo bolj na umetniškem izražanju, pri katerem ni potrebno, da so ravnine, črte, krivine ... matematično opisane.

Priljubljeni programi za 3D-moduliranje so: Solid works, Catia, Blender, Rhino ceros, Creo parametric, Fusion 360 ...

Za raziskovalno nalogo smo ohišja in propelerje dronov zasnovali v parametričnem programu Creo parametric 5, zato bomo v nadaljnjih sestavkih opisali zasnovo projekta.

V raziskovalni nalogi smo komponente prvotno izbrali glede na velikost drona. Odločili smo se, da bodo v velikosti propelerjev 1 col in 3 col, nato pa smo temu primerno izbrali komponente. Sledilo je načrtovanje. Informacije (mere, teža), ki smo jih potrebovali, so na voljo na spletni strani pod poljem specifikacije. Na podlagi mer smo lahko začrtali skico okvirja. Potrebno je bilo upoštevati velikosti propelerjev, da ne bodo poškodovali ohišja zaradi potencialno možne premajhne razdalje, prav tako pa mora biti okvir čim lažji in kompatibilen s komponentami (velikost, pozicija lukenj ...).

Nato smo s skice pričeli izdelovati željen izdelek. Naš je bil zasnovan tako, da smo najprej izrisali spodnji del »SKETCH«, nato pa ga z dodajanjem višine postavili v prostor (funkcija »EKSTRUDE«). Temu so sledili dodajanje nosilcev, merjenje in preračunavanje, tako da smo na koncu imeli zmodeliran željeni 3D-izdelek.

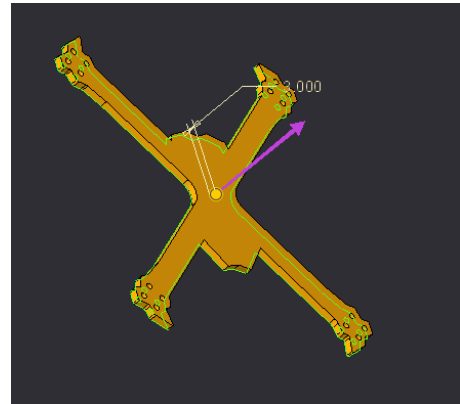
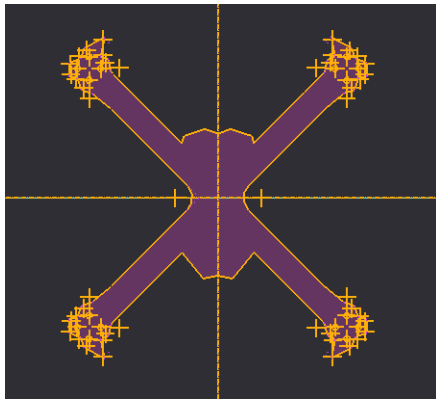
Potrebno je bilo ugotoviti obremenitve izdelka in nato temu primerno določiti debelino. To smo dosegli s poizkušanjem in testiranjem, nato pa z naknadnim dograjevanjem, popravljanjem.

### **Funkcije, ki smo jih uporabili za izdelavo okvirja:**

- FUNKCIJE V 2D-RISANJU
  - Line
  - Circle
  - Arc
  - Rectangle ...

- FUNKCIJE V 3D-MODELIRANJU

- Extrude

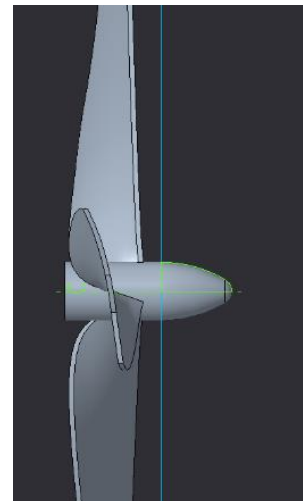
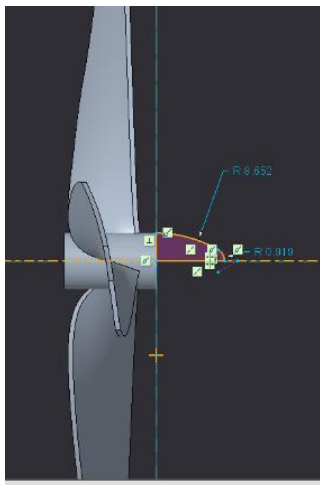


*Slika 27: Sketch za extrude*

(Vir: Osebni vir)

*Slika 28: Extrude*

(Vir: Osebni vir)



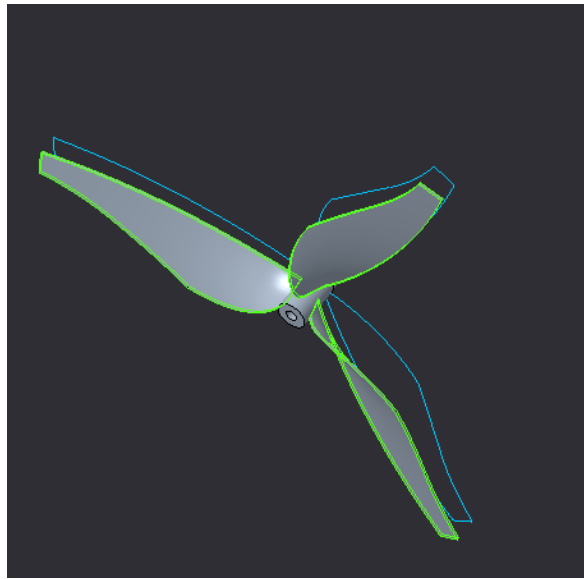
*Slika 29: Sketch za revolve*

(Vir: Osebni vir)

*Slika 30: Revolve*

(Vir: Osebni vir)

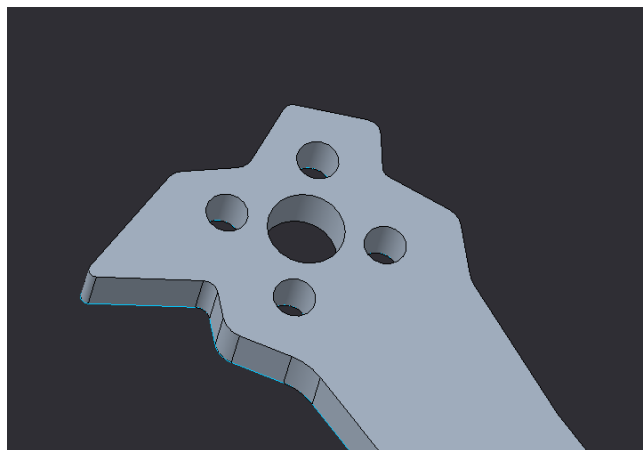
- Helical sweep



*Slika 31: Helical sweep*

(Vir: Osebni vir)

- Hole



*Slika 32: Hole*

(Vir: Osebni vir)

## 6 IZDELAVA DRONOV

V okviru raziskovalne naloge smo sestavili dva drona, za katera smo zasnovali okvirje, jih sestavili ter konfigurirali. Drona imata isto velikost propelerjev, a se razlikujeta po teži, obliki okvirja in delovni napetosti. Dron s pogonom 1-celične LiPo baterije je narejen v stilu t. i. »toothpick« dronov, drugi dron pa je klasična 3-inčna različica »free-style« drona in ga lahko napaja 2- ali 3-celična LiPo baterija. K dodanemu delu smo za primerjavo dodali še cenovno dostopen in dimenzijsko manjši dron, prav tako pa smo dodali enega izmed naših osebnih dronov, ki pa je cenovno na višjem nivoju in je od testiranih največji (5"-propelerji).

### 6.1 TOOTHPICK DRON

#### 6.1.1 IZBOR KOMPONENT

Naš dron bo poganjala 1-celična LiPo baterija, ki smo jo izbrali, saj so droni s tovrstnimi napajalnimi celicami težje sledljivi. Tako smo se odločili za izbor komponent, ki so kompatibilne z 1-celično baterijo.

Za »možgane« drona smo izbrali krmilno ploščico Crazybee F3, na katero je poleg krmilnika že integriran ESC, sprejemnik pa je kompatibilen našemu oddajniku.

Cena: 36,50 €

Za pogonski del smo izbrali motorje proizvajalca Flywoo, in sicer motorje velikosti 1202.5 z 11500 KV. Zanje smo se odločili po daljšem primerjanju različnih motorjev. Izbrani ponujajo najboljše razmerje moči in teže pri tovrstni bateriji.

Cena: 42 €

$$11500 \text{ KV} \times 4.2 \text{ V} = 48.300 \text{ RPM}$$

Za dron smo izbrali 3-krake 3"-propelerje, za kompenzacijo pomanjkanja moči baterije.

Cena: 3,40 € za 4 propelerje

Pri izboru komponent za FPV-del drona smo se odločili za kombinacijo kamere in FPV-videooddajnika v enem, in sicer je to Eachine TX03 NTSC Super Mini. To odločitev smo



sprejeli, saj smo s tem optimizirali težo drona, ki je pomemben dejavnik pri letenju. Poleg tega je oddajna moč (200 mW) zadostna za lete na daljše razdalje.

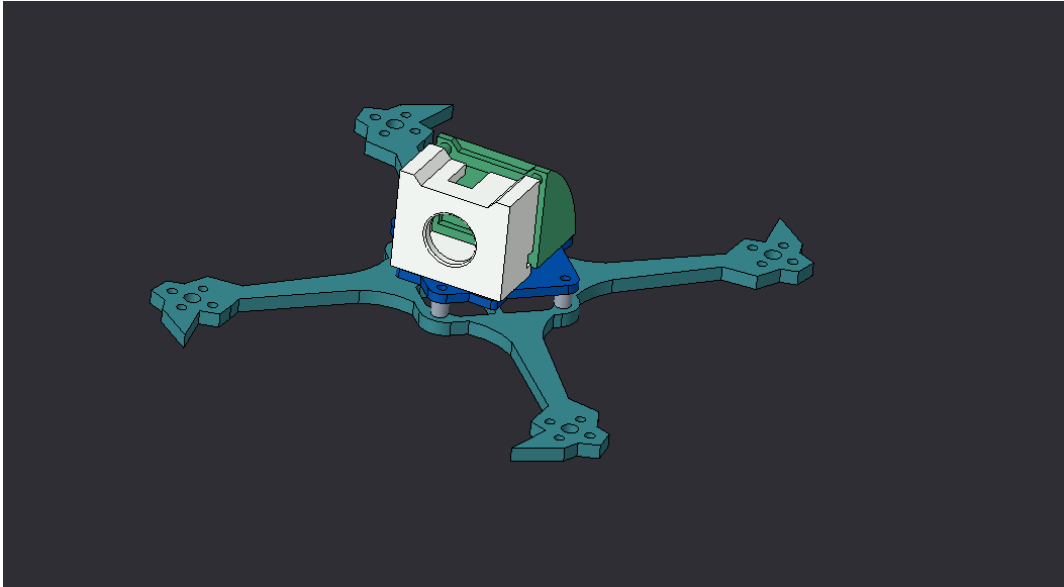
Cena: 15,60 €

### ***6.1.2 NAČRTOVANJE IN IZDELAVA DELOV***

Sklenili smo, da bo omenjeni dron narejen v stilu toothpick, zato je ideja načrtovanega okvirja izhajala iz tovrstnih oblik. Za začetek smo v programu Creo parametric 5 oblikovali glavni nosilni del, pri čemer smo pazili, da so kraki zadostno oddaljeni, luknje pravilno dimenzionirane ter pozicionirane in da je dovolj prostora za priklop motorjev in mikro USB-priključka za konfiguracijo. Nad nosilni del smo dodali ploščo, namenjeno zaščiti kontrolerja in tudi nosilne plošče kamere. Pomembno je bilo, da je vse čim bolj optimizirano, hkrati pa dovolj kompaktno in kompatibilno s kontrolerjem. Dodali smo še nosilec za kamero, ki nudi zaščito in locira pozicijo kamere. Vse sestavne dele smo nato sestavili v načinu Assembly, ki ga ponuja program, da smo si lažje predstavljali končni izdelek. Datoteke smo nato izvozili v format STL in jih prenesli v 3D-slicer Ultimaker Cura, določili parametre tiskanja in vse natisnili.

### ***6.1.3 SESTAVA***

Elektronske komponente smo nato privijačila na nosilne dele, spajkali ustrezen napajalni priključek na ploščo in povezala motorje ter kamero.



*Slika 33: Toothpick dron 3D model*

(Vir: osebni vir)



*Slika 34: Toothpick dron*

(Vir: osebni vir)

## 6.2 KLASIČEN 3-COLSKI DRON

### 6.2.1 IZBOR KOMPONENT

Zaradi željene komparacije dronov smo za razliko od prvega slednjemu določili delovanje na 2- in tudi na 3-celično baterijo, nato pa pod tema pogojev izbrali komponente.

Centralno enoto sestavlja t. i. »stack«, proizvajalca Geprc, ki je skupek krmilnika leta (F4), ESC-ja (12 A) in VTX-a (moč do 200 mW). Izbrali smo ga zaradi njegovega majhnega dimenzijskega formata.

Cena: 41,10 €

Drona poganjajo motorji proizvajalca Racestar racing edition 1103, 10000 KV, ki so najbolj optimalna izbira med ceno in kakovostjo.

Cena: 28 €

$$10000 \text{ KV} \times 8.4 \text{ V}(2\text{S}) = 84000 \text{ RPM}$$

$$10000 \text{ KV} \times 12.6 \text{ V}(3\text{S}) = 126000 \text{ RPM}$$

Pri tem dronu smo imeli lažjo nalogo pri izbiri propelerjev zaradi večjih moči baterije. Izbrala sva 3-krake 3" in 2-krake 3", ki smo jih kasneje primerjali.

Cena: 3,10 € 3-kraki; 3 € 2-kraki

Za FPV-kamer smo izbrali kamero FOXEER razer mini. Gre za kakovostno kamero po sprejemljivi ceni.

Cena: 14,6 €

Zadnji del pa je bil še kompatibilen sprejemnik, in sicer smo se odločili za FS A8S sprejemnik.

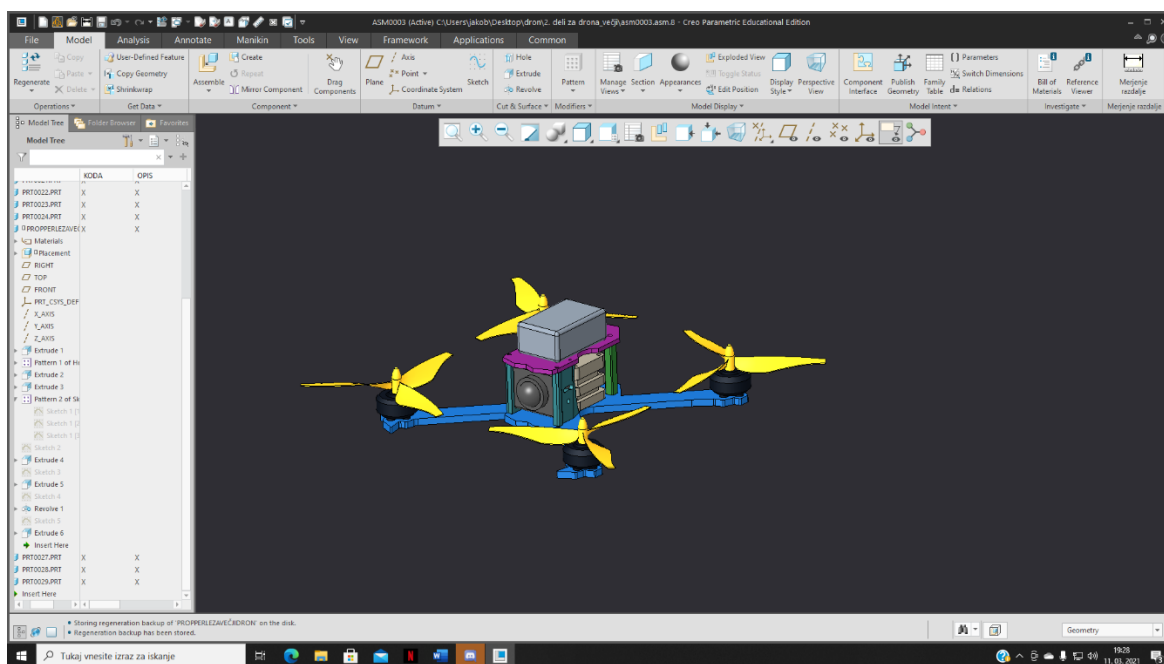
Cena: 9 €

## 6.2.2 NAČRTOVANJE IN IZDELAVA DELOV

Tudi okvir je bil oblikovan v programu Creo parametric 5 v stilu klasičnega freestyle drona. Kot pri prejšnjem je sledilo načrtovanje glede komponent ob upoštevanju, da bo teža čim manjša, a vendar se statična trdnost veliko ne spreminja. Osnovnemu ogrodju smo dodali nosilca kamere in pokrov, ki služi za zaščito, kot tudi predstavlja nosilni element napajalne enote. Po končanem načrtovanju smo dele prav tako sestavili v načinu Assembly, preizkusili, če so kompatibilni, nato pa jih natisnili enako kot prejšnji dron.

## 6.2.3 SESTAVA

Sledila je sestava delov. Najprej smo motorje spajkali na kontrolno ploščo, nato pa vse privijačila na okvir. Sledila je še vezava kamere na VTX in dodajanje priključka za ustrezno napajanje.



Slika 35: 3"-dron 3D model

(Vir: osebni vir)



*Slika 36: 3"-dron*

(Vir: osebni vir)

## 7 KONFIGURATOR BETAFLIGHT IN BLHELI

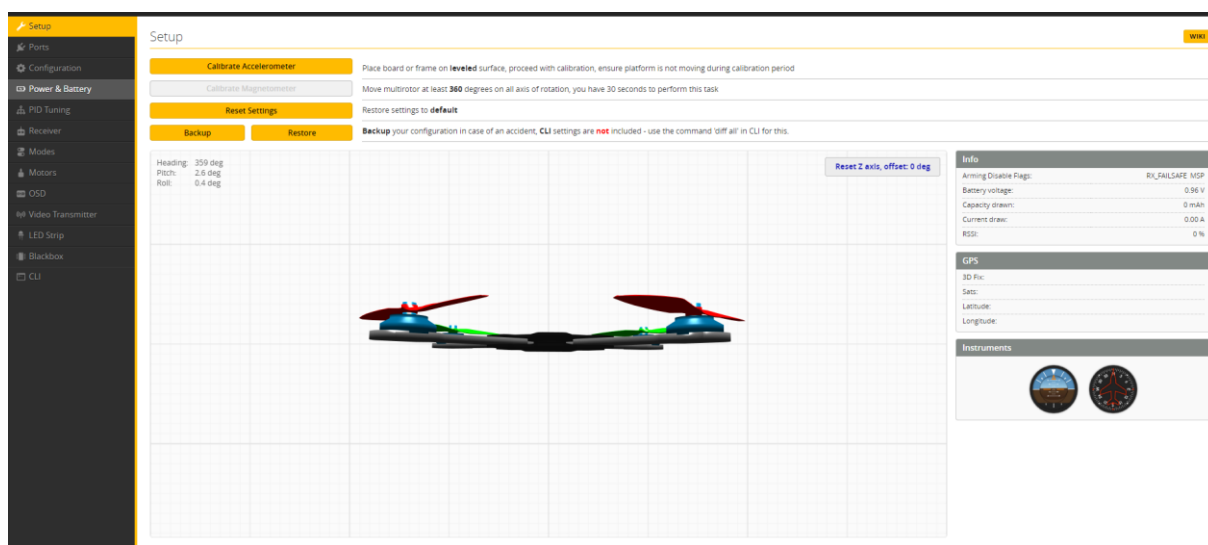
### 7.1 BETAFLIGHT

Betaflight konfigurator nam omogoča spreminjanje programske opreme krmilnika leta, ki mora biti kompatibilen. Uporablja se za upravljanje dronov in letal; je najpogosteje uporabljen, zato je večina krmilnikom opremljena prav z njim. Prav tako je program brezplačen. V njem lahko nastavljamo vse vrste nastavitvev, a za nas so bile pomembne le tiste, ki jih je bilo potrebno konfigurirati, da je dron sploh lahko letel.

### 7.2 KONFIGURACIJA NAŠIH DRONOV

#### 7.2.1 SETUP

Postopek konfiguracije začnemo s kalibracijo merilnika pospeška. S tem mu določimo uravnovešeno točko, v kateri je dron na mestu. Ta je najpomembnejša v level modu. Skalibriramo ga tako, da ga damo na kolikor se da ravno površino. Končne popravke lahko opravimo z daljincem.



Slika 37: Setup

(Vir: osebni vir)

#### 7.2.2 PRIKLJUČKI (PORTS)

Določimo, kateri priključki krmilnika leta so v uporabi in kaj je njihova naloga ter kateri element je nanj priključen.

Identifier	Configuration/MSP	Serial Rx	Telemetry Output	Sensor Input	Peripherals
USB VCP	<input checked="" type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO
UART1	<input type="checkbox"/> 115200	<input checked="" type="checkbox"/>	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO
UART3	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO	VTX (TBS Sm)   AUTO
UART6	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO	Disabled   AUTO

Slika 38: Priključki

(Vir: osebni vir)

Na sliki lahko vidimo, da ima UART1 (oznaka za prvi priključek) vklopljen Serial R. Z vklopom te nastavitve določimo, da je nanj priključen sprejemnik daljinskega signala. Na UART3 pa imamo priključen VTX, zato je tudi nastavljen na pravilno konfiguracijo za ta VTX.

### 7.2.3 KONFIGURACIJA (CONFIGURATION)

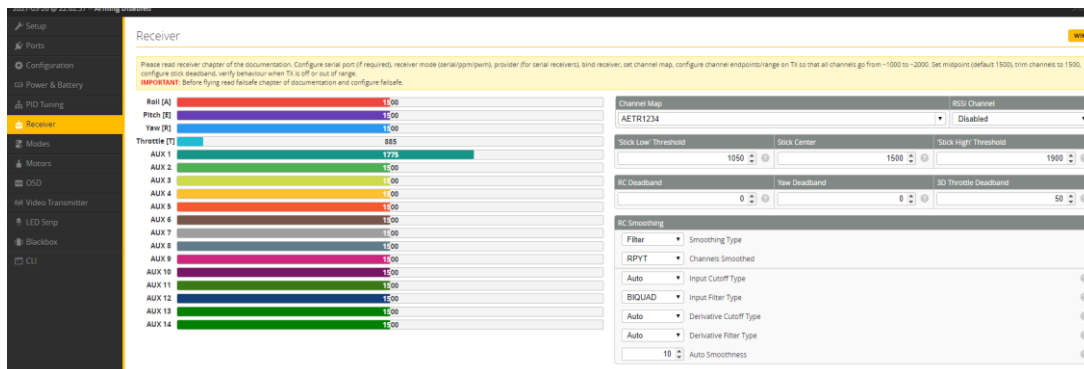
Nastavljamo vse vrste nastavitev, kot so protokol ESC-jev, protokol za sprejemnik, GPS, prav tako pa lahko določamo, katere dodatne funkcije so na dronu, npr. LED-luči, sonar in nekateri filtri.

Slika 39: Konfiguracija

(Vir: osebni vir)

### 7.2.4 DALJINEC + SPREJEMNIK (RECEIVER)

Nastavimo delovanje kanalov daljinca. Prav tako pa lahko testiramo, če deluje korektno glede na premike, ki jih opravimo na daljincu, s pomočjo prikazovalnika, ki prikaže vrednosti vsakega kanala posebej (leva stran slike).

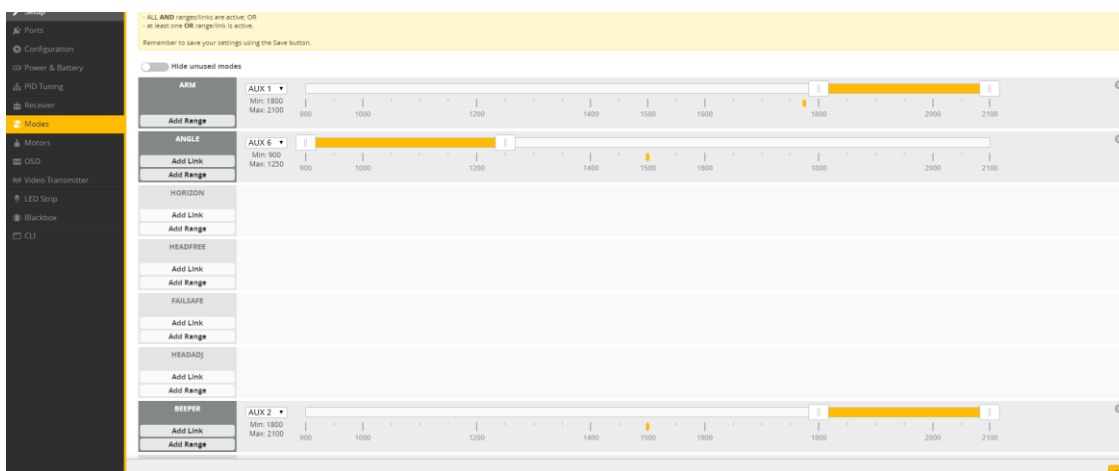


Slika 40: Sprejemnik

(Vir: osebni vir)

### 7.2.5 FUNKCIJE (MODES)

Nam najpomembnejše funkcije so ARM, ki aktivirajo samega drona. Zelo priročno je sploh za začetnike, da lahko menjajo med level in acro modom v primeru, ko se ne morejo rešiti. Prav tako pa smo nastavili BEEPER, ki ga lahko aktiviramo takrat, ko ne vemo, kam je dron strmoglavil. Vse omenjene funkcije se aktivirajo s stikali na daljincu.



Slika 41: Funkcije

(Vir: osebni vir)

### 7.2.6 MOTORJI (MOTORS)

S pomočjo tega menija lahko aktiviramo posamične motorje in testiramo njihovo smer vrtenja. V primeru, da se motorji vrtijo v napačno smer, poznamo dva načina, da smer obrnemo: eden je menjava žic motorja s ponovnim spajkanjem, drugi način, ki smo ga uporabili mi, pa je BIHeli konfigurator za ESC-je.



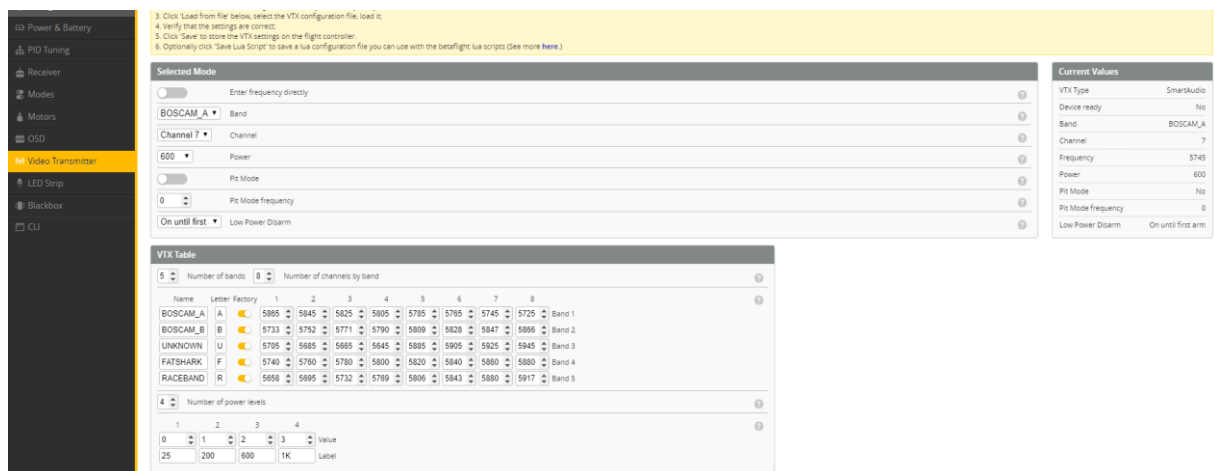


Slika 42: Motorji

(Vir: osebni vir)

## 7.2.7 VIDEOODDAJNIK (VIDEOTRANSMITTER)

Za videooddajnik moramo nastaviti VTX-tabelo frekvenc, nato pa nastavimo željen signalni pas, kanal signala in moč oddajnika.

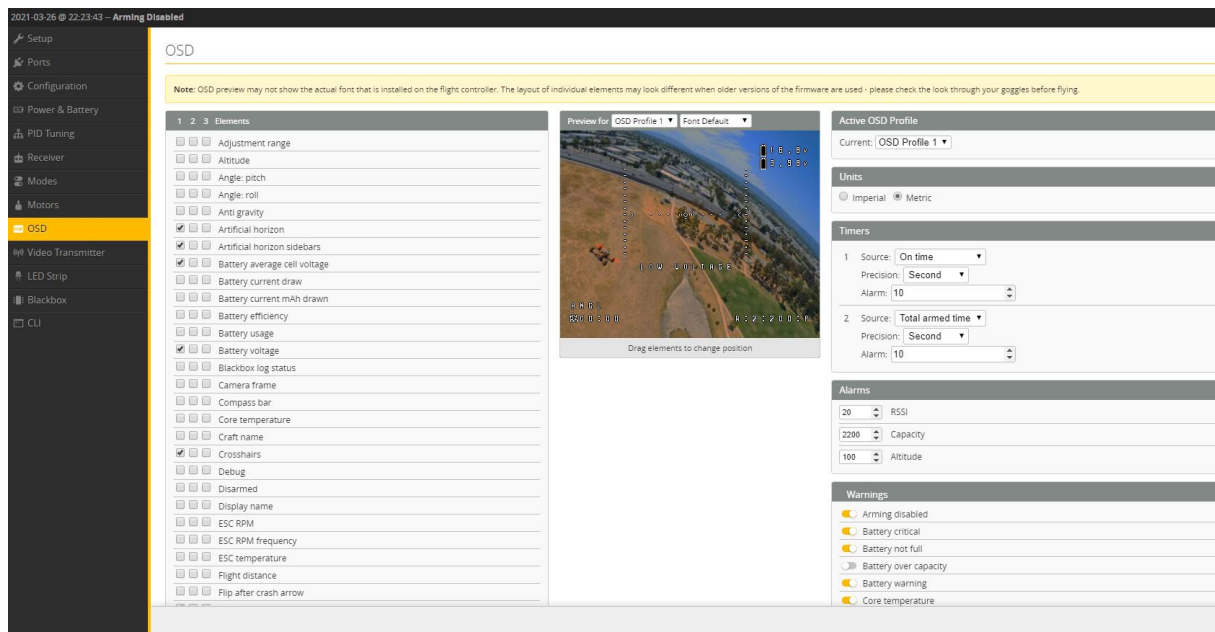


Slika 43: Videotransmitter

(Vir: osebni vir)

## 7.2.8 OSD

Za OSD lahko nastavimo, katere elemente nam prikazuje in kje. V našem primeru smo nastavili središčno oznako, izpisek napetosti celotne baterije in posameznih celic, opozorilo za nizko napetost baterije in prikazovanje, v katerem načinu letenja smo, prav tako smo nastavili VTX.

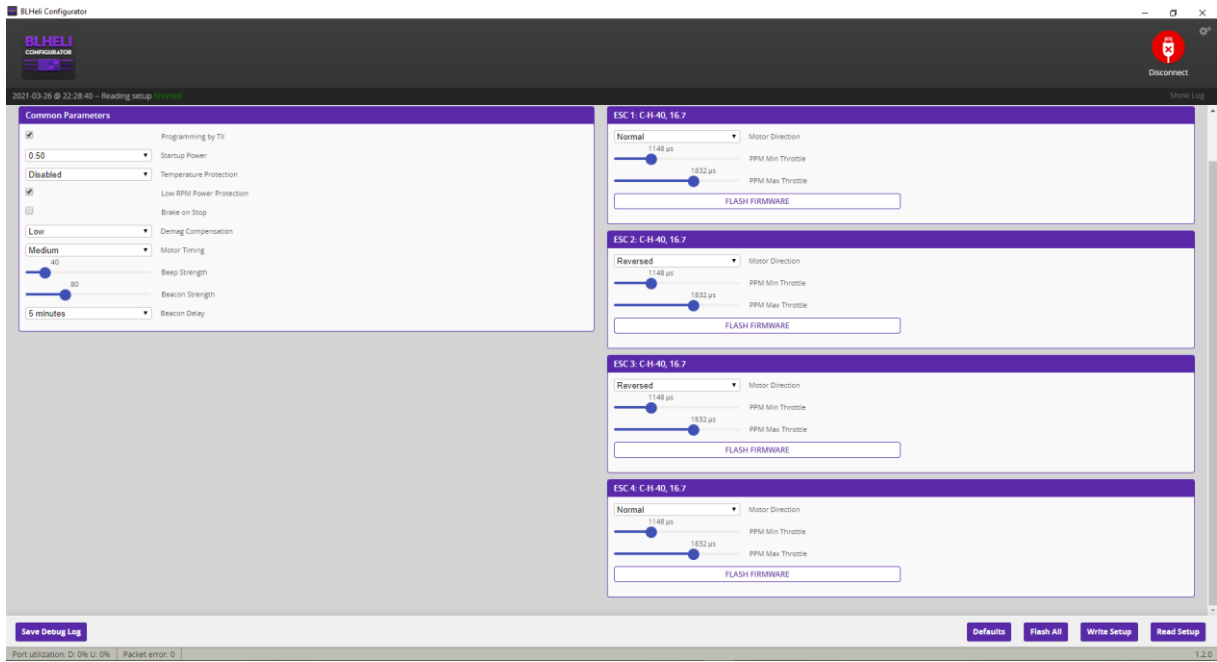


*Slika 44: OSD*

(Vir: osebni vir)

## 7.3 BLHELII

BLHeli je trenutno najbolj priljubljena programska oprema za ESC-je, ki se uporablja na dronih. S pomočjo tega programa lahko spreminjamo smeri vrtenja motorjev in mnogo drugih nastavitev ESC-jev. V spodnjem primeru sta se v napačno smer vrtela motorja 2 in 3, mi pa smo jima obrnili smer rotacije.



*Slika 45: BLHeli*

(Vir: osebni vir)

## 8 OSTALE KOMPONENTE IN PRIPOMOČKI

### 8.1 DALJINSKI UPRAVLJALNIK

Za daljinski upravljalnik smo izbrali Flysky i6X, saj je bil cenovno ugoden, hkrati pa še vedno ponuja veliko funkcij in ima kar 10 kanalov, kar nam dopušča dodajanje več ukazov na stikala.

Cena: 35 €



*Slika 46: Daljinec*

(Vir: <https://www.geekbuying.com/item/Flysky-FS-i6X-2-4GHz-10CH-AFHDS-2A-RC-Transmitter-373254.html>)

### 8.2 FPV-OČALA

Izbrali smo EACHINE ev800d FPV-očala, saj imajo funkcijo diversity za sprejemanje videesignala, prav tako pa se prilegajo na več različno velikih obrazov. V notranjosti imajo en velik ekran v primerjavi z dražjimi, profesionalnimi, ki imajo dva manjša ekrana le v območju oči. Prav tako je nosilni del za na glavo snemljiv, lahko pa uporabljamo le ekran, kar omogoča gledanje leta več ljudem hkrati.

Cena: 65 €



*Slika 47: FPV-očala*

(Vir: <https://dronenodes.com/eachine-ev800d-review-ground-station-goggles/>)

### 8.3 UPORABLJENI POLNILCI

Ker je polnjenje baterij lahko zelo nevarno, uporabljamo namenske polnilce za polnjenje LiPo baterij, in sicer dva različna:

- iMAX B6

Cena: 26 €



*Slika 48: iMAX*

(Vir: <https://www.pololu.com/product/2588>)

- ISDT Q6 NANO

Cena: 24 € polnilec + 25 € napajalnik



*Slika 49: ISDT Q6*

(Vir: <https://www.lipo.si/izdelek/G-IQ6NANO/isdt-q6-nano>)

## 9 SPECIFIKACIJE TESTIRANIH DRONOV

V preglednici, ki sledi, so vpisani vsi podatki testiranih dronov za primerjavo.

*Tabela 5: Specifikacije dronov*

	Najmanjši dron	Toothpick 3"	Freestyle 3"	Freestyle 5"
Cena v €	13	97,5	98,8	183
Velikost motorjev	Brushed, 6 mm	1202.5	1103	2207
Rotorbase v mm	65	120	140	240
Max. tok ESC-ja v A	/	6	12	40
Moč VTX-a v mW	/	20	200	1000
Lipo celice	1S	1S	2S, 3S	4S, 6S
Teža v g	19	79	2S – 103 3S – 117	600

### 9.1 POSTOPEK MERJENJA DVIŽNE SILE

Pri raziskavi in ugotavljanju zmogljivosti drona nas je najbolj zanimal potisk, in sicer koliko lahko dron dvigne poleg svoje lastne teže.

Oblikovati je bilo potrebno napravo za merjenje sil. Uporabili smo tehtnico, ki je imela možnost merjenja v negativno smer, kar predstavlja v našem primeru smer vzleta (z+). Nato smo oblikovali preprost nosilec, ki dronom nudi stik s podlago tehtnice in pa ustrezno distanco, ki omogoča zadosten pretok zraka, prav tako je natisnjen s 3D-tiskalnikom. Nosilec smo trdno pritrdili na plošči tehtnice in drone s polno močjo dvignili.



*Slika 50: Testiranje*

(Vir: Osebni vir)

## 9.2 REZULTATI

### 9.2.1 DVIŽNA MASA

- **Najmanjši dron:** 4 g poleg lastne teže
- **Toothpick 3":** 157 g => 1.54 N
- **Freestyle 3":** 199 g (2 x propeler, 2 s) => 1.95 N, 2w 86 g (3 x propeler, 2 s) => 2.80 N, 30 3g (2 x propeler, 3 s) => 2.97 N, 381 g (3 x propeler, 3 s) => 3.73 N
- **Freestyle 5":** 5000 g + (limit tehnice) 49 050 N

### 9.2.3 ČAS LETENJA

- **Najmanjši dron:** 45 s
- **Toothpick 3":** 1 min 30 s
- **Freestyle 3":** 1 min 45 s
- **Freestyle 5":** do 5 min

### 9.2.4 ZANIMIVOSTI

- 5-colski dron je dvignil v prvem poskusu merjenja večjo silo, kot dopušča maksimalna negativna skala tehtnice, zato smo merjenje z drugačnim principom ponovili z obešalno tehtnico.



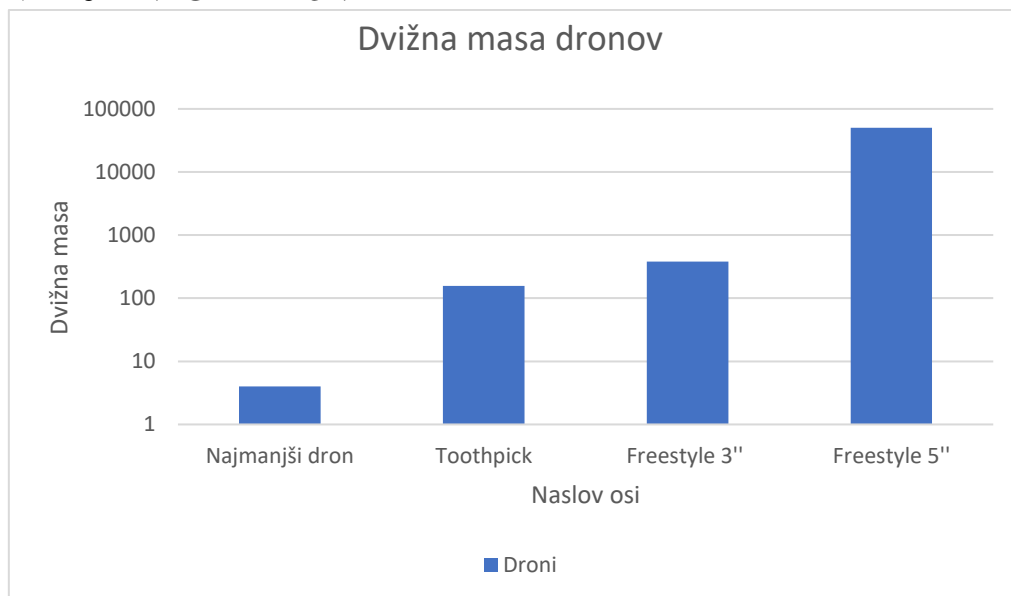


*Slika 51: Neuspešno testiranje*

(Vir: Osebni vir)

- Pri merjenju smo prišli do nenavadnih rezultatov. Najmanjši kupljen dron je namreč pokazal silo pri vzdigu  $-4$  g, nato pa  $+1$  g, kar nam ni bilo logično. Po tehtnem premisleku smo ugotovili, da potisnjeni zrak ovira tehtnico v nasprotni smeri dviga, zato je rezultat znatno manjši. To se zgodi trenutek po maksimalnem zagonu, zato smo merjene vrednosti vzeli iz časovne linije pred prihodom zračne mase na ploščo tehtnice, da bi bila merska napaka čim manjša.

### 9.2.5 PRIMERJALNI GRAFIKON



*Graf 1: Dvižne masa dronov*

Razmerje med težo in dvižno maso nam pove, kolikokrat je dvižna masa ob polni moči večja od mase drona. Potemtakem je masa drona deljena z dvižno maso enaka razmerju, ki v naših primerih dokaže, da se kljub velikim razlikam dvižnih sil razmerja med seboj manj razlikujejo.

Toothpick

79 g : 157 g

1 : 2

Freestyle 3" (3S)

117 g : 381 g

1 : 3.3

Freestyle 5"

600 g : 6400 g

1 : 10.7

Ta številka je precej večja, a tovrstni droni so opremljeni s kamero, ki tehta do 200 g.

800 g : 6400 g

1 : 8

# 10 UGOTOVITVE

## 10.1 POTRJEVANJE HIPOTEZ

### *1. FPV-drona lahko sestavimo z vsoto denarja, ki ne presega 50 €.*

Po raziskovanju po spletu smo ugotovili, da hipoteza drži in da je možno sestaviti drona, katerega cenovna omejitev doseže 50 €, vendar pa so v ceno vključeni le deli drona brez napajalnih celic, oddajnika in FPV-očal. Kljub tem možnostim, sva zaradi slabih karakteristik takšnega drona, v raziskovalni nalogi cenovni limit postavila nekoliko višje.

### *2. Dvižna sila sestavljenega mini drona je večja od 50 % lastne teže.*

Iz grafa 1 je razvidno, da znaša najnižja izmerjena dvižna masa freestyle drona 199 g, njegova teža pa je pri 2S bateriji 103 g, zato lahko hipotezo za drona potrdimo. Procentualni znesek znaša torej 93 %. Največji procentualno izražen preseg dvižne mase od lastne teže je 225 %. Z večanjem moči baterije se procentualno razmerje večja. Pri toothpicku je hipoteza prav tako potrjena, saj njegova teža znaša 79 g, dvižna masa pa je enaka 157 g. Procentualni znesek je enak 98 %.

### *3. Najdražji dron bo imel največjo dvižno silo in bo imel najdaljši čas letenja.*

Hipoteza drži, dražji dron ima daljši čas letenja, na kar vpliva več dejavnikov. Pomembno je razmerje med hranjeno energijo in porabo glede na čas, ki pa je odvisno predvsem od načina vožnje, teže, komponent in vremenskih pogojev (veter).

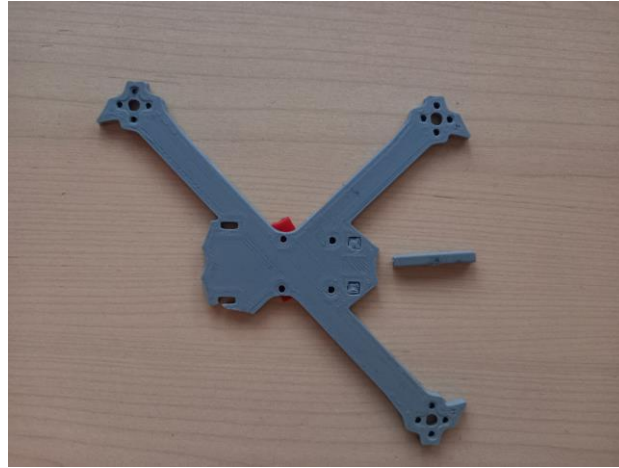
### *4. Sila večjega Freestyla 3" se ne bo razlikovala od moči manjšega Toothpick drona za več kot 20 %, prav tako se časovna zmogljivost ne bo razlikovala za 20 %.*

Dvižna sila drona Toothpick znaša 1.54 N, sila Freestyle 3" drona pa 1.95 N – pri najnižji izmerjeni dvižni sili (2 x propelerji, 2S baterija), kar pomeni, da je dvižna sila Freestyle 3" večja za 21.1 %. Pri izmerjeni najvišji sili se le te razlikujeta za 59 %, kar pa je daleč od ocenjene razlike. Glede moči lahko hipotezo ovržemo, saj vse izmerjene sile Freestyle 3" drona presegajo Toothpickove.

Čas letenja Toothpicka znaša 1 min in 30 s, čas letenja Freestyle 3" drona pa 1 min in 45 s. Razlika torej znaša 15 %, zato hipoteza o časovnih sposobnostih drži.

### 5. 3D natisnjeni okvirji ne bodo prenesli trka oz. padca drona.

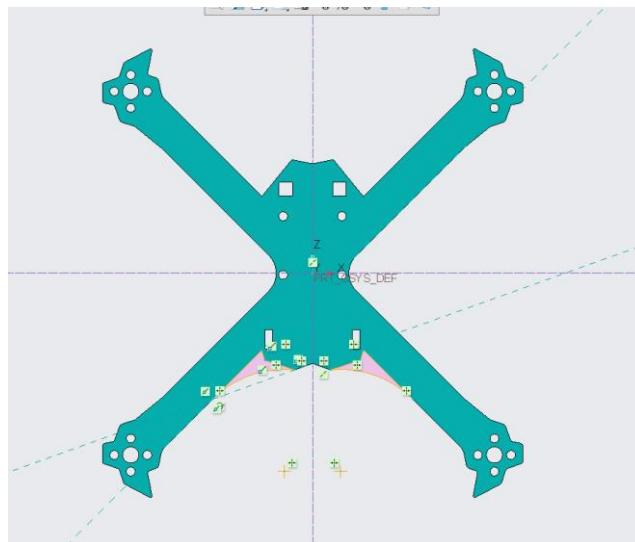
Po različnih nesrečah smo prišli do ugotovitve, da okvir prenese lažje padce ali pristanke na mehkejši podlagi, ob padcu pri višji hitrosti pa popusti.



*Slika 52: Zlomljen okvir*

(Vir: Osebni vir)

Zlomljeni so bili 3 okvirji, prelom pa se je vedno zgodil pri sprednjih krakih (slika 52), za kar so bile krive luknje, ki so bile pozicionirane preblizu roba. Izveden popravek je povečal vzdržljivost.



*Slika 53: Popravek*

(Vir: Osebni vir)

## 6. Z manjšanjem drona se bo povečeval vpliv dejavnikov zunanjih sil.

Hipotezo lahko potrdimo, saj je pri testiranju in letenju dronov prišlo do motenj vodenja, ki jih je povzročil veter, te pa so bile jasno opaznejše pri manjših dronih, iz česar lahko sklepamo, da premer in teža pozitivno vplivata na stabilnost.

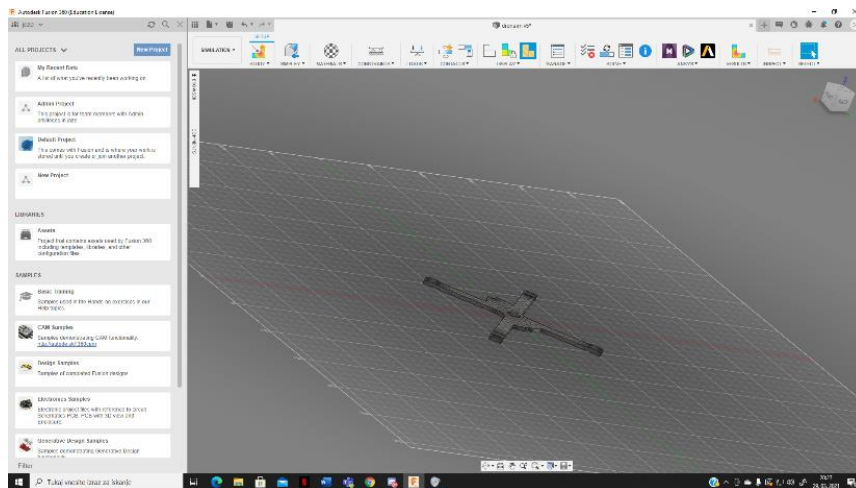
Kljub dimenzijskim podobnostim narejenih dronov, je dron, ki ga poganja 1s lipo baterija, je manj stabilen od 3s drona, saj mu večja moč dopušča večjo odzivnost in možnost popravkov.

## 7. 3D natisnjen okvir ne bo oteževal letanja zaradi lastnosti materialov.

Pri vožnji so se začeli pojavljati tresljaji ob pospeških, vidni s FPV-očali, zaradi česar smo posumili, da gre za upogib krakov pri vzletu. Da bi stvar preverili, smo izvedli simulacijo s poenostavljenim modelom krakov, obremenjenim z enako dvizžno silo, kot je izmerjena. Simulacija je bila izvedena v personalni verziji programa Fusion 360, v načinu simulation.

### POSTOPEK IZVAJANJA SIMULACIJE:

#### 1. Določitev točkovne mreže osnovnemu modelu

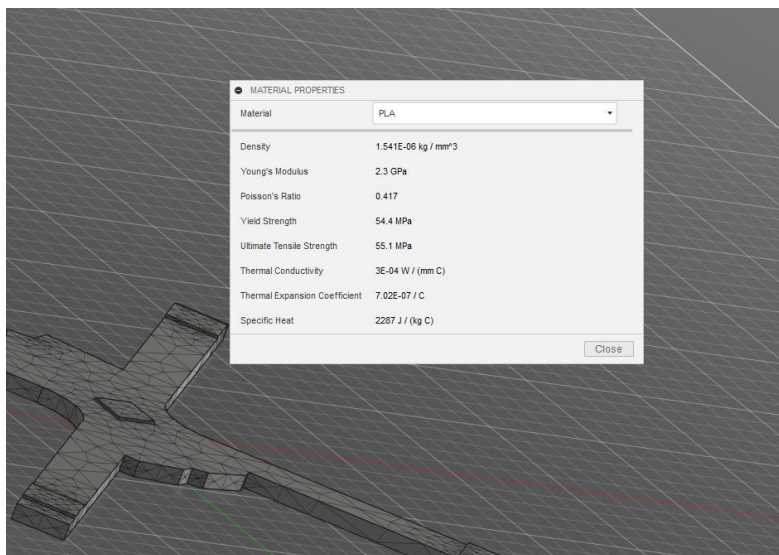


Slika 54: Mesh managing

(Vir: osebni vir)

#### 2. Izdelovanje novega materiala z določitvijo mehanskih lastnosti

- Youngsov modul odčitan iz vira: <https://www.sd3d.com/.well-known/captcha/>
- Ostali podatki povzeti po materialu PET-plastic

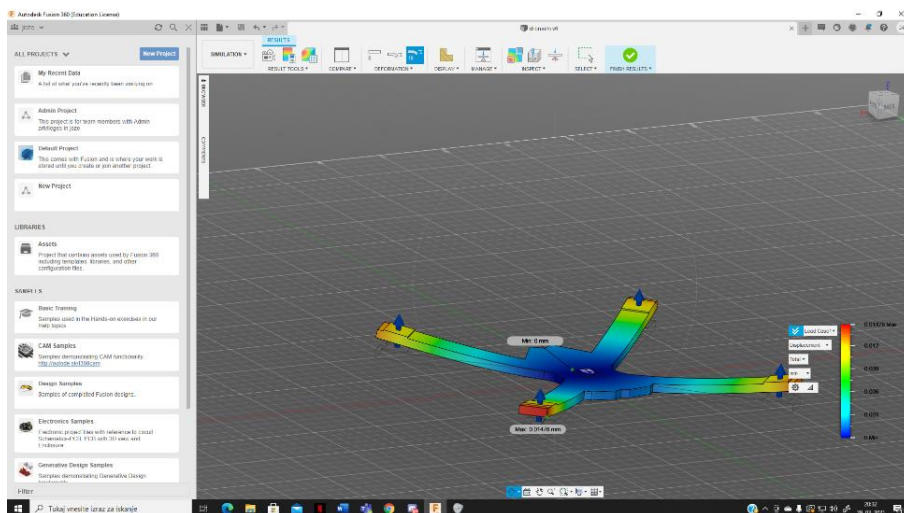


Slika 55: Material properties

(Vir: osebni vir)

### 3. Točkovna porazdelitev dvižnih sil, njenih velikosti in smeri ter določitev fiksne osnove

- Dvižna sila = 381 g, sila enega motorja = 95,25 g, kar je = 0.93 N.



Slika 56: Izračun simulacije

(Vir: osebni vir)

Iz danih rezultatov je mogoče odčitati, da se lega krakov odmakne od osnovne ravninske plošče za le 0,014 mm, kar je izjemno malo, zato smo dvom o ukrivitvah zavrgli. Razlog za tresljaje bi lahko bile morebitne minimalne napake pri spajkanju, kar povzroči majhno razliko med

hitrostmi vrtenja propelerjev, kar pa je potencialni razlog za rahlo nihanje. Možnost je tudi posledica nepopolne konfiguracije, to pa lahko popravimo, tako da raven konfiguriranja (BetaFlight).

## **10.2 SE SESTAVA MINI DRONA IZPLAČA?**

Po celotnem raziskovanju smo prišli do odločitve, da je razlika cene med izdelanima dronom in dronom za primerjavo (5") od 80 € do 50 €, vendar pa je presežek v moči večji za kar do 5-krat, čas letenja pa daljši okoli 3,5-krat. Poleg tega pa karbonski okvir opravlja svoje delo tako pri trkih kot izničevanju tresljajev zaradi upogiba. Najina ugotovitev je, da se bolj izplača dati malo več denarja za velik skok v kvaliteti in trpežnosti, a seveda je pa možnost 3D printanega okvirja vedno na voljo.

# 11 ZAKONODAJA

Tudi pri letenju z brezpilotnimi zračnimi plovili obstajajo pravila, ki jih je potrebno upoštevati. V širšem smislu gre za varovanje zasebnosti in na splošno zagotavljanje maksimalne možne varnosti.

Evropske direktive o zrakoplovih se skozi leta precej spreminjajo, razlog pa je tehnologija, ki omogoča številne možnosti za poseg (četudi nenameren) v zasebno življenje, s čimer kršimo osnovne človekove pravice. Velik dejavnik je tudi priljubljenost dronov, saj se je v zadnjem desetletju njihova cena znižala, kar je posledično pripeljalo do razcveta brezpilotnega letalstva.

V osnovi lahko v pravnem smislu drone delimo na 3 glavne kategorije. Primerjalno lahko le te enačimo z vozili za prevoz po kopnem. Torej, tako kot imamo različne registracije in voziška dovoljenja pri npr. avtomobilih in motorjih, lahko drone delimo v 3 večje skupine. In sicer se delijo na drone:

- odprte kategorije
- posebne kategorije
- certificirane kategorije

## 11.1 KRATEK POVZETEK KATEGORIJ

- V odprto kategorijo sodijo brezpilotni zrakoplovi, ki tehtajo od 250 g do 25 kg in letijo v vidni liniji do višine 120 m ter ne prevažajo tovora ali ljudi. Omenjena kategorija se deli še v 3 podkategorije, katerim se bomo posvetili v nadaljevanju.
- V posebni kategoriji najdemo drone, ki ne izpolnjujejo katere od zahtev odprte kategorije, npr. letenje z brezpilotnim zrakoplovom višje od 120 m nad zemeljskim površjem ali izven vidnega polja ali nad zborom ljudi idr. V tem primeru je operater dolžan poskrbeti za potrebna operativna dovoljenja, izdana s strani agencije za civilno letalstvo.
- Tretja, certificirana kategorija zajema drone, ki prevažajo ljudi, nevarne snovi ali pa njihov premer znaša več kot 3 m. V člankih je bilo moč zaslediti, da bodo piloti na daljavo morali pridobiti licenco, operater spričevalo letalskega prevoznika, certifikacija brezpilotnega zrakoplova pa bo izvedena s strani Evropske agencije za letalsko varnost. Dovoljenja bodo torej enačena s plovilom s posadko.



V nadaljevanju se bomo osredotočili na odprto kategorijo in njene podkategorije, saj spadajo naši droni vanje, prav tako pa je lažje dostopna javnosti tako v finančnem kot materialnem smislu.

Odprta kategorija povezuje vse drone, ki tehtajo od 250 g do 25 kg, letijo v vidni liniji do višine 120 m in ne prevažajo tovora ali ljudi. Podrobneje pa se kategorija deli še na 3 podkategorije, te so: A1, A2, A3.

A1 skupina zajema drone do 250 g,

A2 skupina zajema drone do 2 kg,

A3 skupina zajema drone do 25 kg.

Vredno je omeniti, da se podkategorije povezujejo z oznakami CE, podrobnejši opis pa prilagamo k besedilu, vzet s spletne strani Javne agencije za letalstvo RE.

*»CE oznake trenutno vključujejo oznake C0–C6. C0–C4 oznaka se povezuje z določeno podkategorijo A1, A2, A3 v odprti kategoriji. Oznaki C5 in C6 pa se bosta povezovali s standardnimi scenariji v posebni ('specific') kategoriji. Predstavljajo zahteve za opremo določenega tipa zrakoplova (oznaka C), ki se potem lahko uporablja (leti) pod določenimi pogoji (A1–A3) ... Npr. C0 in C1 v A1, C2 v A2 ... Celotna razdelitev, tudi z 'omejeno' odprto kategorijo, je razvidna iz 'POVZETKA ZAHTEV PO UREDBI EU 2019/947 ZA KATEGORIJU "OPEN"« [11]*

V nadaljevanju pa sledijo navedeni pogoji za letenje, ki jih je bilo potrebno preučiti za legalno upravljanje ali ravnanje z droni.

## **11.2 PRAVILA**

- Letenje letalnikov je dovoljeno tam, kjer ni objektov in ljudi, pod pogojem, da je varnostni nivo zadosten. Med samim letenjem mora uporabnik zagotoviti varno razdaljo med letalnikom in ljudmi, živalmi, objekti, vozili, plovili, drugimi zrakoplovi, cestami, železniškimi progami, vodnimi potmi ali daljnovodi in ki ne sme biti manjša od 30 m.
- Minimalna oddaljenost letalnika od skupine ljudi, za kar se šteje več kot 12 ljudi, pa mora biti vsaj 150 m.
- Zrakoplovi splošnega letalstva imajo vedno prednost pred brezpilotnimi zrakoplovi.

### **11.2.1 VIZUALNI VID ZRAKOPLOVA (VISUAL LINE OF SIGHT)**

Oddelek 107.31:

»... (a) z vidom, ki mu ne pomaga nobena naprava, razen korektivnih leč, vodja daljinskega upravljalca, vizualni opazovalec (če se uporablja) in oseba, ki manipulira z nadzorom leta sistema majhnih brezpilotnih zrakoplovov, mora biti sposoben videti brezpilotno letalo skozi ves let in mora:

(1) poznati lokacijo brezpilotnega letala,

(2) določiti položaj, višino in smer leta brezpilotnega letala,

(3) opazovati zračni prostor zaradi drugega zračnega prometa ali nevarnosti in

(4) ugotovi, da brezpilotni zrakoplov ne ogroža življenja ali lastnine drugega.«

[12]

### **11.2.2 LETENJE FPV (FIRST PERSON VIEW)**

- Če upravljalet leti s sistemom FPV, ki ima nameščeno kamero, lahko polete izvaja samo v spremstvu opazovalca, ki ga mora seznaniti z vsemi pomembnimi podrobnostmi letenja, najmanj z višino in načrtovano potjo.
- Opazovalec mora med letenjem vzdrževati neprekinjen vidni stik z letalnikom in upravljalca opozarjati na odstopanja od načrtovanega poleta, mogoče kršitve minimalne razdalje in druge zadeve, pomembne za varno izvajanje poleta. Opazovalec in upravljalet morata ob tem biti na razdalji, ki omogoča nemoteno glasovno sporazumevanje brez tehničnih pripomočkov.

## **11.3 REGISTRACIJA**

»Vsak operator se bo moral registrirati, če:

(1) upravlja UAS z maso 250 g in več ali več kot 80 J prenosa energije na človeka ob trčenju,

(2) upravlja z zrakoplovom (tudi pod 250 g), ki ima senzor, ki lahko zajame osebne podatke (kamera ...),

*(3) upravlja zrakoplov ne glede na težo v posebni kategoriji.*

*Predvideva se spletna registracija. Registracija se mora opraviti v državi, kjer ima fizična oseba prebivališče oz. pravna oseba svoj sedež. Registracija se predvidoma obnavlja na 2,5 let.« [11]*

#### **11.4 IZPIT**

Vsak pilot na daljavo mora opraviti spletni tečaj in preverjanje A1 in A3.

- Spletni tečaj omogoča letenje v kategoriji A1 in A3.
- Veljaven je 5 let.

[3, 5, 6, 9, 10, 16]

## 12 ZAKLJUČEK

Skozi potek izdelave in preučevanja dronov sva prišla do ugotovitve, da drona v današnjih časih ni problematično izdelati sam, zahvaljujoč napredni tehnologiji, ki nam to seveda omogoča.

Iz primerjav sva se naučila, da se funkcije in zmožnosti drona premo sorazmerno stopnjujejo z vloženim kapitalom, vendar pa do sprejemljivih rezultatov lahko pridemo v cenovnih mejah normale.

Po meritvah in simulacijah sva ugotovila, da so okvirji iz karbonskih vlaken veliko boljši kot 3D-stiskani, vendar pa so cenovno dražji. Primerjala sva različne drone različnih velikosti, moči ..., vendar pa trg ponuja nešteto možnosti in obilo variacij, ki so uporabnikom na voljo.

Tehnologija je v porastu in le ta se vsak dan širi. Vsak dan nam je ponujenih ogromno novih možnosti za izpolnitev naših zahtev. Razvitje naprednejših tehnoloških procesov nam olajša številne probleme, vendar pa je in bo vedno obstajal prostor za izboljšave ali nadgradnje.

## VIRI

- [1] *3D tiskalniki* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <http://www.3dtiskalnik.si/3Dtiskalniki.html>
- [2] *3D tiskanje* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/3D-tiskanje>
- [3] *Brezpilotni zrakoplovi in poročanje o dogodkih v civilnem letalstvu* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.caa.si/upload/editor/file/filebc5f88d69eccec6.pdf>
- [4] CHRISTIAN M. MOLICA. (2020). *FPV Flight Dynamics: Mastering Acro Mode on High-Performance Drones*. Pridobljeno iz aplikacije: Apple Books
- [5] *Droni – leteči inšpektor* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: [https://www.zvd.si/media/medialibrary/2017/12/zavod\\_za\\_varstvo\\_pri\\_delu\\_rdv\\_6\\_2016\\_droni\\_leteci\\_inspektorji.pdf](https://www.zvd.si/media/medialibrary/2017/12/zavod_za_varstvo_pri_delu_rdv_6_2016_droni_leteci_inspektorji.pdf)
- [6] FAZLIČ, D. *Nova pravila za tiste, ki bi upravljali z droni v Sloveniji* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.24ur.com/novice/slovenija/nova-pravila-za-tiste-ki-bi-upravljali-z-droni-v-sloveniji.html>
- [7] LOCKER, A. 2021 *Best 3D Printer Slicer Software* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
- [8] *Načini letenja* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.cnydrones.org/flight-modes-angle-horizon-acro-what-do-they-mean/>
- [9] *Regulacije za drone* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?uri=celex%3a32019r0947>
- [10] *Regulacije za drone* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.easa.europa.eu/document-library/regulations/commission-implementing-regulation-eu-2019947>
- [11] *Regulacije za drone* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.caa.si/faq.html>

[12] Rupprecht, J. *Section 107.31 Visual line of sight aircraft operation. (2020)* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://jrupprechtlaw.com/section-107-31-visual-line-sight-aircraft-operation/>

[13] *Simplify 3D* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://www.simplify3d.com/>

[14] *STL-format* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(file\\_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))

[15] VIŠIČ, D. ABERŠEK, B. DOLENC K. *Vizualizacija in 3D-tiskanje v učnem procesu* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=62318&lang=slv>

[16] *Zakon o dronih* (online). (citirano 09. 04. 2021). Dostopno na naslovu: <https://jrupprechtlaw.com/section-107-31-visual-line-sight-aircraft-operation>

