

Šolski center Celje
Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

Aviokopter

Raziskovalna naloga

Področje:
Elektrotehnika,
elektronika ali
robotika

Avtor:
Matija SLAPŠAK, M-4. c

Mentorja:
dr. Matej VEBER, univ. dipl. inž.
mag. Andro GLAMNIK, univ. dipl. inž.
Martin Amon, mag. inž. str.

Celje, april 2024

IZJAVA*

Mentorji Andro Glamnik, Matej Veber in Martin Amon v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotovljamo, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Aviokopter katere avtor je Matija Slapšak:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno naložo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno naložo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, 7.4.2023

žig šole

Podpis mentorjev

Andro Glamnik
Matej Veber
Martin Amon

Podpis odgovorne osebe

*
POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.

POVZETEK

Velikokrat se zgodi nesreča na nedostopnem kraju, zato je posledično prihod reševalcev ali prve pomoči prepozen. Ta problem je možno rešiti z napravo, ki bi lahko hitro prispela na lokacijo nesreče in tam tudi pristala.

VTOL-zrakoplov je naprava, ki je zmožna vzletati in pristajati vertikalno, in tako ne potrebuje pristajalne steze. S to sposobnostjo lahko zrakoplov pristaja hitreje, natančneje in kjer koli.

V raziskovalni nalogi sem sprva izdelal nekaj skic, kako bi avioopter izgledal in kako bi realiziral idejo o VTOL-sposobnosti. Nato sem izdelal prve 3D-modele z uporabo programa OnShape in sproti začel izdelovati prototipe s tehnologijo 3D-tiska. Po nekaj prototipih sem začel izdelovati končni model in vanj sem namestil izbrano elektroniko. To sem nato sprogramiral, tako da je avioopter zmožen vertikalnega vzletanja in pristajanja.

Ključne besede: letalo, dron, VTOL, 3D-tisk, LW-ASA

SUMMARY

Accidents often happen in inaccessible places, and as a result, the arrival of rescuers or emergency services is delayed. This problem could be solved with a device that could quickly arrive at the location of the accident and land there.

A VTOL aircraft is a device capable of taking off and landing vertically and thus does not need a runway. With this capability, the aircraft can land faster, more precisely, and anywhere.

In the research project, I initially made a few sketches of what the avicopter would look like and how to execute the idea of VTOL capability. Then, I created the first 3D models using the OnShape software and started making prototypes with 3D printing technology. After a few prototypes, I started working on the final model and installed the selected electronics. I finally programmed it, so that the copter is capable of vertical take-off and landing.

Key words: plane, drone, VTOL, 3D print, LW-ASA

Kazalo vsebine

1	UVOD	1
1.1	Brezpilotni zrakoplovi v Sloveniji	1
1.2	Iskanje tovrstnih naprav	2
1.3	Hipoteze	3
1.4	Metode raziskovanja	3
2	OD IDEJE DO MODELJA	5
2.1	Koncept 1	5
2.2	Koncept 2	5
2.2.1	Verzija 1	6
2.2.2	Verzija 2	7
2.2.3	Verzija 3	7
3	ELEKTRONIKA	9
3.1	Letalski krmilnik	9
3.2	GPS	10
3.3	Servomotorji	11
3.4	Motorji	12
3.5	Elektronski regulator hitrosti	14
3.6	Baterija	15
4	IZBIRA MATERIALOV	18
4.1	PLA	18
4.2	LW-ASA	18
4.2.1	Tiskanje z LW-ASA-filamentom	21
4.3	Ogljikova vlakna	25
4.3.1	Karbonske palice	25

4.3.2 PA-CF	26
4.4 Primerjava materialov	27
4.5 Teža.....	27
4.6 Test upogibanja.....	27
5 IZDELAVA CAD-MODELA.....	29
5.1 Nosilna konstrukcija	29
5.2 Nosilci elektronike	30
5.3 Ohišje	31
5.3.1 Trup.....	31
5.3.2 Krila	35
5.3.3 Rep.....	39
5.4 Montaža servomotorjev	40
5.4.1 Verzija 1	40
5.4.2 Verzija 2	41
5.4.3 Verzija 3	42
6 IZDELAVA.....	44
6.1 Konstrukcija.....	44
6.2 Ohišje	46
6.3 Vezava elektronike	48
7 KALIBRACIJA LETALSKEGA KRMILNIKA.....	51
8 Stroški materialov	55
9 Analiza hipotez.....	56
10 ZAKLJUČEK.....	57
11 VIRI IN LITERATURA	59
12 PRILOGE.....	61

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer VTOL-zrakoplova	1
Slika 2: Izvedbe VTOL-letal	3
Slika 3: Princip 1	5
Slika 4: Grumman TBM Avenger	6
Slika 5: Princip 2	6
Slika 6: Verzija 2	7
Slika 7: Verzija 3	8
Slika 8: Matek F405 VTOL.....	10
Slika 9: Matek M10Q-5883.....	10
Slika 10: Uporaba MOSFETOV v ESC	14
Slika 11: Temperaturni testi.....	19
Slika 12: Testa pri 205 °C in 210 °C	19
Slika 13: Graf penjenja LW-ASA filimenta.....	20
Slika 14: Primerjava tež ladijic iz PLA in LW-ASA	21
Slika 15: Testa pri 210 °C in 250 °C	21
Slika 16: Primerjava PLA- in LW-ASA-tekstur.....	22
Slika 17: Primerjava tekstur PLA in LW-ASA.....	22
Slika 18: Upognjeni tisk	23
Slika 19: 3D-tisk brez uporabe funkcije raft	24
Slika 20: 3D-tisk z uporabo funkcije raft	24
Slika 21: Rešitev za tiskanje z odprtим 3D-tiskalnikom	25
Slika 22: Obrabljena in nova konica	26
Slika 23: Graf testa upogibanja	28
Slika 24: Testne palice.....	28

Slika 25: Prvi prototip tečajev	29
Slika 26: Nosilna konstrukcija	29
Slika 27: Izdelava trupa.....	32
Slika 28: Primer uporabe funkcije "fill"	33
Slika 29: Izdelava sprednjega zaključka	33
Slika 30: Izdelava zadnjega zaključka	34
Slika 31: Model celotnega ohišja	34
Slika 32: Prvi izdelano ohišje.....	34
Slika 33: Aeroprofil).....	35
Slika 34: NACA0012 aeroprofil	36
Slika 35: Aeroprofil v območju zastoja.....	36
Slika 36: Primerjava simetričnih in asimetričnih aeroprofilov	37
Slika 37: WASP (smoothed) aeroprofil	37
Slika 38; Letala z različnim Aspect ratio	38
Slika 39: Vidni vrtinci na konicah kril	39
Slika 40: Primerjava vrtincev s podaljški in brez njih	39
Slika 41: Izvedbe repa	40
Slika 42: Montaža kablov za servomotorje	41
Slika 43: Montaža servomotorjev V1.....	41
Slika 44: Montaža servomotorjev V2.....	41
Slika 45: Končna montaža servomotorjev	42
Slika 46: Montaža servomotorjev	43
Slika 47: Zlomljen kos iz karbonskega filamenta	44
Slika 48: Rešitev problema z luknjo	45
Slika 49: Konstrukcija.....	46

Slika 50: Eksplozijski pogled ohišja	46
Slika 51: Zakrilca iz LW-ASA in PLA	47
Slika 52: Luknja pred in po lepljenju	47
Slika 53: Izdelano ohišje	48
Slika 54: Priključitev napajalne plošče	49
Slika 55: Vezava krmilnega dela	50
Slika 56: Začetna stran Mission Planerja	51
Slika 57: Prostostne stopnje letala.....	52
Slika 58: Quad X konfiguracija.....	53
Slika 59: Določitev servo izhodov	53
Slika 60: Aviokopter v letalskem načinu	57
Slika 61: Aviokopter v dron načinu	57
Slika 62: Testiranje motorjev	58
Slika 63: Testiranje	58

KAZALO TABEL

Tabela 1: Meritve stranic	20
---------------------------------	----

UPORABLJENE KRATICE

FC – krmilnik letenja (ang.: flight controller)

ESC – elektronski krmilnik hitrosti (ang.: electronic speed controller)

RX – radijski sprejemnik (ang.: radio receiver)

LiPo – litij polimer baterija

NiMH – nikelj-metal hidridna baterija

Li-ion – litij-ionska baterija

PLA – polimlečna kislina (ang.: polylactic acid)

ABS – akrilonitril butadien stiren (ang.: acrylonitrile butadiene styrene)

ASA – akrilonitril stiren akrilat

LW-ASA – lahek akrilonitril stiren akrilat (ang.: low weight acrylonitrile styrene acrylate)

°C – stopinje Celzija

mm – milimeter

g/cm³ – gram na kubični centimeter

VTOL – vertikalno vzletanje in pristajanje (ang.: vertical takeoff and landing)

PWM – impulzna širinska modulacija (ang.: pulse width modulation)

GPIO – generalno namenjeni vhodi/izhodi (ang.: general-purpose input/output)

1 UVOD

VTOL-zrakoplov je letalo, ki je sposobno vzletati in pristajati vertikalno, brez potrebe po pristajalni stezi.



*Slika 1: Primer VTOL-zrakoplova
(Vir: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tiltrotor>)*

Ideja o izdelavi daljinsko vodenega VTOL-zrakoplova se mi je porodila med brskanjem po telefonu med pavzo na počitniškem delu. Po nekaj večernih razmišljjanjih se je ta ideja dodatno razvila. Množile so se ideje, kje vse bi lahko bil zrakoplov uporaben. Takšen manjši zrakoplov bi se lahko uporabljal v reševalnih situacijah, kjer je dostopnost za reševalce težja ali kot možnost za dostavo manjših paketov.

1.1 Brezpilotni zrakoplovi v Sloveniji

31. 12. 2020 je Slovenija sprijela nove zakone in pravila za letenje brezpilotnih zrakoplovov. Najpomembnejša pravila so:

- vsi zrakoplovi, katerih teža skupaj z baterijo in opremo presega 250 g, morajo biti registrirani, pilot pa mora imeti opravljen izpit ustrezne kategorije,
- če dron vsebuje kamero, ki lahko zajame osebne podatke, mora biti registriran, kljub temu če ne presega teže 250 g,
- maksimalna višina od tal ne sme presegati 120 m,
- prepovedano je letenje nad ali v bližini določenih objektov, kot so: bolnišnice, vojaški objekti, letališča, itd.,

- prepovedano je letenje nad skupinami ljudi. [8]

V kolikor bo aviokopter presegel maso 250 g, ga bo potrebno registrirati in opraviti izpit potrebne kategorije. Te so:

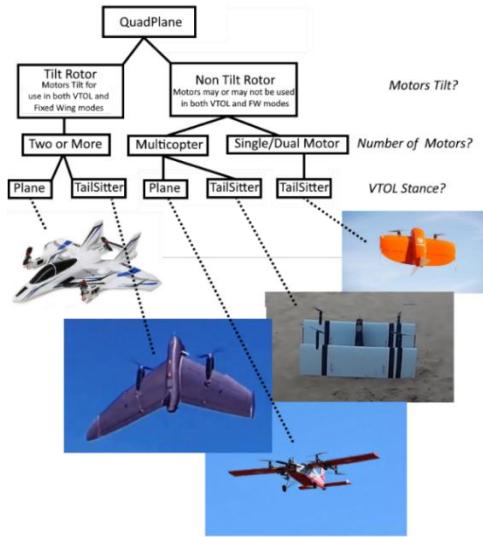
- 1. ODPRTA kategorija. Ta se deli na A1, A2 in A3
- 2. POSEBNA kategorija
- 3. CERTIFICIRANA kategorija [9]

1.2 Iskanje tovrstnih naprav

Ideja o VTOL-zrakoplovih ni povsem nova. Prvi testi in poleti segajo že v leto 1950, ko je britansko kraljevo letalstvo izdelalo Harrier reaktivno letalo. Z možnostjo preusmeritve zračnega toka skozi reaktivne motorje je to letalo lahko vzletalo in pristajalo vertikalno, prav tako je lahko lebdelo.

Poznamo več vrst VTOL-zrakoplovov, ki jih delimo po njihovi VTOL-transformaciji. Med njimi obstajajo zrakoplovi s fiksнимi motorji. Ti ne spremenijo pozicije in smeri motorjev, ampak z nenadnim gibom obrnejo celoten trup horizontalno oz. vertikalno ter spremenijo način leta. Poznamo pa tudi VTOL-zrakoplove, ki ne spremenijo orientacije trupa, ampak obrnejo motorje med transformacijami med letalom in dronom.

V pričujoči raziskovalni nalogi sem se odločil za izdelavo VTOL-zrakoplova, ki bo zložil krilo, saj če bi bil nanj pritrjen kakšen paket, bi ga lahko nenaden obrat pri tranziciji poškodoval. Prav tako bi težavo predstavljal spremembu težišča.



Slika 2: Izvedbe VTOL-letal
(Vir: <https://ardupilot.org/plane/docs/quadplane-overview.html>)

1.3 Hipoteze

Moj cilj je izdelati daljinsko vodeno letalo, ki je sposobno vertikalnega vzletanja in pristajanja. Tako sem si postavil nekaj hipotez, ki jih bom po končani nalogi potrdil ali zavrgel. Te so:

1. letalo bo v celoti izdelano doma ali v šoli,
2. uporabljena bo samo tehnologija 3D-tiska,
3. letalo bo zmožno leteti vsaj 10 minut,
4. model bom modeliral v programskejem okolju OnShape v manj kot 100 urah,
5. vsi skupni stroški materialov ne bodo presegli 500 €.

1.4 Metode raziskovanja

Da bi lahko izbrane cilje čim bolj in hitro realiziral, sem pri raziskovanju uporabil dve metodi:

- Metoda analize, ki temelji na razčlenitvi celote na njene osnovne sestavne dele. Tako sem svojo kompleksno nalogo razdelil na več delov: snovanje in konstruiranje, izdelava, programiranje itd. S tem je bilo delo preglednejše in bolj sistematično.

- Primerjalna metoda, ki temelji na primerjavi več ugotovitev. To metodo sem največkrat uporabil pri snovanju, kjer sem svoje ideje primerjal z že izdelanimi VTOL-zrakoplovi in ponovno pri sami izdelavi, ko sem se vračal v snovanje.

2 OD IDEJE DO MODELA

Glavni cilj je bil projektirati in izdelati delajoč prototip. Naloga je predstavljala izziv na več področjih, zato sem si moral delo dobro organizirati. Začel sem z osnovnim mehanizmom, ki predstavlja ključen del celotnega projekta. Kako spremeniti pozicijo kril, da bo lahko avioopter pristajal in vzletal vertikalno, ne da bi pri tem potreboval kakršnokoli pomoč, razen preklopa stikala na daljinskem upravljalniku. Tako sem kmalu dobil nekaj verzij, pri katerih je vsaka imela tako dobre kot tudi slabe lastnosti. Spodnje slike prikazujejo razvoj posameznih verzij po kronološkem zaporedju.

2.1 Koncept 1

Prva slika prikazuje prvo verzijo mehanizma, ki je bila sestavljena iz enega drsnega elementa, dveh krogličnih povezav in nekaj povezav s tečaji. S tem, ko bi se drsni element pomikal po glavni palici, bi potiskal palico A, ki bi nagibala krilo v smeri X in poleg tega še prenosno vezavo iz drsnega elementa na palico B, ki bi zavrtela krilo v smeri Y. To verzijo sem kmalu opustil zaradi težke vzpostavitve natančnosti pri ponavljajočih gibih. Prav tako bi vsebovala kar veliko elementov za vzpostavitev tega.



Slika 3: Princip I
(Osebni vir)

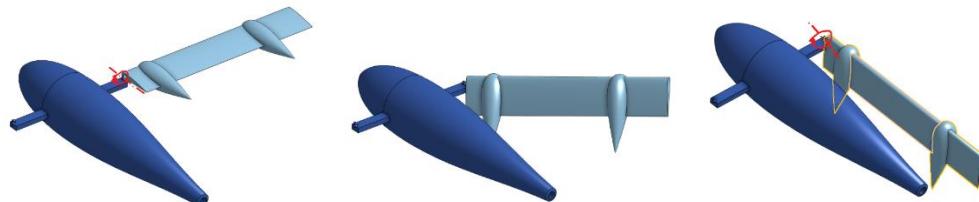
2.2 Koncept 2

Med iskanjem novega koncepta zlaganja kril sem naletel na mehanizem, ki je bil uporabljen pri letalu Grumman TBM Avenger iz 2. svetovne vojne. Ta mehanizem je sestavljen iz enega tečaja, ki je pod kotom v dveh oseh. Tako se krilo obrne za 90° nazaj in navzdol. S tem prihrani veliko prostora, ko je letalo prizemljeno.



*Slika 4: Grumman TBM Avenger
(Vir: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=6bh3CKw_HLk)*

Vendar identični mehanizem ne bi bil primeren za potrebe, saj morajo motorji s propelerji potiskati zrak pod krilo. Zato bi v tem identičnem mehanizmu potreboval dodatne motorje, ki bi se vrteli v nasprotno smer, ali pa bi bilo treba izbrati propelerje, ki bi lahko delovali v nasprotni smeri vrtenja. Zato sem ta mehanizem prilagodil tako, da se krilo zloži navzgor namesto navzdol, kot pri letalu Grumman TBM Avenger. Medtem pa motorji delujejo v isti smeri, potiskajo zračno maso pod letalo in ga držijo v zraku.



*Slika 5: Princip 2
(Osebni vir)*

Sedaj je potrebno prestaviti krila iz ene pozicije v drugo. Premisljeval sem o več rešitvah za obravnavani problem.

2.2.1 Verzija 1

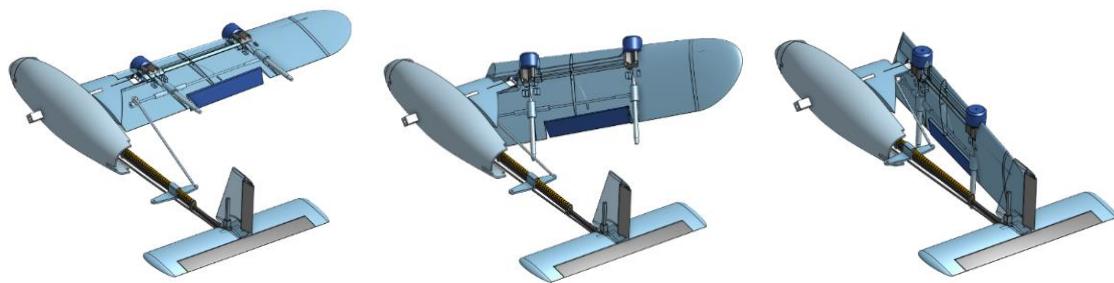
Prvotna izbira je bila uporaba linearnih servomotorjev, ki bi bili pritrjeni na trup in bi z linearnim delovnim gibom zložili krilo. Vendar sem to rešitev kmalu opustil zaradi izračunov o momentih, ki bi nastajali med letom. Moment lahko izračunamo po sledeči enačbi:

$$M = F * r$$

Pri tem M predstavlja moment z enoto Nm (newtonmeter), F sila (N – newton) in ročica r (m). Res je, da obstajajo močni servomotorji, ki bi lahko z luhkoto premagali takšno silo, a na žalost v aviokopterju ni dovolj prostora zanje. Prav tako ni prostora za dovolj močna držala, ki bi prenesla takšno silo.

2.2.2 Verzija 2

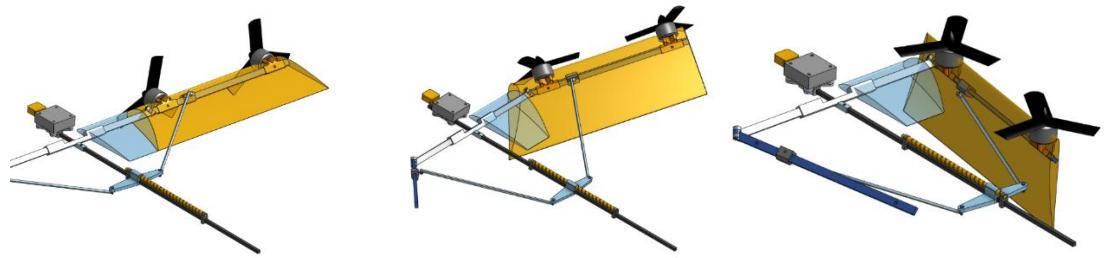
Ker je uporaba linearnih motorjev direktno na krilih praktično neizvedljiva, je bilo potrebno najti drugo rešitev. Kasneje sem razvil idejo uporabe linearnega giba po trupu, ki bi z določenim vmesnim členom omogočil zlaganje kril. To sem uresničil z uporabo navojne palice, ki premika vodilo, na katerega so pritrjene palice, povezane s krilom.



*Slika 6: Verzija 2
(Osebni vir)*

2.2.3 Verzija 3

Tretja verzija se ni dosti spremenila od druge, le da sem tokrat pritrdil palico direktno na nosilo krila. Res je, da je zdaj potrebno opraviti daljši linearni gib, kot bi ga bilo potrebno v drugi verziji.



*Slika 7: Verzija 3
(Osebni vir)*

3 ELEKTRONIKA

3.1 Letalski krmilnik

Ker VTOL-zrakoplov prvotno vzleta kot dron, se ga najprej vodi s spreminjanjem hitrosti motorjev, nato pa se ga preklopi v letenje kot pri letalu, pri čemer z motorji samo nadziramo njegovo hitrost. Preklop med temo dvema načinoma delovanja izvedemo z uporabo letalskega krmilnika. Takšen krmilnik bi se lahko izdelal z uporabo mikrokrmilnika, kot je Arduino, ali z uporabo mikrorračunalnika, kot je Raspberry pi. Lahko se uporabijo že za to vnaprej namenjeni krmilniki, ki jim je pozneje potrebno nastaviti parametre in določiti, kakšno funkcijo opravljam do določeni vhodi ali izhodi. Sam sem za to izbral letalski krmilnik Matek F405 VTOL, ki lahko preklaplja med načini krmiljenja in je združljiv z zato pogosto uporabljenimi programi, kot so Betaflight, INAV in ArduPilot.

Krmilnik letenja Matek F405 VTOL je visoko zmogljiva plošča, prilagojena za letala z navpičnim vzletanjem in pristajanjem, ki zagotavlja izjemno stabilnost in nadzor. Poganja ga robusten procesor STM32F405 in nabor senzorjev, vključno z žiroskopi in merilniki pospeška. Prav tako zagotavlja natančno dinamiko leta, ki je ključnega pomena za operacije VTOL. Vsestransko te plošče se še razširi na njeno združljivost s priljubljeno vdelano programsko opremo, kot sta Betaflight in ArduPilot, ki ponujata prilagodljivost za natančno nastavitev zmogljivosti letala in dostop do naprednih funkcij, kot so navigacija GPS in avtonomne misije. Njegova kompaktna in lahka zasnova poenostavlja integracijo v različna letala, hkrati pa ohranja vzdržljivost in zanesljivost v različnih pogojih letenja. Ima vgrajenih 12 PWM-izhodov, ki se lahko uporabijo za krmiljenje raznih motorjev ali pa se uporabijo kot GPIO. Prav tako ima vgrajenih 5 ploščic za ESC-je, ki lahko posamezno prenesejo konstantne tokove do 30 A in momentane do 50 A. [12]



Slika 8: Matek F405 VTOL
(Vir: <https://www.mateksys.com/?portfolio=f405-vtol>)

3.2 GPS

Ker ima izbrani FC vgrajene samo žiroskope in nekaj dodatnih senzorjev, je potrebno dodati GPS/kompas modul, če želimo izvajati avtonomne polete, ali pozneje prenesti poročilo o letu in videti pot ter smer opravljenega letala.

Za to sem izbral Matek M10Q-5883 GNSS&Compas modul, ki ima vgrajen magnetni kompas in je kompatibilen s 4 globalno satelitskimi sistemi (GNSS), in sicer GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou. [11]



Slika 9: Matek M10Q-5883
(Vir: <https://www.mateksys.com/?portfolio=m10q-5883>)

GPS je razvilo Ministrstvo za obrambo Združenih držav Amerike in je sestavljen iz konstelacije 31 satelitov, ki krožijo okoli Zemlje. Zagotavlja zelo natančne informacije o lokaciji uporabnikom po vsem svetu, zaradi česar je najbolj razširjen sistem.

GLONASS je ruski sistem GNSS, ki ga sestavlja 24 satelitov. Zasnovan je tako, da dopolnjuje GPS. Zagotavlja podobne informacije o lokaciji, z nekoliko drugačno natančnostjo in vzorci pokritosti. GLONASS je še posebej uporaben v regijah z visoko zemljepisno širino, kjer zagotavlja boljšo natančnost in pokritost kot GPS.

Galileo je sistem GNSS, ki ga je razvila Evropska unija, in je sestavljen iz konstelacije 30 satelitov. Zagotavlja zelo natančne informacije o lokaciji, podobno kot GPS in GLONASS, vendar z več ključnimi razlikami. Galileo npr. zagotavlja šifrirane signale za varno uporabo in tudi dodatne signale, ki lahko izboljšajo natančnost v zahtevnih okoljih, kot so urbani kanjoni.

BeiDou je kitajski sistem GNSS, ki ga sestavlja 35 satelitov, in zagotavlja informacije o lokaciji uporabnikom po vsem svetu. Zasnovan je tako, da dopolnjuje druge sisteme GNSS in zagotavlja dodatne signale ter izboljšano natančnost v določenih regijah. BeiDou je še posebej uporaben v Aziji, kjer zagotavlja celovito pokritost in izboljšano zmogljivost v primerjavi z drugimi sistemi GNSS.

3.3 Servomotorji

Pri upravljanju zakrilc je potrebna hitra odzivnost in natančnost. Za to so pogosto uporabljeni servomotorji zaradi njihove enostavne uporabe, kakovosti in cenovne dostopnosti.

Sestavljeni so iz DC-motorja, ki je preko zobnikov povezan na končno gred, katere pozicija se razbere s tahometrom. Odčitana pozicija je nato posredovana nazaj v krmilnik v servomotorju. Vgrajen krmilnik to pozicijo primerja z želeno, katero po navadi prejme preko PWM-signala. Po potrebi zavrti motor v določeno smer, da dosežemo želeno pozicijo.

Servomotorje delimo na digitalne in analogne. Analogni so precej cenejši in porabijo manj moči, a zaradi tega imajo daljši odzivni čas in šibek vzdrževalni moment. Na drugi strani imamo digitalne servomotorje, ki so dražji. Lahko prejemajo signale s frekvencami tudi do 500 Hz, zato so posledično hitrejši, imajo močnejši vzdrževalni moment, vendar zato porabijo več energije.

Prav tako jih delimo še po zgradbi. Pri tem se največkrat govori, iz česa so narejeni zobniki znotraj servomotorja. Na manjših in cenejših motorjih so ti zobniki plastični, zato se ne morejo uporabljati za aplikacije, pri katerih so prisotne velike sile. Potem imamo servomotorje s kovinskimi zobniki, ki so dražji, a lahko prenesejo večje momente.

Za to nalogu sem izbral analogne servomotorje, ki imajo dovolj hitro odzivnost (0.08 s za 60° pri 6 V) in lahko prenesejo 2 kg navora pri ročici 1 cm, kar je dovolj za upravljanje zakrilc.

3.4 Motorji

Pri modelarstvu poznamo več načinov pogona, in sicer motorje z notranjim izgorevanjem ter električne motorje. Uporaba in vzdrževanje motorjev na notranje izgorevanje je zahtevna in draga. Električne motorje pa delimo na krtačne in brezkrtačne. Največkrat se uporabljo brezkrtačni, saj so bolj efektivni, proizvedejo več moči, so tišji in proizvajajo manj vibracij kot krtačni motorji. Brezkrtačni motorji so sestavljeni iz statorja, na katerega so nameščena navitja in držalo motorja, in rotorja, na katerega so nameščeni magneti in delovna os. Za uporabo potrebujejo 3-fazno izmenično napetost, katero generira ESC.

Za brezkrtačne motorje lahko določamo naslednje parametre:

- Napetosti, na katerih lahko delujejo.
- Velikost statorja, ki jo določamo s štirimestnim številom. Prvi dve predstavljata premer statorja v mm in drugi dve višino v mm.
- KV-rating oz. s kolikšnimi obrati se bo hotel vrteti motor, če nanj priključimo 1 V.

Te parametre določimo približno po naslednjih korakih:

1. Določimo velikost propelerjev.

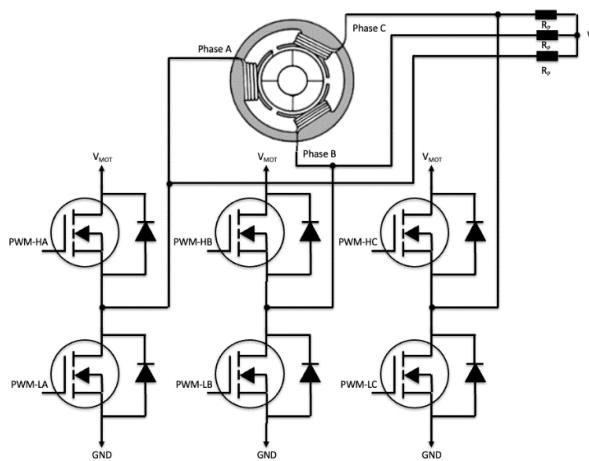
Velikost propelerjev deloma določamo že pri konstruiranju celotnega sistema. Potem ko pridemo do te faze, izberemo največjo v sistemu dovoljeno velikost propelerjev. To velikost izražamo s premerom v enoti inch. Sam sem za ta projekt izbral 7"-propelerje.

2. Na podlagi velikosti propelerja določimo minimalni priporočeni stator. Te podatke najdemo na spletu, kjer modelarji, na podlagi izkušenj, priporočajo, kolikšen je minimalni volumen statorja. Za 7"-propelerje je priporočena uporaba 2208 statorja.
3. Ocenimo težo celotnega sistema. Po hitrih izračunih aviokopter ne bi smel presegati 1500 g, a bo presegel težo 1 kg. Tako sem uporabil težo 1500 g za izračune. To se pozneje deli s številom motorjev, da izračunamo, kakšen potisk mora motor generirati. Tako mora motor, ko je nanj pritrjen propeler, generirati 375 g. A v praksi ne smemo uporabiti tega podatka, ker se s tem potiskom celoten sistem lahko le ohranja v zraku, ni pa dovolj, da bi se dvignil in premikal. V praksi zato upoštevamo pravilo, da mora biti pri polnem plinu potisk motorjev za enkrat večji od teže celotnega sistema. S tem se lahko naprava dvigne v zrak in je odzivnejša in stabilnejša. Tako sem izračunal, da mora motor generirati vsaj 750 g potiska. [13]
4. Sedaj je potrebno poiskati motor, katerega stator ima volumen večji ali enak kot stator 2208, in skupaj s 7"-propelerjem generira vsaj 750 g potiska. To lahko storimo na dva načina. Moč motorja lahko na podlagi statorja in KV-ratinga in z uporabo nekega propelerja izračunamo, lahko pa se obrnemo na dokumentacijo proizvajalcev motorjev, kjer so navedeni rezultati testov pri različnih napetostih in različnih propelerjih. Sam sem izbral drugo pot. Tako sem prišel do izbire EMAX ECO II 2807 1300 KV motorja. Ta motor pri 25 V skupaj z uporabo Gemfan 7040 propelerja, ki ima premer 7", korak 5" in je trikraki, generira 2490 g potiska, med tem pa porablja 45.2 A. A ti testi so bili narejeni s 7S baterijo. Ker aviokopter ne potrebuje takšne moči, bom uporabil 4S ali 6S baterijo. Ti sta najpogosteje uporabljeni, cenejsi in kljub temu dovolj močni. [6]

Nato sem z uporabo spletnega kalkulatorja izračunal, da izbrani motorji skupaj z Gemfan 7 x 4 x 3 propelerji, medtem ko so priključeni na napetost 14.8 V (4S), posamezno generirajo okoli 787 g potiska. Pri tem porabijo maksimalno okoli 19.5 A. Ker to še niso veliko tokovi pri modelarstvu in je razmerje potiska proti teži le 2.1, sem preizkusil, kako bi delovali motorji z Gemfan 7 x 5 x 3 propelerji. Po tem se predvidena poraba toka ni dosti povečala, in sicer na 22.5 A, a s temi 3 A več lahko sedaj motorji generirajo 860 g potiska.

3.5 Elektronski regulator hitrosti

Ker brezkrtačni motorji potrebujejo izmenično napetost za delovanje in celoten sistem napajamo z baterijo, ki ga oskrbuje z enosmerno napetostjo, je potrebna uporaba vmesnega člena, ki bo enosmerno napetost pretvoril v izmenično in prav tako prilagodil njeno frekvenco za nadzor hitrosti motorja. Za to uporabimo ESC-je (ang: electronic speed control). V osnovi so sestavljeni iz mikrokrmlnika, ki pretvori vhodni signal v signale za polprevodniške tranzistorje s kovinskim oksidom (MOSFET); le-ti se preklapljajo in tvorijo izmenično napetost. Ker ti motorji uporabljam 3-fazno napetost, je potrebna uporaba 6 takšnih mosfetov.



*Slika 10: Uporaba MOSFETOV v ESC
(Vir: <https://reefswing.medium.com/an-arduino-nano-electronic-speed-controller-esc-part-2-2bb5ec7c309a>)*

Pred letom 2015 so vsi ESC-ji uporabljali PWM-protokol. V zadnjih letih se je razvilo precej novejših protokolov, ki uporabljajo analogne (PWM) ali digitalne signale. Najpogosteje uporabljeni protokoli so Oneshot125, Oneshot42, Multishot, Dshot300, Dshot600 in Dshot1200. Protokola Oneshot in Multishot uporablja analogne signale, kot je PWM, medtem ko Dshot (Digital shot) uporablja digitalni signal. Glavna razlika med analognimi in digitalnimi protokoli je, da analogni potrebujejo kalibracijo, da uskladijo oscilatorje (ure) v krmilniku. Brez te kalibracije je lahko motor neodziven, saj si lahko ESC napačno razlaga dolžino signalov.

Pri izbiri ESC-jev moramo biti pozorni, ali lahko deluje na izbrani napetosti baterije, če FC podpira njegov protokol in ali lahko napaja izbrani motor. To določimo z izračunom, kako velik

bo tok, ki ga bo motor porabljal. Priporočljivo je, da je ESC-jev maksimalni konstantni tok za vsaj 20 % večji od toka motorja, da tako preprečimo pregrevanje. [15]

Ker v trupu aviokopterja ni ravno veliko prostora, ni bila možna uporaba 4 v 1 ESC plošče, s katero bi prihranil na celotni teži. Zato je bilo potrebno najti čim manjše ESC-je, ki lahko prenesejo vsaj 30 A. Tako sem izbral posamezne ESC-je, ki lahko konstantno prenesejo 45 A, kar je dvakrat več, kot bodo porabili motorji. Ti ESC-ji so veliki le 29 mm x 14 mm x 4 mm, kar je, glede na majhen trup aviokopterja, dodatna prednost.

3.6 Baterija

Pri modelarstvu se največkrat uporabljajo lipo baterije. Pri le-teh določamo različne parametre:

- Kemijska zgradba baterije, najpogosteje so uporabljene Li-Po, NiMH in Li-ion.
- Napetost baterije, ki določa moč celotnega sistema. Pri definiranju napetosti se redko uporablja dejanska napetost napolnjene baterije, ampak kar število zaporedno vezanih celic. To število označimo z enoto S. Npr. baterije z napetostjo 11.1 V ne bomo poimenovali z napetostjo, ampak s 3 S, saj so v njej zaporedno vezane 3 3.7 V celice. Napetost posamezne celice je običajno 3.7 V, nekateri proizvajalci pa jih izdelujejo prilagojeno na napetost 4.35 V, kar prinaša malo več moči. Te imenujemo visokonapetostne baterije.
- Kapaciteta, ki se označuje v enotah mAh ali Ah.
- C-rating oz. koliko moči lahko baterija prejme (pri polnjenju) ali je sprosti. Maksimalni tok, ki ga lahko baterija sprosti, izračunamo po sledeči enačbi:

$$I = C \times \text{kapaciteta baterije (Ah)}$$

Vzemimo za primer dve bateriji s kapaciteto 4200 mAh, ena s C-ratingom 0.5 C in druga s 60 C.

$$\frac{4200 \text{ mAh}}{1000} = 4.2 \text{ Ah}$$

$$\frac{4200 \text{ mAh}}{1000} = 4.2 \text{ Ah}$$

$$0.5C \times 4.2Ah = 2.1 A$$

$$60C \times 4.2Ah = 252 A$$

Tako lahko vidimo, da lahko baterija s 60 C-ratingom nenadoma izpusti za 120-krat več moči kot baterija z 0.5 C, a se zaradi svoje sposobnosti hitrega spuščanja moči posledično tudi hitreje izprazni.

$$\frac{60 \text{ min}}{C} \doteq \text{čas praznjenja}$$

$$\frac{60 \text{ min}}{0.5 C} \doteq 120 \text{ min} \quad \frac{60 \text{ min}}{60 C} \doteq 1 \text{ min}$$

Najpogosteje imajo baterije definiran samo en C-rating, ki se uporablja za izračun praznilnega toka. V tem primeru se polnilni tok preprosto izračuna tako, da delimo kapaciteto baterije (mAh) s 1000. Včasih proizvajalci določijo tudi polnilni C-rating. V tem primeru polnilni tok izračunamo po identični enačbi kot za maksimalni praznilni tok, le da tokrat uporabimo polnilni C-rating. [14]

- Zgradba. Odvisno od proizvajalca so lahko baterije zapakirane in zaščitene le s folijo ali pa so nameščene v trdo ohišje iz plastike, kar nudi boljšo zaščito, a prinese dodatno težo.

Kot sem že zgoraj zapisal, sem se odločal med uporabo 4S in 6S baterije. Pri tej odločitvi vedno pride do težav. Z uporabo 6S baterije se bodo motorji vrteli hitreje in generirali več potiska, a bodo zaradi večjih obratov porabili večje tokove, s čimer bodo hitreje izpraznili baterijo. Pri 4S bateriji se bodo motorji vrteli počasneje in proizvajali manj potiska. Prav tako so 4S baterije lažje in se s tem podaljša čas letenja. Tako sem se odločil za uporabo 4S baterije z večjo kapaciteto, kot bi jo imela 6S z enako težo.

Prav tako je potrebno določiti, kako velik mora biti C-rating, če želimo, da lahko baterija prenese tokove, ki jih porabljajo motorji in ostale komponente. Pri tem lahko uporabimo spodnjo formulo za izračun maksimalnega toka, le da tokrat izpostavimo C-rating.

$$C = \frac{I}{\text{kapaciteta baterije (Ah)}}$$

Ker sem imel namen uporabiti baterijo s kapaciteto najmanj 3000 mAh, sem sprva uporabil to kapaciteto za izračun. V tem primeru, ko bi bil maksimalni skupni tok okoli 95 A pri kapaciteti 3000 mAh, bi potreboval baterijo s C-ratingom vsaj 31, pri čemer ponovno pustimo nekaj

prostora, da bateriji ni potrebno delovati na maksimalni zmogljivosti. Pozneje sem pri posamezni bateriji ponovno izračunal, če je njen C-rating dovolj velik.

V trupu je bilo prostora le za baterijo z maksimalnimi dimenzijami 140 mm x 50 mm x 40 mm. Potreboval sem 4S baterijo, ki ima vsaj 30 C in čim večjo kapaciteto. Pod temi pogoji sem izbral baterijo z maksimalno kapaciteto 4200 mAh in 60 C-ratingom. Ta rating je kar visok, a s tem je projekt odprt za nadgradnje, ne da bi bil potreben nakup močnejših baterij.

4 IZBIRA MATERIALOV

4.1 PLA

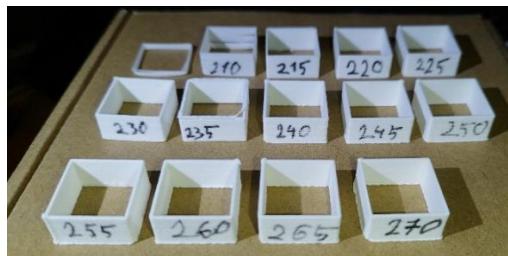
PLA oz. polimlečna kislina (ang.: polylactic acid) je priljubljen material pri 3D-tiskanju, saj ne zahteva posebnih pogojev shranjevanja. Je preprost za tiskanje, cenovno dostopen in narejen iz biološko razgradljivih materialov, kot so koruza, manioka in sladkorni trs.

PLA se tiska pri temperaturah konice med 180–220 °C in s podlago 20–60 °C (gretje podlage ni nujno). Ker ima nizek koeficient krčenja, ga je možno tiskati tudi pri visokih hitrostih (do 150 mm/s, z nekaterimi filamenti tudi do 600 mm/s). [16]

4.2 LW-ASA

ASA ali akrilonitril stiren akrilat (ang.: acrylonitrile styrene acrylate) je material, narejen kot alternativa akrilonitril butadien-stirenu (ABS), vendar z izboljšano vremensko odpornostjo. Pogosto se uporablja v avtomobilski industriji. Je močnejši in odpornejši kot PLA, prav tako tudi lažji (teža 1.05 g/cm³). Že z uporabo ASA bi prihranil pri teži celotnega ohišja, a obstajajo še lažje verzije PLA in ASA, kot so LW-PLA in LW-ASA. Sam sem za ta projekt izbral LW-ASA, saj je odpornejši na visoke temperature in UV-svetlobo kot PLA. To je velika prednost, saj se zato 3D-natisnjeni kosi ne bodo tako hitro deformirali in postarali med poleti v sončnih dneh.

Posebnost LW-ASA je, da se pri določenih temperaturah začne peniti, s čimer tudi dvakrat poveča volumen. Tako sem zmodeliral preprost kvadrat dimenzij 20 mm x 20 mm x 10 mm z debelino 0.4 mm, saj ima moj tiskalnik trenutno nameščeno konico s premerom 0.4 mm. Nato sem izvedel serijo tiskov pri različnih temperaturah 205–270 °C in s tiskalno podlago, segreto na 60 °C. Pozneje sem na vsakem testu s pomicnim merilom izmeril vse 4 stranice in jih vnesel v Excel, ki je izračunal povprečno debelino stranice in izrisal graf penjenja v odvisnosti od temperature. [4]



*Slika 11: Temperaturni testi
(Osebni vir)*

Tisk pri 205°C sem moral kmalu ustaviti, saj so se vrstice po nekaj plasteh nehale sprijemati.
Pri 210°C je bil tisk dokončan, a so se videle razpoke med določenimi plastmi.

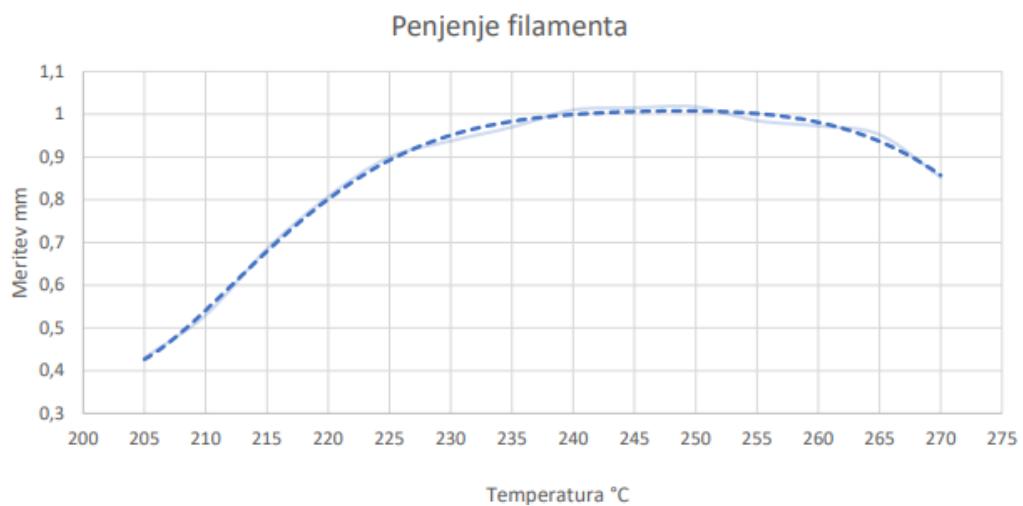


*Slika 12: Testa pri 205°C in 210°C
(Osebni vir)*

Test pri 215°C že ni več pokazal razpok med plastmi. Opazil se je že efekt penjenja s povprečno stranico 0.68 mm. Tako se je penjenje povečevalo vse do $245\text{--}250^{\circ}\text{C}$, kjer je doseglo maksimalno debelino s povprečno stranico 1 mm, za tem je začela debelina počasi padati.

Tabela 1: Meritve stranic

temperatura (°C)	stranica A	stranica B	stranica C	stranica D	Povprečje (mm)
205	0,45	0,44	0,43	0,4	0,43
210	0,5	0,5	0,6	0,52	0,53
215	0,7	0,71	0,66	0,67	0,685
220	0,81	0,83	0,8	0,79	0,8075
225	0,9	0,93	0,88	0,89	0,9
230	0,91	0,92	0,96	0,96	0,9375
235	1	0,99	0,96	0,93	0,97
240	0,97	1,05	1,07	0,95	1,01
245	1,04	1,09	0,95	0,98	1,015
250	0,97	1,09	1,09	0,92	1,0175
255	0,99	1,05	0,94	0,96	0,985
260	0,97	1	1	0,92	0,9725
265	0,92	0,95	0,97	0,97	0,9525

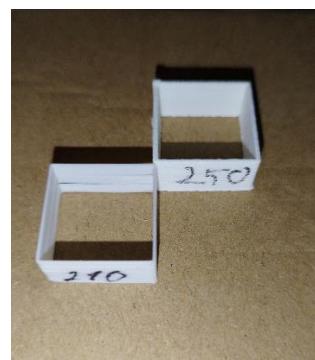


Slika 13: Graf penjenja LW-ASA filimenta
(Osebni vir)

Tako je filiment povečal svoj volumen za 2,5-krat, s čimer se je prav tako prepolovila teža celotnega tiska z gostote $1,07 \text{ g/cm}^3$ na $0,43 \text{ g/cm}^3$.



*Slika 14: Primerjava tež ladijc iz PLA in LW-ASA
(Osebni vir)*



*Slika 15: Testa pri 210 °C in 250 °C
(Osebni vir)*

4.2.1 Tiskanje z LW-ASA-filamentom

V primerjavi s PLA, ki se tiska pri temperaturah 190–220 °C in ne potrebuje segrete podlage, se LW-ASA tiska pri temperaturah 230–260 °C in potrebuje segreto podlago 90–100 °C. Kakor lahko razberemo iz zgornjih testov, lahko vidimo, da je najboljše tiskati pri temperaturah 245–250 °C, če želimo maksimalno izkoristiti lastnost penjenja. Zaradi penjenja izgubimo zmožnost tiskanja enakomernih površin, kot jih ima PLA. Kljub uporabi retrakcije se je nemogoče izogniti nastajanju nitk med tiskom, saj se filament, ko je v ekstruderju, razširi in potisne ven skozi konico.



*Slika 16: Primerjava PLA- in LW-ASA-tekstur
(Osebni vir)*



*Slika 17: Primerjava tekstur PLA in LW-ASA
(Osebni vir)*

Prav tako ga je potrebno zaradi penjenja tiskati z manjšim pretokom, če želimo doseči natančno tiskanje. Pravi pretok najdemo z istim testnim kvadratom, a tokrat ga tiskamo pri konstantni temperaturi in počasi spremojamo pretok, dokler ni dosežena širina stranice 0.4 mm. Pri tem sem tiskal enake testne kvadrate, in sicer sem začel pri 80 % pretoku. Tu je bila povprečna debelina stranice 0.68 mm. Pretok sem zatem zmanjšal na 60 % – stranica je bila povprečno debela 0.55 mm. Pri zadnjem testu sem tiskal s 40 % pretokom, kakršnega tudi priporoča proizvajalec. Stranica je bila povprečno debela 0.41 mm.

Ker je ASA-material v marsičem podoben ABS, si skupaj delita eno izmed velikih slabosti med tiskanjem. To je krčenje ob prenizki temperaturi ali pri nenadni temperaturni spremembi. Prav tako spušča hlape, ki ob izpostavljenosti lahko privedejo do zdravstvenih težav, kot so glavobol,

draženje ... Zato je pomembno, da nismo prisotni v sobi s tiskalnikom, ki trenutno tiska z ASA-ali ABS-filamentom, ali pa se ta prostor dobro zrači. A ker je ta filament občutljiv na temperaturne spremembe, lahko prepogosto zračenje privede do krčenja, zato je najbolje, da ima tiskalnik ohišje. Tako je tisk manj izpostavljen zunanjemu okolju in prav tako se prostor v tiskalniku segreje, kar je priporočeno pri tiskanju s takšnimi filamenti. Temperaturno krčenje se je počasi začelo kazati pri tiskanju s 3D-Benchyjem. Pri tisku kosa krila, ki je bil precej daljši in ožji, se je pojavilo precej prej in tako močno, da je bilo potrebno ustaviti tisk. [1]



*Slika 18: Upognjeni tisk
(Osebni vir)*

Ena izmed rešitev za ta problem je bila uporaba zaprtega tiskalnika z močnejšim lepilom ali uporaba funkcije raft.

V šoli so tiskalniki, na katerih sem tiskal, zaprti. Posledično zato niso potrebovali funkcije raft in je bilo zadosti samo močnejše lepilo.



*Slika 19: 3D-tisk brez uporabe funkcije raft
(Osebni vir)*

Domači tiskalnik pa nima zaprtega ohišja, zato sem ga moral nekako zapreti, če sem hotel tiskati s tem filamentom. Njegova konstrukcija dopušča, da sem določene stranice zaprl s stiroporjem, kar je dobro preprečevalo, da bi hladen zrak uhajal v območje tiskanja in prav tako zadrževal toploto v njem. Za pokrov sem najprej preizkusil vrečo za smeti, pozneje pa debelejšo prozorno vrečo, ki se je izkazala za zelo dobro in poceni rešitev. Prav tako je bila potrebna uporaba funkcije raft. Ta najprej ustvari površino, ki je večja od površine kosa in debela 2 mm ali več. Nato na to površino (raft) začne tiskati posamezni kos.



*Slika 20: 3D-tisk z uporabo funkcije raft
(Osebni vir)*



Slika 21: Rešitev za tiskanje z odprtим 3D-tiskalnikom
(Osebni vir)

4.3 Ogljikova vlakna

4.3.1 Karbonske palice

Konstrukcija letala bo v osnovi sestavljena iz karbonskih palic. Te lahko imajo le tretjino mase enake aluminijaste palice s približno enako močjo. Karbonske palice so izdelane tako, da se mešanica ogljikovih vlaken in epoksidne smole potiska skozi šobo, ki je segreta, kar strdi smolo. Tako dobimo palice, v katerih so ogljikova vlakna povsem paralelna po dolžini in so posledično nekajkrat močnejše od drugih materialov. V kolikor bi želeli izdelati neko poljubno obliko, bi morali ogljikova vlakna, ki so največkrat izdelana kot krpe, oviti okoli želene oblike in vse skupaj premazati z epoksidno smolo. Ta postopek lahko nekajkrat ponovimo in nato odstranimo model, na katerega smo nanašali ogljikova vlakna.

Izbrane kvadratne karbonske palice naj bi prenesle 400–500 MPa natezne trdnosti. Enaka palica, narejena iz aluminija, bi prenesla le 100 MPa. Prav tako teža karbonske palice dolžine 1 m znaša 38 g, kar je precej lažje kot aluminijasta palica s težo 70 g. [5]

4.3.2 PA-CF

Za izdelavo določenih kosov je bilo potrebno izbrati močnejši material, npr. PLA, a hkrati mora biti, zaradi zahtevnih oblik, izvedljiv za 3D. Tako sem se odločil za uporabo PA-CF, kar je najlonski filament s primešanimi ogljikovimi vlakni, ki so ga že imeli in testirali v šoli.

Za uporabo najlona bi se pogosto odločili pri aplikacijah z višjimi temperaturami in raznimi kemikalijami. Sam najlon je manj tog in manj močan kot PLA, a je precej odpornejši na udarce kot ABS (tudi do desetkrat). Zaradi njegove zahtevnosti pri 3D-tiskanju, njegove majhne trdnosti in togosti se redko uporablja. Zato se najlonskemu filamentu primešajo ogljikova vlakna, ki merijo 5-8 µm v premeru in malo manj kot milimeter v dolžino. S tem se mu doda trdnost in togost ogljikovih vlaken, hkrati pa ohranijo prednosti najlona. [10]

Ker ta filament vsebuje okoli 20 % ogljikovih vlaken, se lahko konica na 3D-tiskalniku popolnoma izrabi po le nekaj 100 g filimenta. Ob tem lahko pride do slabše kakovosti tiskov in netočnosti dimenzij izdelkov. Zaradi tega je priporočena uporaba konice iz kaljenega jekla ali kakšne druge proti obrabi obstojne šobe. [7]



Slika 22: Obrabljena in nova konica
(Vir: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/uimsaf/reminder_check_for_nozzle_wear_i_swear_its_always/)

4.4 Primerjava materialov

Vsi izbrani materiali imajo svoje lastnosti, ki so lahko prednost ali slabost v določenih aplikacijah. V tem poglavju sem jih preizkušal in raziskoval, za kaj je določen material najbolj uporaben. Prav tako sem poleg zgoraj navedenih materialov (ogljikova vlakna, PLA, LW-ASA) preizkusil tudi ABS, ki ga sprva nisem nameraval uporabiti, a sem ga pozneje v postopku izdelovanja preizkusil za izdelavo nekaterih kosov. Te sem pozneje izdelal iz drugih materialov, tako da je avioopter izdelan brez uporabe ABS.

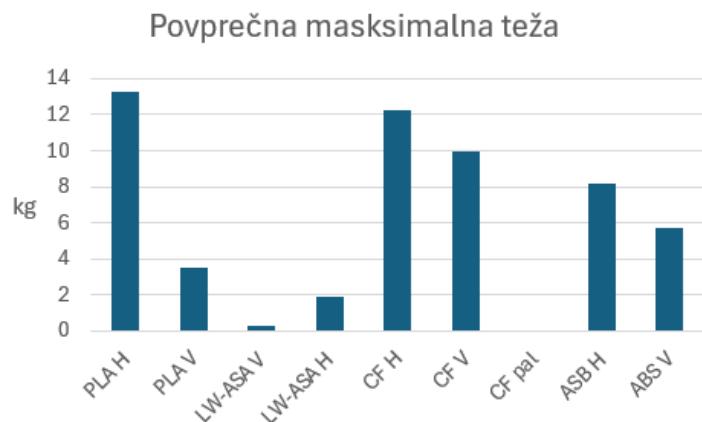
4.5 Teža

Vsak material ima zaradi različne kemijske zgradbe različno gostoto in težo. Najlažji med vsemi materiali je LW-ASA z gostoto $0,43 \text{ g/cm}^3$, sledi ABS z gostoto $1,05 \text{ g/cm}^3$, zatem PLA ($1,25 \text{ g/cm}^3$) in nazadnje ogljikova vlakna (1.8 g/cm^3).

4.6 Test upogibanja

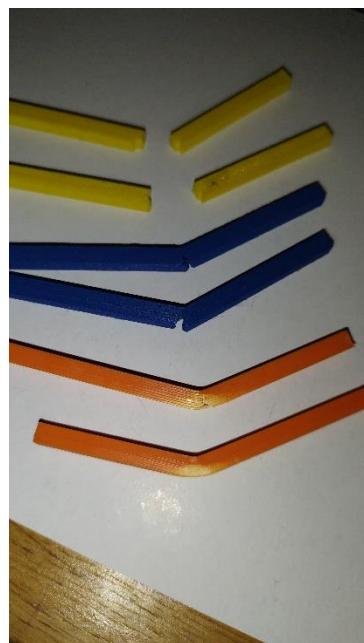
Za ta test sem 3D natisnil palčke dimenzij $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, ki sem jih namestil med dve podpori in nanje obešal uteži. Tako sem preizkušal, koliko bo lahko posamezen material zdržal. V tem testu sem uporabil karbonsko palico, ki je uporabljena kot nosilni element avioopterja, PLA, ASB, LW-ASA in PA-CF. 3D natisnjene palice sem izdelal dvakrat, in sicer so bile enkrat natisnjene leže in enkrat stoje. S tem sem preizkusil, kakšen vpliv ima smer 3D natisnjениh vrstic (orientacija 3D natisnjene kose).

Rezultati testov so bili presenetljivi, saj so določeni materiali prenesli precej manjšo oz. večjo težo. Primer tega je leže (horizontalno) natisnjen PLA, ki je v povprečju prenesel kar $13,25 \text{ kg}$, medtem pa je leže natisnjen karbonski filament prenesel kar kilogram manj. Vsi vertikalno natisnjeni testi so prenesli manjšo težo, saj so zaradi vertikalnega tiskanja plasti manjše in posledično nanje deluje večja sila na spoje med vrsticami.



*Slika 23: Graf testa upogibanja
(Osebni vir)*

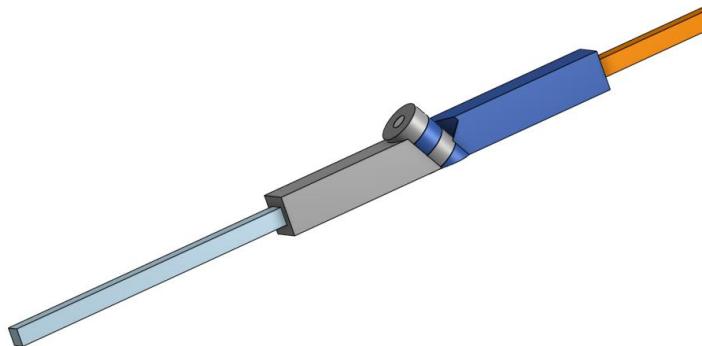
Prav tako se lahko s testov potrdi, ali imajo določeni materiali trdnost ali trdoto. Tipičen primer tega sta PA-CF in ABS. ABS (oranžni filament) ima veliko trdnost in se ni zlomil, ampak samo upogibal, dokler ni padel med podporami. Na drugi strani pa se PA-CF (moder), ki ima veliko trdoto in majhno trdnost, sploh ni upognil, ampak samo zlomil, ko je dosegel maksimalno silo.



*Slika 24: Testne palice
(Osebni vir)*

5 IZDELAVA CAD-MODELA

Kot sem zapisal zgoraj, sem se najprej lotil izdelave mehanizma, ki bi lahko ponavljajoče zložil krila. Po preizkusih ob raznih kotih se je izkazalo, da mehanizem najboljše deluje pod kotoma 50° in 45° , pri čemer je kot 50° kot med deloma tečajev in kot 45° kot, za kolikor je celoten sistem nagnjen naprej.



*Slika 25: Prvi prototip tečajev
(Osebni vir)*

5.1 Nosilna konstrukcija

Konstrukcijo letala sem zasnoval tako, da bodo celotno težo in sile nosile karbonske palice, ki bodo povezane med seboj s 3D natisnjenimi kosi.



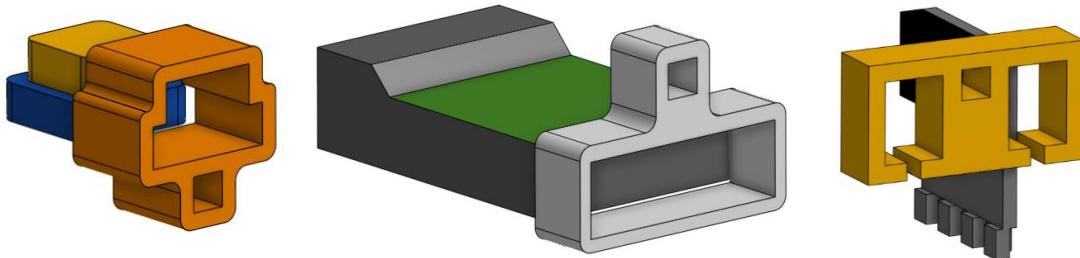
*Slika 26: Nosilna konstrukcija
(osebni vir)*

Krila in trup bodo nosile kvadratne palice z dimenzijami 5 mm x 5 mm, repne stabilizatorje, v katerih ni tako velikih sil, pa palice mer 4 mm x 4 mm.

5.2 Nosilci elektronike

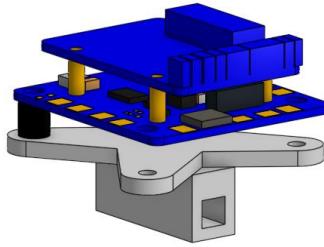
Nosilci elektronike bodo izdelani iz PLA, saj je preprost za tisk in ne bo prenašal velikih obremenitev. Vsi nosilci so izdelani po istem principu, in sicer da se popeljejo po glavni karbonski palici.

Nosilca GPS-modula in RX-modula sta skoraj identična, le z malo spremembe zaradi oblike, nosilec ESC-jev nosi vse 4 ECS-je in ker je prostor dopuščal, sem med vsak par ESC-jev namestil hladilnik, ki ni bil nujno potreben, a previdnost in kakšen varnostni ukrep ni nikoli odveč.



*Slika 24: Nosilci GPS, RX-modula in ESC-jev
(Osebni vir)*

Po istem postopku je izdelan nosilec FC, le da pri tem hkrati uporabim M3 navojne inserte, na katere so nameščeni protivibracijski deli, ki bodo zmanjšali vpliv vibracij na FC, ki nastajajo med letom.

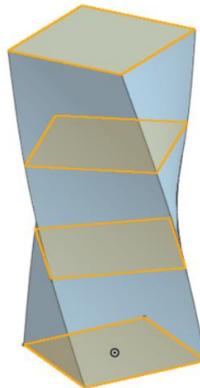


Slika 25: Matek F405 VTOL na nosilcu
(Osebni vir)

5.3 Ohišje

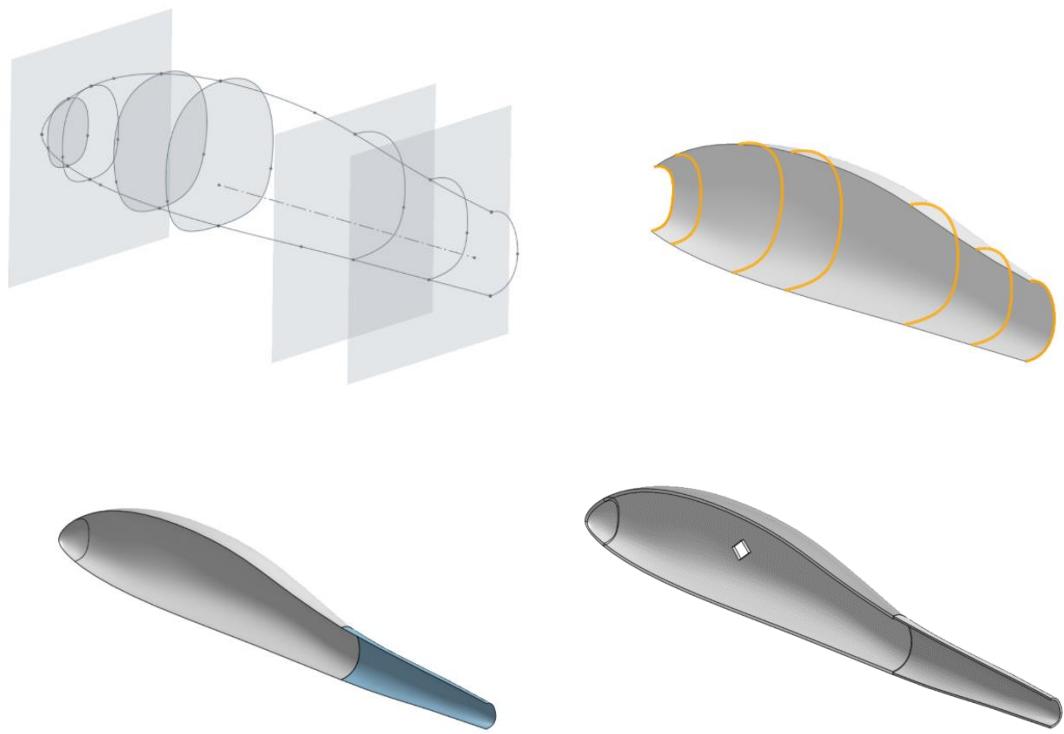
5.3.1 Trup

Za izdelavo trupa sem uporabil funkcijo »loft«, ki izbrane površine ali krivulje gladko poveže med seboj.



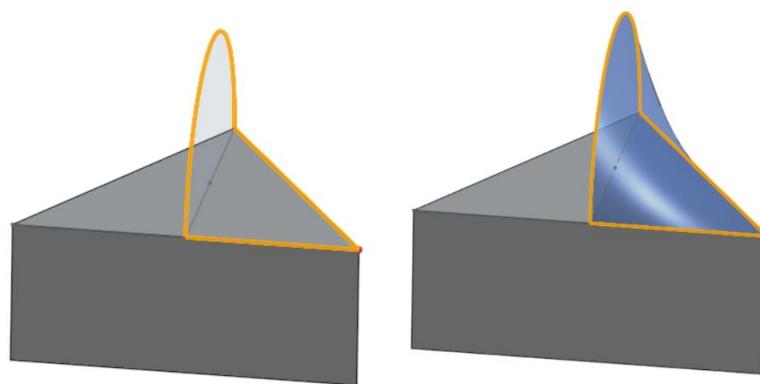
Slika 25: Primer uporabe funkcije "loft"
(Osebni vir)

S to funkcijo sem ustvaril nekaj skic trupa, od katerih so bile nekatere osnovne, druge pa so služile kot vodniki, da je bila generirana površina aerodinamična. Ker sem med sabo povezoval krivulje, je OnShape generiral površino, ne solidnega objekta. Te površine sem pozneje odebnil s funkcijo »thicken«, in sicer za debelino 3 mm, kar je dovolj, da bo tiskani kos dovolj močan.



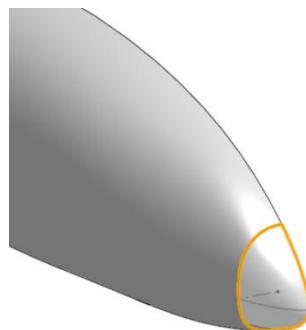
*Slika 27: Izdelava trupa
(Osebni vir)*

Sprednji del trupa je povzročal kar nekaj težav, saj povezuje dve krivulji med seboj. Zaključki teh dveh krivulj se med seboj dotikajo, funkcija »loft« pa takšnim situacijam ni naklonjena. Zaradi tega sem v tem primeru uporabil za to namenjeno funkcijo »fill«, ki med seboj poveže robove ali krivulje, ki morajo biti sklenjeni v enotno verigo.



*Slika 28: Primer uporabe funkcije "fill"
(Osebni vir)*

Tako sem povezal zadnjo krivuljo trupa in eno izmed prej uporabljenih skic. Ker mora biti ta kos maksimalno aerodinamičen, sem za »fill« določil takšne parametre, da je bila generirana površina tangentno povezana s prejšnjo.

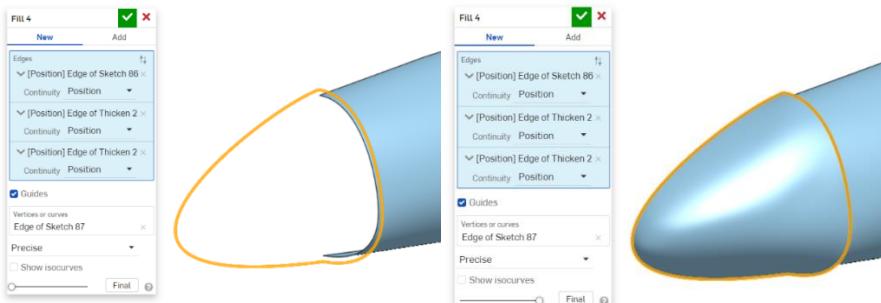


*Slika 29: Izdelava sprednjega zaključka
(Osebni vir)*

Z enakim postopkom je bil izdelan zaključek trupa pri repu.

Ker bi bila izdelava takšnega kosa s 3D-tiskom dolgotrajen proces in tudi, če bi imeli na voljo tako velike tiskalnike, bi bila sestava in ponovna izdelava poškodovanega kosa dolgotrajen proces, sem zato trup razdelil v 6 kosov, ki so tiskani posamezno in se lahko prav tako

zamenjajo. Kose sem razdelil v Ohišje_spredaj, Pokrov, Ohišje_D, Ohišje_L, Ohišje_zadaj_D, Ohišje_zadaj_L in Ohišje_zaključek. Pri prvem prototipu se je izkazalo, da lahko Ohišje_zadaj_D in Ohišje_zadaj_L združim v en kos, ki bi bil stabilnejši in trpežnejši na udarce.



Slika 30: Izdelava zadnjega zaključka
(Osebni vir)



Slika 31: Model celotnega ohišja
(Osebni vir)



Slika 32: Prvi izdelano ohišje
(Osebni vir)

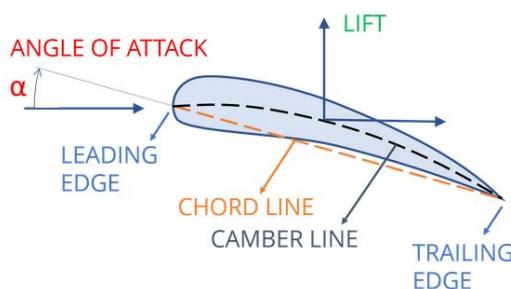
5.3.2 Krila

Izbira aeroprofila je eden izmed najpomembnejših korakov pri načrtovanju letala. Na izbiro profila vplivajo različni faktorji, kot so:

- tip letenja
- hitrost letenja
- naloga letala (tovorno, rekreativno ...)

Aeroprofil delimo na naslednje dele:

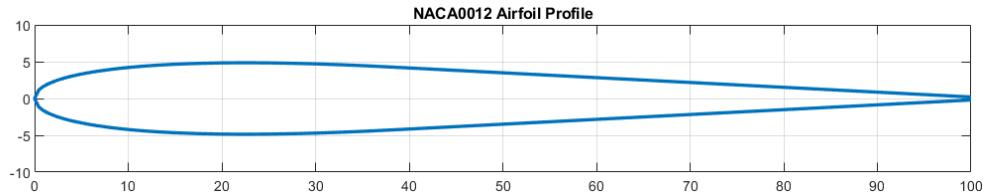
- prednji rob (ang.: leading edge) – na sprednji strani profila
- zadnji rob (ang.: trailing edge) – na zadnji strani profila
- tetiva (ang.: chord line) – ravna črta med prednjim in zadnjim robom
- pregibna linija (ang.: camber line) – središčnica med zgornjo in spodnjo površino
- vpadni kot (ang.: angle of attack) – kot med tetivo in relativno smerjo vetra



Slika 33: Aeroprofil
(Vir: <https://airshaper.com/videos/airfoil-design-for-a-drone/kAXN3MlQxxc>)

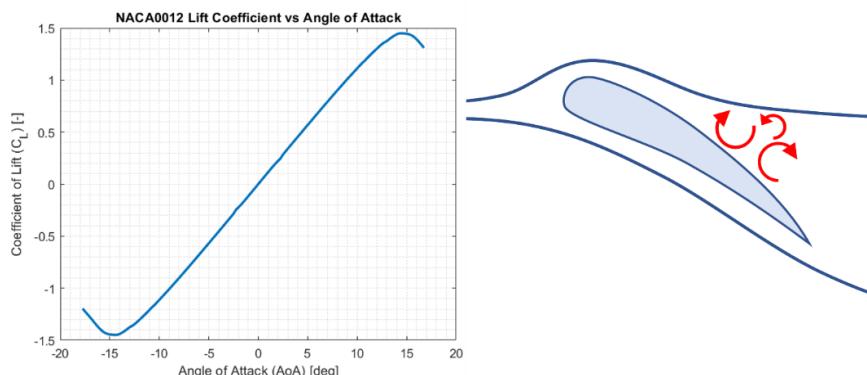
Vzgon (ang.: lift) je sila, ki jo ustvari aeroprofil pravokotno na veter, medtem ko se sila upora (ang.: drag) meri vzdolž smeri vetra. Vzgon nastane, ko aeroprofil »seka« zrak in se po Bernoullijevem principu ustvari območje nizkega tlaka nad krilom in visokega tlaka pod krilom. Posledica razlike v tlaku med obema površinama je tisto, kar ustvarja dvižno silo. Zato

zgornjo in spodnjo površino imenujemo tudi sesalna oz. tlačna površina. Pri tem pa ima prav tako velik vpliv vpadni kot. Za primer uporabimo tipični profil, znan kot NACA0012.



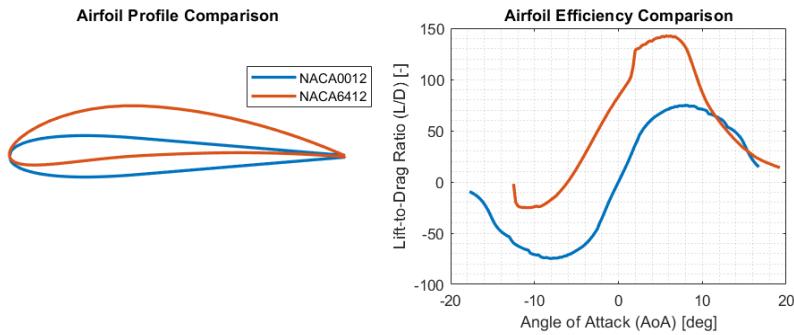
Slika 34: NACA0012 aeroprofil
(Vir: <https://airshaper.com/videos/airfoil-design-for-a-drone/kAXN3MlQxxc>)

NACA0012 je simetričen aeroprofil, ki ustvarja ničelni vzgon pri ničelnem vpadnem kotu. Koeficient dviga narašča z vpadnim kotom, vse do točke padca okoli 15° . To je znano kot točka zastoja krila in je posledica ločitve mejne plasti na sesalni strani. Tipičen primer tega je, ko se letalo med vzletom prehitro dvigne; vstop v območje zastoja in izguba vzgona.



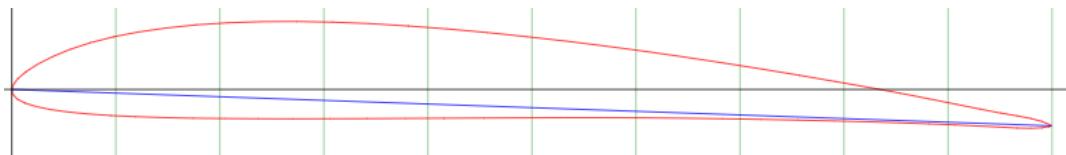
Slika 35: Aeroprofil v območju zastoja
(Vir: <https://airshaper.com/videos/airfoil-design-for-a-drone/kAXN3MlQxxc>)

Prav tako poznamo asimetrične profile, ki generirajo večji vzgon in učinkovitost kot njihovi simetrični primerki. To dosežejo z žrtvovanjem zmogljivosti pri negativnih kotih, kar pomeni, da imajo ožje učinkovito območje. To je prikazano s primerjavo simetričnega NACA0012 z asimetričnim NACA6412.



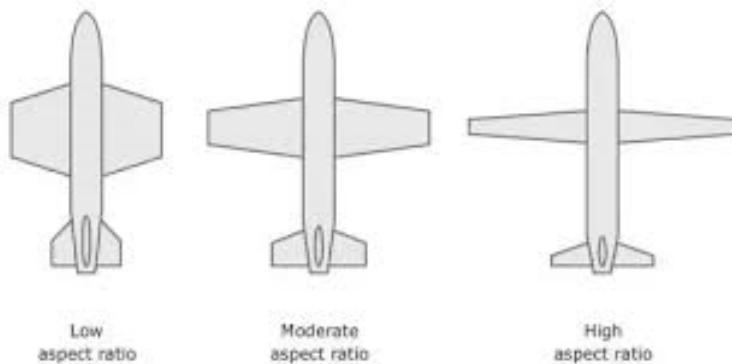
*Slika 36: Primerjava simetričnih in asimetričnih aeroprofilov
(Vir: <https://airshaper.com/videos/airfoil-design-for-a-drone/kAXN3MlQxxc>)*

Sam sem za ta projekt izbral WASP (smoothed) profil.



*Slika 37: WASP (smoothed) aeroprofil
(Vir: <http://airfoiltools.com/plotter/index>)*

Po izbranem profilu je bilo potrebno določiti velikost krila in trupa. Pri tem ima glavno vlogo željeni tip letenja in naloga letenja. Eden izmed teh je Aspect ratio (razmerje med razponom krila in površino krila). Bolj je krilo daljše in ožje, večje je to razmerje. Letala z visokim aspect ratio generirajo večji vzgon pri nižjih hitrostih, a so občutljivejša na turbulence in manj manevrska ter manj stabilna pri višjih hitrostih. Medtem pa letala z nizkim razmerjem proizvajajo manj vzgona, a so stabilnejša in bolj manevrska pri večjih hitrostih. [2]



*Slika 38; Letala z različnim Aspect ratio
(Vir: <https://www.quora.com/Why-do-high-aspect-ratio-wings-lower-maneuverability-of-a-plane>)*

Ker sem želel, da bi lahko letalo letelo kolikor se da efektivno, hkrati pa nisem želel, da bi bilo preveč občutljivo na vetrove, sem se odločil, da bo imelo krilo srednji aspect ratio. Prav tako bi bilo daljše ozko krilo, ki je izdelano iz karbonske palice, na katero so montirani 3D tiskani kosi, težko izdelati tako, da se ne bi med letom upogibalo in med izvajanjem zahtevnih manevrov ne bi zlomilo.

Za izdelavo kril sem ponovno uporabil funkcijo »loft«, le da sem tokrat hkrati uporabil funkcijo »Profile Generator«, ki je generirala izbrani aeroprofil med končnima točkama. Ta ponuja široko izbiro že vnaprej definiranih aeroprofilov kot tudi možnost definiranja poljubnega aeroprofila.

Generirano krilo sem razdelil na 5 kosov zaradi lažje izdelave in menjave poškodovanega kosa, in sicer krilo noter, krilo zunaj1, krilo zunaj2, krilo zunaj3, krilo zunaj4 in krilo zaključek, ki sem ga izdelal z uporabo funkcije loft.

Zaključek na krilu ima pomembno vlogo pri letu, saj se, kot sem prej opisal, med pomikanjem zračne mase po aeroprofilu po Bernoullijevem principu ustvari območje visokega in nizkega zračnega tlaka. Ta razlika med tlakoma ustvari vzgon po krilu, nato pa se ti dve zračni masi na koncu krila ponovno združita in pri tem ne generirata vrtincev. Medtem se na konici krila, kjer ni ničesar, kar bi jih lahko ločevalo, tvorijo vrtinci.



Slika 39: Vidni vrtinci na konicah kril
(Vir: <https://howthingsfly.si.edu/media/wing-tip-vortex>)

Ti ustvarjajo velik upor za letalo in prvi prototipi za preprečevanje teh segajo že v leto 1897, ko so na krilo namestili vertikalni podaljšek, zaradi katerega je morala visokotlačna zračna masa prepotovati večjo razdaljo, da bi se lahko vrtinčila z nizkotlačnim zrakom. Posledica tega so manjši vrtinci na konici krila in manjši upor, kar prinese večjo efektivnost.

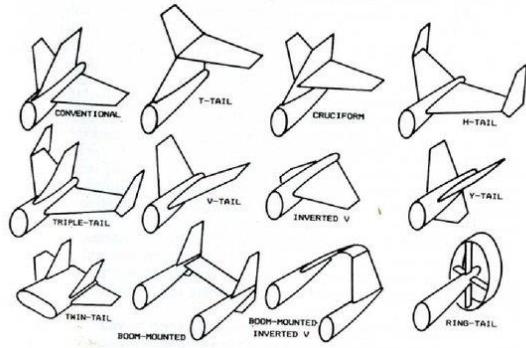


Slika 40: Primerjava vrtincev s podaljški in brez njih
(Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:737-NG_winglet_effect_%28simplified%29.svg)

Pri modelarstvu se vrtinci pogosto zanemarijo in je krilo izdelano brez podaljškov. V raziskovalni nalogi sem prav tako izdelal zaključek krila s podaljškom, ki ga bom pozneje namestil na krilo in tako primerjal, kakšna je razlika v letu in efektivnosti. [17]

5.3.3 Rep

Sledila je izdelava repa letala. Obstaja veliko možnosti za izbiro oblike repa in vsaka ima svoje prednosti. Poznamo največkrat uporabljen konvencionalni rep in druge pogosto uporabljene, kot so T-rep, V-rep, H-rep in mnogi drugi.



Slika 41: Izvedbe repa
 (Vir: <https://www.quora.com/Which-one-do-you-prefer-T-tail-airplane-or-cruciform-tail-airplane>)

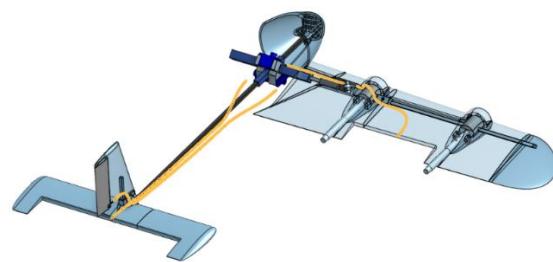
Kot sem omenil, ima vsaka izvedba svoje prednosti in slabosti. Sam sem se odločal med uporabo klasičnega konvencionalnega in V-repa. V-rep je efektivnejši, saj samo z dvema krakoma stabilizira letalo v dveh oseh. S tem ustvari manj upora kot konvencionalni rep, ki potrebuje 3 krake oz. eno vertikalno in eno horizontalno, ki segata na obe strani trupa. Ker pa je krmiljenje V-repa zahtevnejše, sem se odločil za uporabo konvencionalnega.

5.4 Montaža servomotorjev

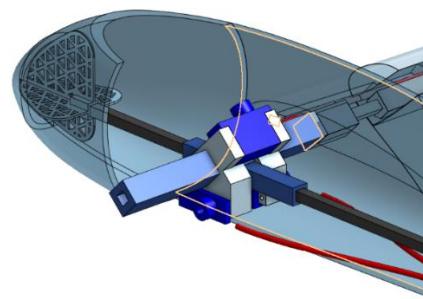
Nato je bilo potrebno načrtovati, kje bodo nameščeni servomotorji in kako bodo prenašali svoje gibanje na zakrilca. V postopku modeliranja sem imel kar nekaj rešitev za dani problem.

5.4.1 Verzija 1

Sprva sem nameraval narediti letalo čim bolj estetsko in aerodinamično, zato sem poizkusil servomotorje popolnoma skriti. Uspelo mi jih je dobro montirati znotraj ohišja. Skozi krila in trup sem napeljal kable, v katerih bi bila žica, ki bi prenašala delo servomotorjev na zakrilca.



Slika 42: Montaža kablov za servomotorje
(Osebni vir)

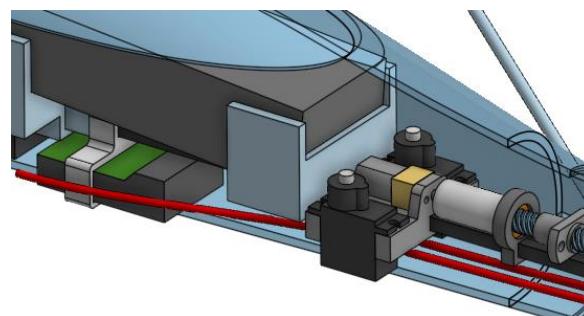


Slika 43: Montaža servomotorjev V1
(Osebni vir)

A v tej postavitvi so servomotorji in njihovi nosilci zavzemali veliko bateriji namenjenega prostora, ki ga že tako ni imela veliko.

5.4.2 Verzija 2

V tej verziji sem spremenil pozicijo repnih servomotorjev za baterijo na isti nosilec, na katerega je pritrjen motor z reduktorjem.

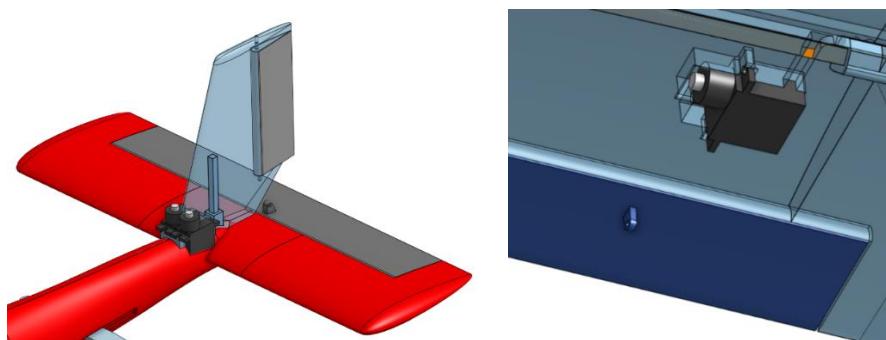


Slika 44: Montaža servomotorjev V2
(Osebni vir)

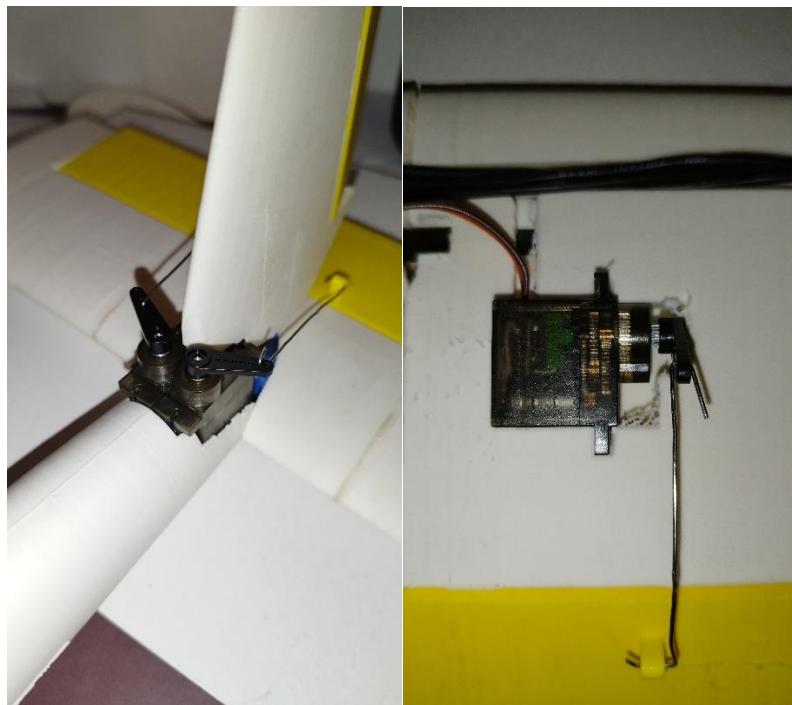
Zadaj so zavzemali prosto mesto, v katerega ni mogla doseči baterija, a je celotna ideja s kabli padla v vodo, ko sem začel iskati za to primerne kable in žice, saj se je izkazalo, da ponovno ni prostora za dovolj močno žico, ki bi lahko vlekla in potiskala zakrilce. Lahko bi se odločil za manjšo žico skupaj s kombinacijo elastike ali vzmeti, ki bi vlekla zakrilce v drugo smer. Prav tako nisem našel primernega prostora za servomotor, ki bi upravljal zakrilca na krilih.

5.4.3 Verzija 3

V zadnji verziji sem pozicioniral servomotorje kolikor se da blizu zakrilc, da se lahko posledično prenaša gibanje servomotorjev direktno na zakrilca z uporabo prenosne palice, ki je najpreprostejši, a hkrati najzanesljivejši sistem. Posledično so sedaj servomotorji delno zunaj ohišja, a to ne bo predstavljal večjega problema pri letu.



*Slika 45: Končna montaža servomotorjev
(Osebni vir)*



*Slika 46: Montaža servomotorjev
(Osebni vir)*

6 IZDELAVA

6.1 Konstrukcija

Kot je bilo zapisano zgoraj, so za konstrukcijo uporabljene karbonske palice, ki so povezane s 3D natisnjenimi kosi.

Najmočneje sta morala biti zasnovana kosa, ki z njunim vrtenjem zložita krilo skupaj. Ker je za en cikel zlaganja kril potreben 130° -obrat, je bilo posledično potrebno obema kosoma odvzeti nekaj materiala. Za to sem najprej izbral karbonski filament, ki je močnejši in lažji kot PLA. A se je ta kos po prvih nekaj testih zlomil in je bilo potrebno poiskati drugo rešitev za ta problem.



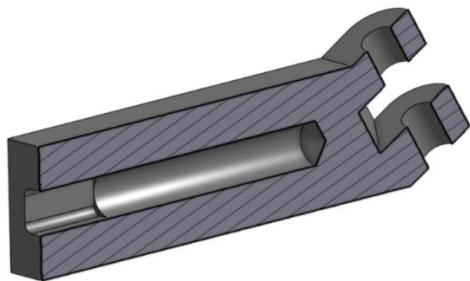
*Slika 47: Zlomljen kos iz karbonskega filamenta
(Osebni vir)*

Ena izmed možnosti je bila izdelava iz kovine z uporabo rezkanja. A tu so se pojavili problemi, kakršnih ni pri 3D-tiskanju. S 3D-tiskom je mogoče izdelati popolnoma kvadratne luknje, v katere bi se vstavile karbonske palice. Pri rezkanju je mogoče izdelati kvadratne luknje le takšne dolžine, kot je frezalo in vsi robovi vsebujejo radij frezala. Prav tako je skoraj nemogoče izdelati krivulje, do katerih ni mogoče vertikalno dostopati. Posledično je bilo potrebno spremeniti, kje in kako bomo omogočili, da se bosta ta dva kosa zavrtela za 130° in kako ju bomo namestili na karbonske palice.

Najprej se je bilo potrebno lotiti problema, kako omogočiti kosoma 130° -obrat. Pri 3D tiskanem kosu se je lahko kosa kar zavrtelo in odstranilo odvečni material.

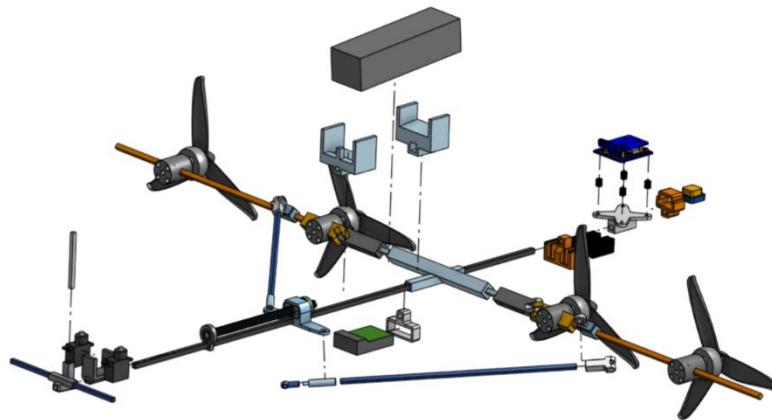
Ker pri rezkanju ne moremo doseči takšnih oblik, je bilo potrebno kosa zasnovati tako, da bi lahko, v idealnem primeru, frezalo šlo enkrat skozi surovec in bi bila ta rotacija omogočena. To sem dosegel z odvzemom materiala na obeh kosih pod kotom 50°

Uporaba svedra pri izdelavi luknje za palico ne bi bila najboljša rešitev, saj s tem ni mogoče fiksno pozicionirati krila, kar pa je nujno potrebno. Lahko se je izvrtala luknja s svedrom premera 5 mm in se je nato, kolikor se je dalo, izdelalo kvadratno luknjo. Tako je bilo možno izdelati kvadratno luknjo globine 10 mm z radijem 1 mm na robovih. Tako kvadratna luknja prepreči rotacijo med palico in tem kosom, okrogla luknja pa podpira kvadratno pri prenašanju sil in momentov.



*Slika 48: Rešitev problema z luknjo
(Osebni vir)*

Ostali kosi so lahko bili izdelani iz PLA in sem jih po potrebi zbrusil, da so se lahko pomikali po karbonskih palicah ali vstavil ležaje v tiste, ki bodo opravljali rotacijsko gibanje, ki mora gladko teči.

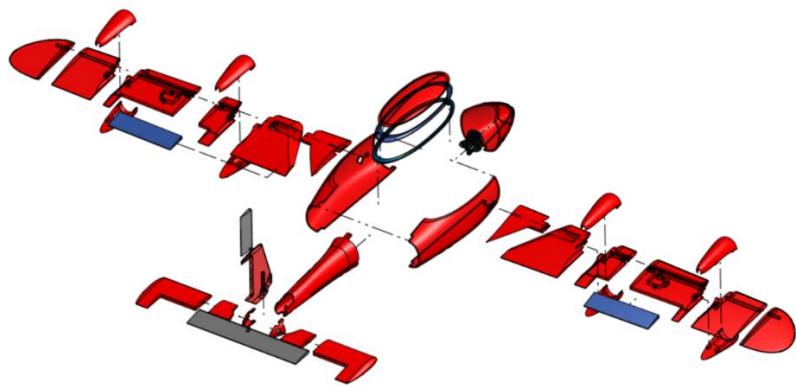


*Slika 49: Konstrukcija
(Osebni vir)*

6.2 Ohišje

Za izdelavo ohišja sem izbral LW-ASA-material, ki sem ga opisal zgoraj, saj je izjemno lahek in kljub temu dovolj močan, da se bo obdržal na ohišju. Hkrati je tudi odpornejši na temperaturo in UV-svetlobo, kar je pomembno, da ne bo sčasoma po nekaj poletih material oslabel in se, v najhujšem primeru, deformiral in zlomil.

Na spodnji sliki je prikazan eksplozijski pogled ohišja, na katerem so kosi obarvani z rdečo in izdelani z LW-ASA-materialom.



*Slika 50: Eksplozijski pogled ohišja
(Osebni vir)*

Sprva sem tudi zakrilca izdelal z LW-ASA, a so se že v fazi testiranja kaveljčki, preko katerih jih upravljajo servomotorji, zlomili. Te sem poizkusil izdelati iz drugega materiala in bi jih pozneje namestil na zakrilca, a se je počasi nabirala zračnost in zakrilca niso bila več fiksno pozicionirana. Te sem pozneje v celoti izdelal iz PLA, ki je bi dovolj močan.



*Slika 51: Zakrilca iz LW-ASA in PLA
(Osebni vir)*

Ker sem letalo skoraj v celoti natisnil doma, sem moral uporabljati funkcijo »raft«. Zaradi tega je bilo potrebno odrezati raft podlago stran od kosa, pri čemer se je velikokrat kos malo odlomil. Ker se je en kos v povprečju tiskal 5 ur, sem višek te podlage odpilil in tisto, kar se je odlomilo, zapolnil z mešanico moke in sekundnega lepila. Pri tem sem nanesel malo preveč materiala, ki sem ga pozneje odstranil s piljenjem, da zagotovo ni bilo delov s premalo materiala (jamic).



*Slika 52: Luknja pred in po lepljenju
(Osebni vir)*

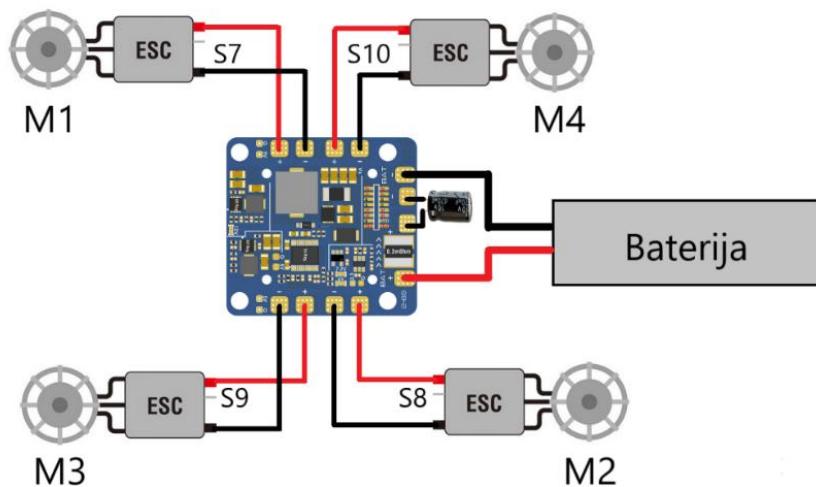


*Slika 53: Izdelano ohišje
(Osebni vir)*

6.3 Vezava elektronike

Nato je bilo potrebno povezati elektroniko med seboj s spajkanjem motorjev na ESC-je, pri čemer je bilo potrebno vsak motor testirati, ali se vrti v pravo smer in po potrebi samo zamenjati dve fazi. Prav tako sem namesto direktnega spajkanja komponent na FC namestil konektorje, ki bodo omogočili lažji priklop in menjavo komponent.

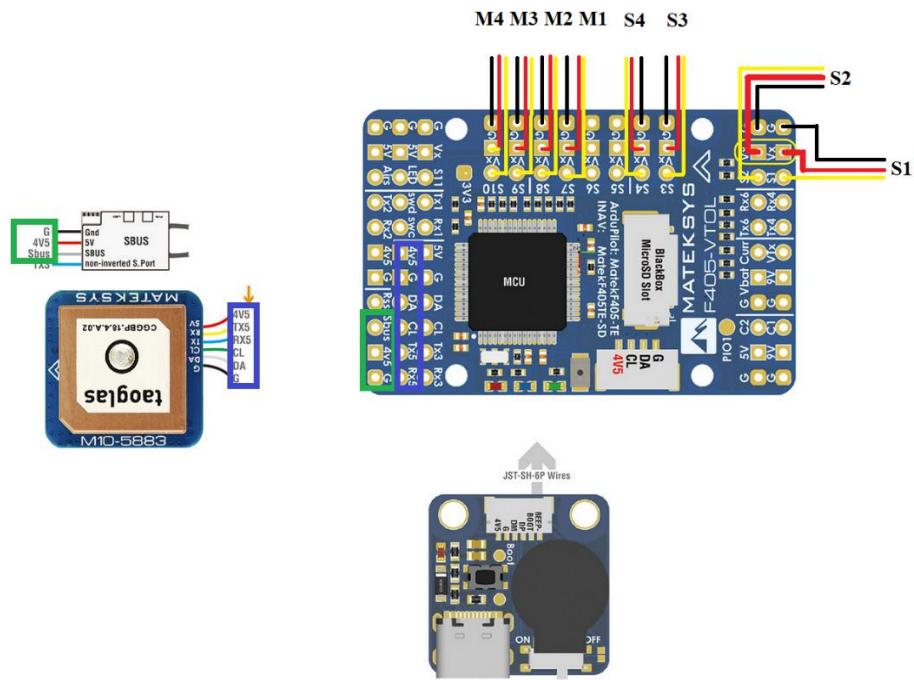
Matek F405 VTOL delimo na dva dela, ki bi ju lahko poimenovali napajalni in krmilni del. Na napajalni del je potrebno priključiti baterijo in ESC-je. Poleg tega je priporočljiva vezava kondenzatorja med pozitivnim in negativnim priklopom, saj s tem zgladimo špice in padce napetosti, ko motorji nenadoma porabijo veliko količino energije. S tem ima krmilni del konstantno napetost za svoje delovanje.



*Slika 54: Priključitev napajalne plošče
(Osebni vir)*

Na krmilni del je bilo potrebno priključiti servomotorje, krmilne kable ESC-jev, Rx modul, GPS-modul in priključiti USB priklopni del, s katerim povežemo FC in računalnik, katerega se priklopi na za to pripravljen JST-SH-6P konektor.

Pri tem je treba biti pazljiv, da ne napravimo kratkega stika in tako uničimo kakšno komponento. Tako se je pojavil problem v fazi testiranja priključitve in delovanja motorjev, ko se eden izmed motorjev ni vrtil. Tako sem odspajkal motor z ESC-ja in ga priključil na drugi delujoci ECS. S tem ko se je motor uspešno začel vrteti, sem odkril, da je prvi ESC pokvarjen in da se je tudi segreval, medtem ko je bil priključen na napetost. K sreči sem imel doma neuporabljen ESC iz prejšnjih projektov, ki bo zadostoval za testiranje med čakanjem na pošiljko novega.



Slika 55: Vezava krmilnega dela
(Osebni vir)

7 KALIBRACIJA LETALSKEGA KRMILNIKA

Izbrani FC je bilo potrebno le še kalibrirati, da bo lahko vzletel in letel kot dron, ob preklopu stikala izvedel transformacijo in letel naprej kot letalo. Tukaj imamo ponovno več možnosti. Lahko bi sami izdelali FC z uporabo mikrokrmilnika ali mikroračunalnika. Ta metoda je cenejša, a hkrati zelo zamudna in nezanesljiva. Lahko pa uporabimo vnaprej izdelan FC, ki je dražji in z uporabo namenskega programa določimo potrebne parametre. Sam sem zato izbral programsko okolje ArduPilot, ki je priljubljen program za uporabo VTOL ali avtonomnih poletov, kot tudi voženj ali plovb. ArduPilot je programska oprema za nadzor letenja, tako kot Betaflight in iNav. Za uporabo te programske opreme je potrebno uporabiti še en program, in sicer Mission Planner, ki je namenjen upravljanju iz baze in dostopu do ArduPilot parametrov.



Slika 56: Začetna stran Mission Planerja
(Osebni vir)

Ker je konfiguracija FC za VTOL-polete zahtevna, bom v tej raziskovalni nalogi predstavil le najpomembnejše nastavitev.

Najprej je potrebno FC konfigurirati tako kot za navadno letalo. To vključuje določitev kanalov za prostorske stopnje letala, kot so pitch, roll in yaw .



Slika 57: Prostostne stopnje letala
(Vir: [https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_\(mechanics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_(mechanics)))

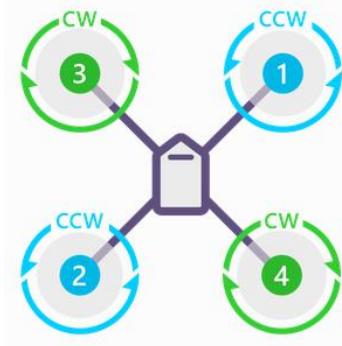
Radijski upravljalnik pošilja RX-enoti položaj palic in stikal. Pri tem proizvajalec sam določi, katera palica in katero stikalo predstavlja določen kanal.

Ker je bil izbrani radijski upravljalnik kalibriran po standardih in sem tudi sam žezel avikopter upravljati po nezapisanih pravilih, sem lahko obdržal privzete nastavitve FC, pri čemer plin nadzira kanal 3, roll kanal 1, pitch kanal 2 in yaw kanal 4. S temi štirimi kanali upravljamo prostorske stopnje letala.

Poleg teh kanalov potrebujemo varnostni kanal (ang.: arm/dissarm switch). Z njim onemogočimo vrtenje motorjev ali delovanje določenih PWM-izhodov, dokler z njim ne potrdimo varnosti. Sam sem izbral kanal 5, ki ga nadzira skrajno levo stikalo, saj je najdostopnejše z roko in lahko v primeru kakršnihkoli težav takoj preklopimo stikalo in izključimo motorje.

Ko imamo nastavljene parametre za let kot letalo, se lahko posvetimo VTOL-nastavitevam. Do teh dostopamo s parametrom Q_ENABLE, ki ga je potrebno nastaviti na vrednost 1, s čimer lahko dostopamo do ostalih VTOL-parametrov.

Zatem je potrebno določiti, kako so pozicionirani motorji v dron načinu. To nastavimo s parametrom Q_FRAME_CLASS. Ker nam quad X konfiguracija najbolj ustreza, lahko ta parameter pustimo na vrednosti 1.



Slika 58: Quad X konfiguracija
(Vir: <https://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html#connect-escs-and-motors>)

Ko so nastavljeni vsi parametri, je potrebno le še napraviti nekaj kalibracij, kot so žiroskopi, PWM-izhodi itd.

Za kalibracijo žiroskopov je potrebno postaviti FC v položaje, ki jih zahteva. Nato sledi kalibracija kompasa, pri čemer je potrebno FC in GPS obrniti v smer letenja in ju skupaj vrteti v vseh oseh. Zatem sledi kalibracija radijskih kanalov. Pri tej kalibraciji je potrebno vse kanale postaviti v končne pozicije, da FC ve, kdaj določen kanal doseže minimalno oz. maksimalno vrednost. Nato sledi določitev funkcij posameznih GPIO-izhodov. Tukaj izberemo, na kateri izhod je priključen določen servomotor ali ESC. Ko izberemo, katero funkcijo upravlja GPIO-izhod, ga po potrebi obrnemo ali prilagodimo končne vrednosti.

#	Position	Reverse	Function	Min	Trim	Max
1	1475	<input type="checkbox"/>	RapAuto	1100	1500	1850
2	1550	<input type="checkbox"/>	RapAuto	1100	1500	2000
3	1373	<input type="checkbox"/>	Rudder	900	1370	2000
4	1211	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevator	900	1211	1847
5	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	800	1555	1900
6	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	800	1500	1900
7	1000	<input type="checkbox"/>	Motor1	1000	1000	2000
8	1000	<input type="checkbox"/>	Motor2	1000	1000	2000
9	1000	<input type="checkbox"/>	Motor3	1000	1000	2000
10	1000	<input type="checkbox"/>	Motor4	1000	1000	2000
11	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
12	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900

Slika 59: Določitev servo izhodov
(Osebni vir)

3–10 izhodi se nahajajo posebej na FC-ju. Najprej sem se odločil za uporabo teh, saj se izhodi 1, 2, 11 in 12 nahajajo ločeno od ostalih v senzorskem in napajальнem delu letalskega krmilnika. Nisem želel tvegati, da bi zaradi neprevidnosti ali nepozornosti priključil servomotor na kakšen

drug izhod. V najboljšem primeru bi se pokvaril samo servomotor, v najslabšem pa letalski krmilnik, česar si nisem želet.

Zatem je potrebno kalibrirati ESC-je, da zagotovimo, da letalski krmilnik uporablja pravilni ESC-protokol. ESC-ji se kasneje, ob vsakem priklopu baterije, sami kratko kalibrirajo.

Za tem je potrebno le nastaviti načine letenja. Za to sem izbral tri pozicijsko stikalo kjer uporabljam ročni način za letalski način, QHOVER za letenje kot dron in QLAND za pristajanje in vzletanje kot dron.

[3]

8 Stroški materialov

Stroške za izdelavo aviokopterja so bili naslednji:

- Matek F405-VTOL, 76,79 €
- Matek GPS GNSS & Kompas M10Q-5883, 51,16 €
- radijski upravljalnik z RX-modulom, 88,16 €
- 4 x 45A ESC, 43,35 €
- karbonske palice (5 mm x 5 mm in 4 mm x 4 mm), 35,30 €
- LW-ASA filament, 61,40 €
- EMAX ECO II 2807 1300 KV motorji, 101,86 €
- 4S 4200 mAh 60C lipo bateriji, 68,40 €
- 2 kompleta Gemfan 7050 propelerjev, 7,94 €
- servomotorji, 26,21 €
- kroglični zglobi, ležaji, navojna palica, navojni inserti, 44,66 €
- poštnine, 100,56 €

Kar skupaj nanese 705,79 €

9 Analiza hipotez

- 1 Letalo bo v celoti izdelano doma ali v šoli. To hipotezo sem potrdil, saj je bil aviokopter v celoti izdelan doma in v šoli, če prezremo mehanizem za zlaganje kril. ✓
- 2 Uporabljena bo samo tehnologija 3D-tiska. Hipotezo potrdil saj sem aviokopter v večini 3D natisnil doma, z izjemo nekaj večjih kosov v šoli. ✓
- 3 Zmodeliral bom model v programskem okolju OnShape v manj kot 100 urah. To hipotezo lahko potrdim, saj sem z beleženjem dela pri osnovnem konstruiranju zabeležil 80 ur dela, kar ni realno število, saj nisem beležil vsakega vračanja k modeliranju med postopkom izdelave in testiranja. A kljub temu vse ure ne presegajo dane hipoteze 100 ur. ✓
- 4 Vsi skupni stroški materialov ne bodo presegli 500 €. Hipotezo lahko ovržem, saj so vsi skupni stroški znašali 705,79 €. To je precej več od pričakovane vsote 500 €. ✗
- 5 Letalo bo zmožno leteti vsaj 10 minut. Hipotezo lahko teoretično potrdim, saj bi moral aviokopter po izračunih leteti do 12 minut. Tega nisem mogel testirati in potrditi v praksi zaradi problemov pri izdelavi zglobov za zlaganje kril in ker sem teste izvajal z izposojeno 3S baterijo, saj v času testiranja in pisanja te naloge niso prispele izbrane 4S baterije. Zaradi tega bi tudi v praksi motorji proizvajali manj potiska in bi bili potrebni večji tokovi za ohranjanja aviokopterja v zraku, kar bi posledično hitreje izpraznilo baterijo. ○

10 ZAKLJUČEK

Celotno raziskovalno delo je bilo zelo zanimivo, saj sem imel na njegovem začetku malo potrebnega znanja s področij aerodinamike, 3D-tiska, uporabe letalskih krmilnikov itd. To je bil zame velik izziv, ki je terjal veliko ur prostega časa. A kljub vsem težavam sem zadovoljen s končnim izdelkom, ki ima uporabno vrednost in ga bom v prihodnosti nadgrajeval ter izboljševal. Najbolj se bom posvetil 5. hipotezi in ga poizkusil izdelati ceneje.

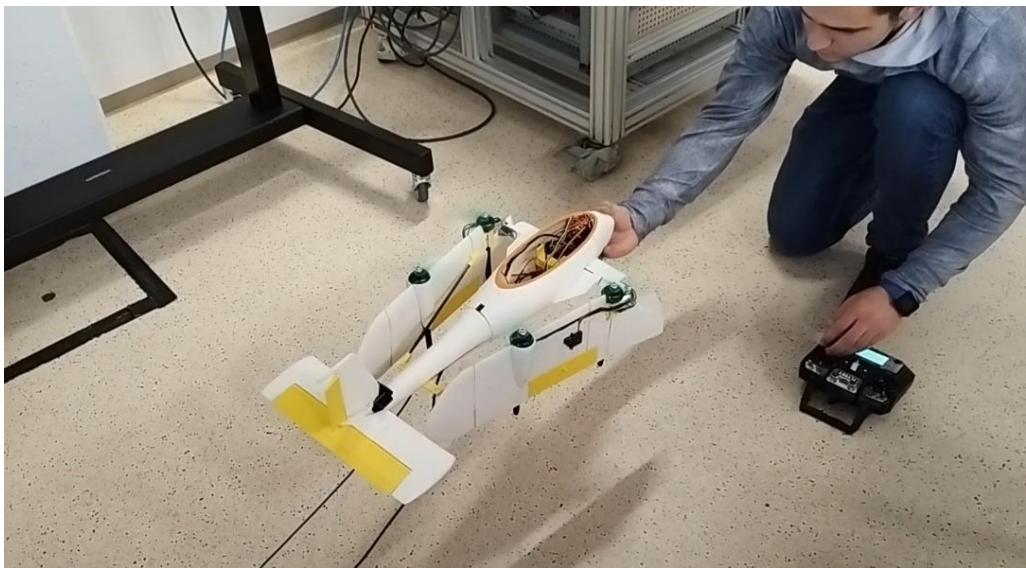
Ko sem med izdelavo reševal nastale težave, sem prav tako prišel do nekaj idej, s katerimi bi lahko nadgradili aviokopter. Ena izmed teh je bila uporaba petega motorja z večjim propelerjem, bolj prilagojenim letalom, ki bi deloval med letenjem kot letalo, medtem pa bi bili osnovni štirje motorji na krilih izklopljeni in bi se ponovno vklopili le med letenjem kot dron. S tem bi bili tokovi manjši, kar bi podaljšalo čas letenja.



*Slika 60: Aviokopter v letalskem načinu
(Osebni vir)*



*Slika 61: Aviokopter v dron načinu
(Osebni vir)*



*Slika 62: Testiranje motorjev
(osebni vir)*



*Slika 63: Testiranje
(osebni vir)*

11 VIRI IN LITERATURA

- [1] 3D printing solutions. Kako tiskati ASA filament (online). (citirano 20.1. 2024).
Dostopno na naslovu: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/User-Guides/how-to-3d-print-asa-filament>
- [2] Airshaper. Oblikovanje aeroprofila za dron (online). (citirano 15. 1. 2024).
Dostopno na naslovu:
<https://airshaper.com/videos/airfoil-design-for-a-drone/kAXN3MlQxxc>
- [3] Ardupilot. Nastavitev kvadroplana (online). (citirano 20. 2. 2024).
Dostopno na naslovu:
<https://ardupilot.org/plane/docs/quadplane-setup.html>
- [4] ColorFabb. LW-ASA (online). (citirano 20. 1. 2024).
Dostopno na naslovu:
<https://colorfabb.com/lw-asa-naturel>
- [5] Easy komposites. Karbonska palica (online). (citirano 15.1.2024)
Dostopno na naslovu:
<https://www.easycomposites.eu/5mm-Carbon-Fibre-Square-Rod>
- [6] Emax, Emax. ECO II 2807 (online). (citirano 26. 2. 2024)
Dostopno na naslovu:
<https://emaxmodel.com/collections/eco-series/products/pre-order-emax-eco-ii-series-2807-1300kv-1700kv-1500kv-brushless-motor-for-rc-drone-fpv-racing#>
- [7] Filament2print. Najlon-PA (online). (citirano 20.1.2024)
Dostopno na naslovu:
<https://filament2print.com/gb/nylon-pa/1043-polymide-pa-cf.html>
- [8] Javna Agencija Republike Slovenije za civilno letalstvo. Brezpilotni zrakoplovi (online). (citirano 6.1.2024).
Dostopno na naslovu:
<https://wwwcaa.si/brezpilotni-zrakoplovi.html>
- [9] Javna Agencija Republike Slovenije za civilno letalstvo. Registracija in usposabljanje A1 in A3 (online). (citirano 6. 1. 2024).
Dostopno na naslovu:
<https://wwwcaa.si/registracija-in-usposabljanje-a1a3.html>

[10] Mark forget. PLA, ABS, najlon (online). (citirano 21.12.2024).

Dostopno na naslovu:

<https://markforged.com/resources/blog/pla-abs-nylon>

[11] MatekSYS. M10Q-5883 (online). (citirano 23. 2. 2024).

Dostopno na naslovu:

<https://www.mateksys.com/?portfolio=m10q-5883#tab-id-2>

[12] MatekSYS. Matek F405 VTOL (online). (citirano 23. 2. 2024).

Dostopno na naslovu:

<https://www.mateksys.com/?portfolio=F405-vtol#tab-id-4>

[13] Oscar Liang.: Motorji (online). (citirano 25. 1. 2024).

Dostopno na naslovu:

<https://oscarliang.com/motors/>

[14] Power sonic. C rating (online). (citirano 27. 2. 2024).

Dostopno na naslovu:

<https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/>

[15] Tytorobotics. Kaj je ESC in kako deluje (online). (citirano 26. 2. 2024).

Dostopno na naslovu:

<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/what-is-an-esc-how-does-an-esc-work>

[16] Wikipedija, Polimlečna kislina (online). (citirano 19. 1. 2024).

Dostopno na naslovu:

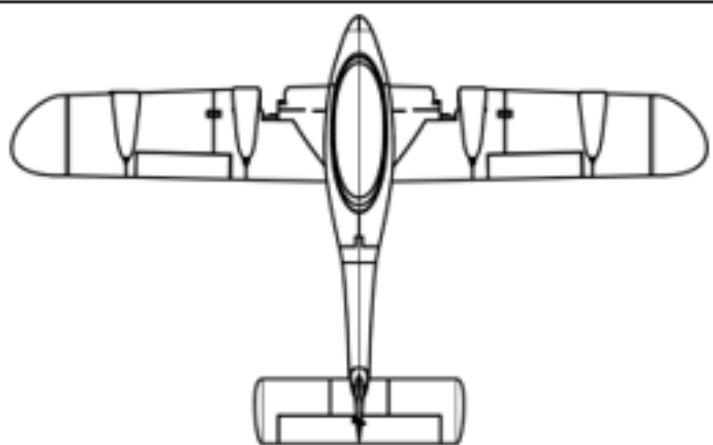
https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid

[17] Wikipedija. Vrtinci konič kril (online). (citirano 12. 1. 2024).

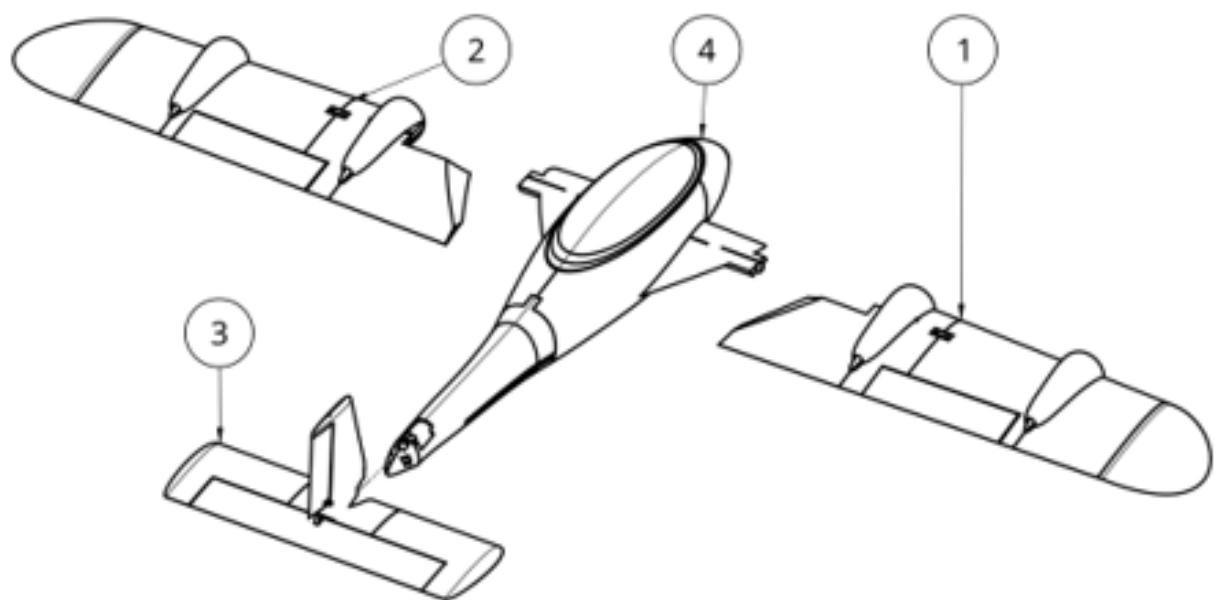
Dostopno na naslovu:

https://en.wikipedia.org/wiki/Wingtip_vortices

12 PRILOGE

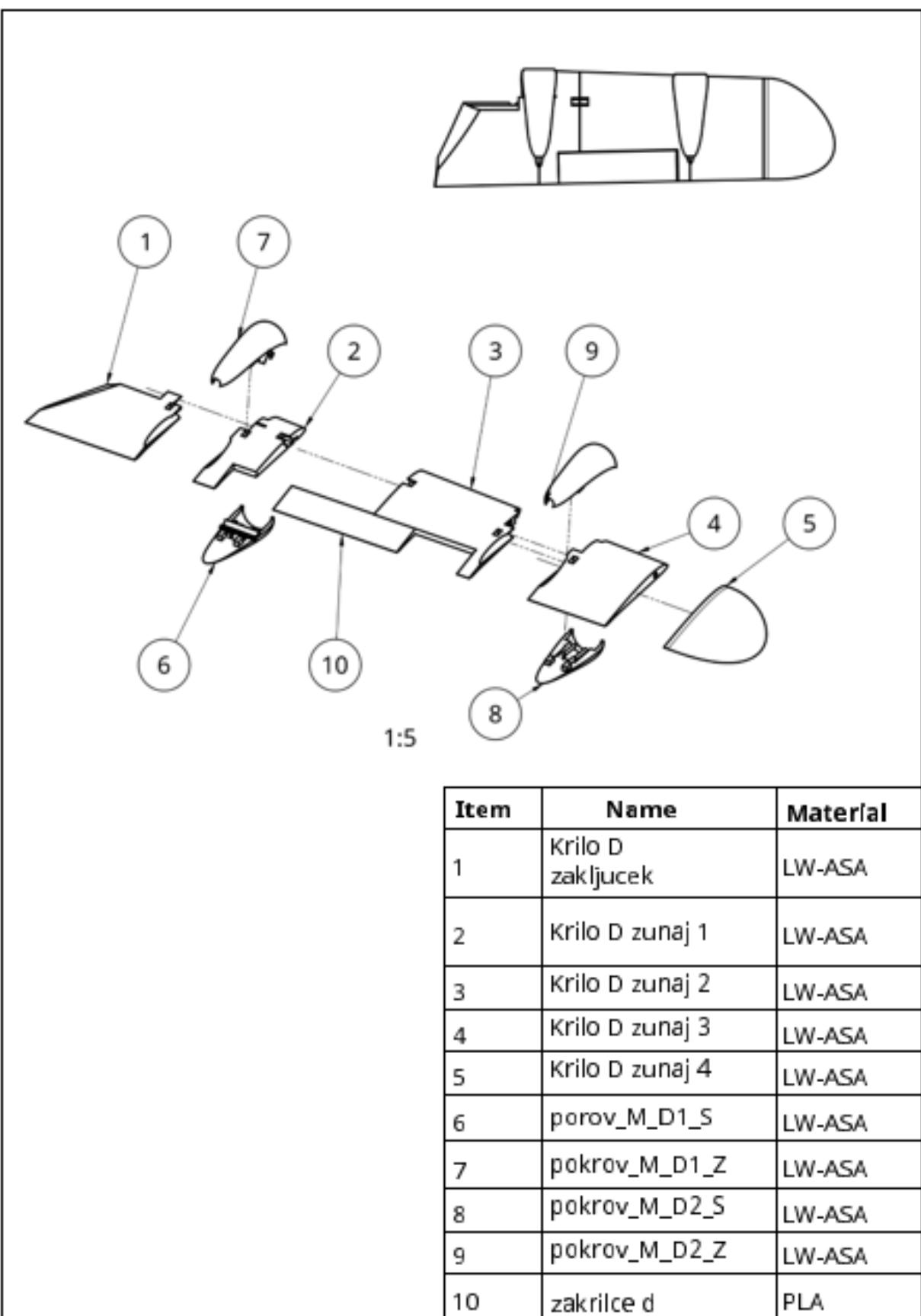


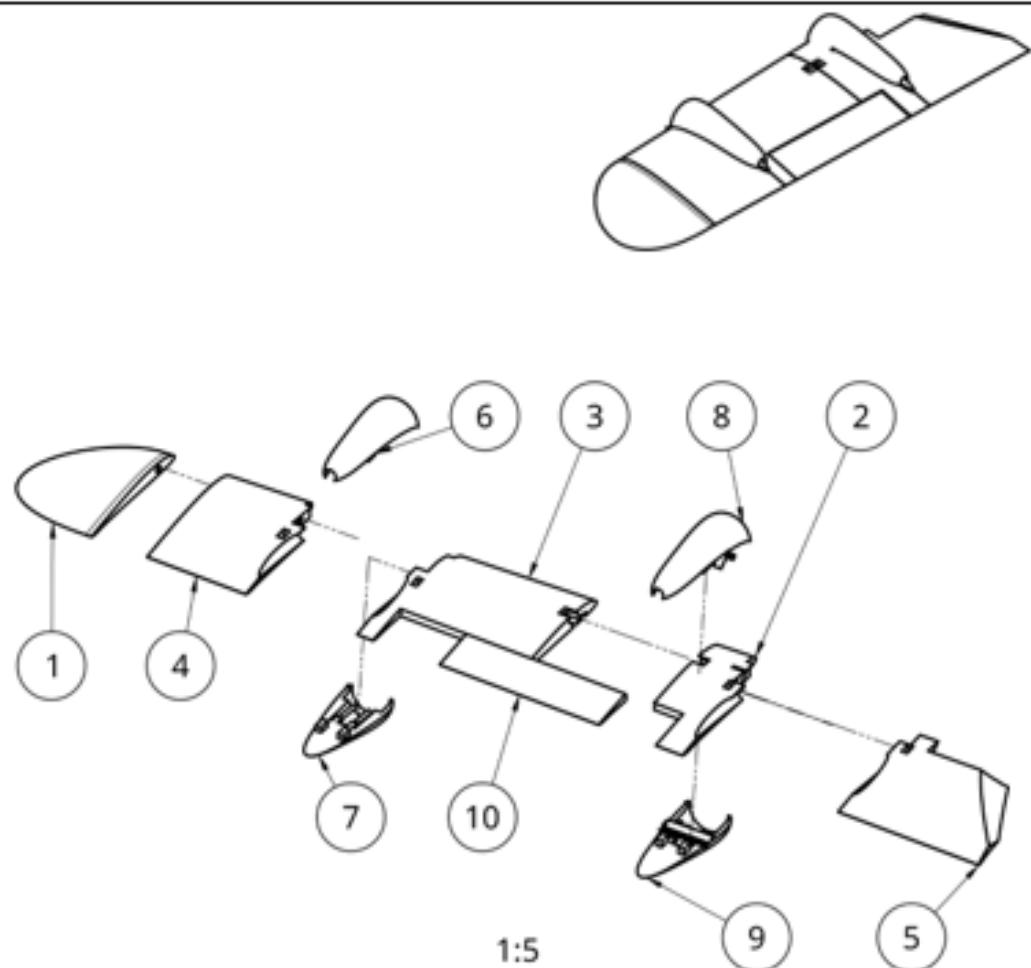
1:10



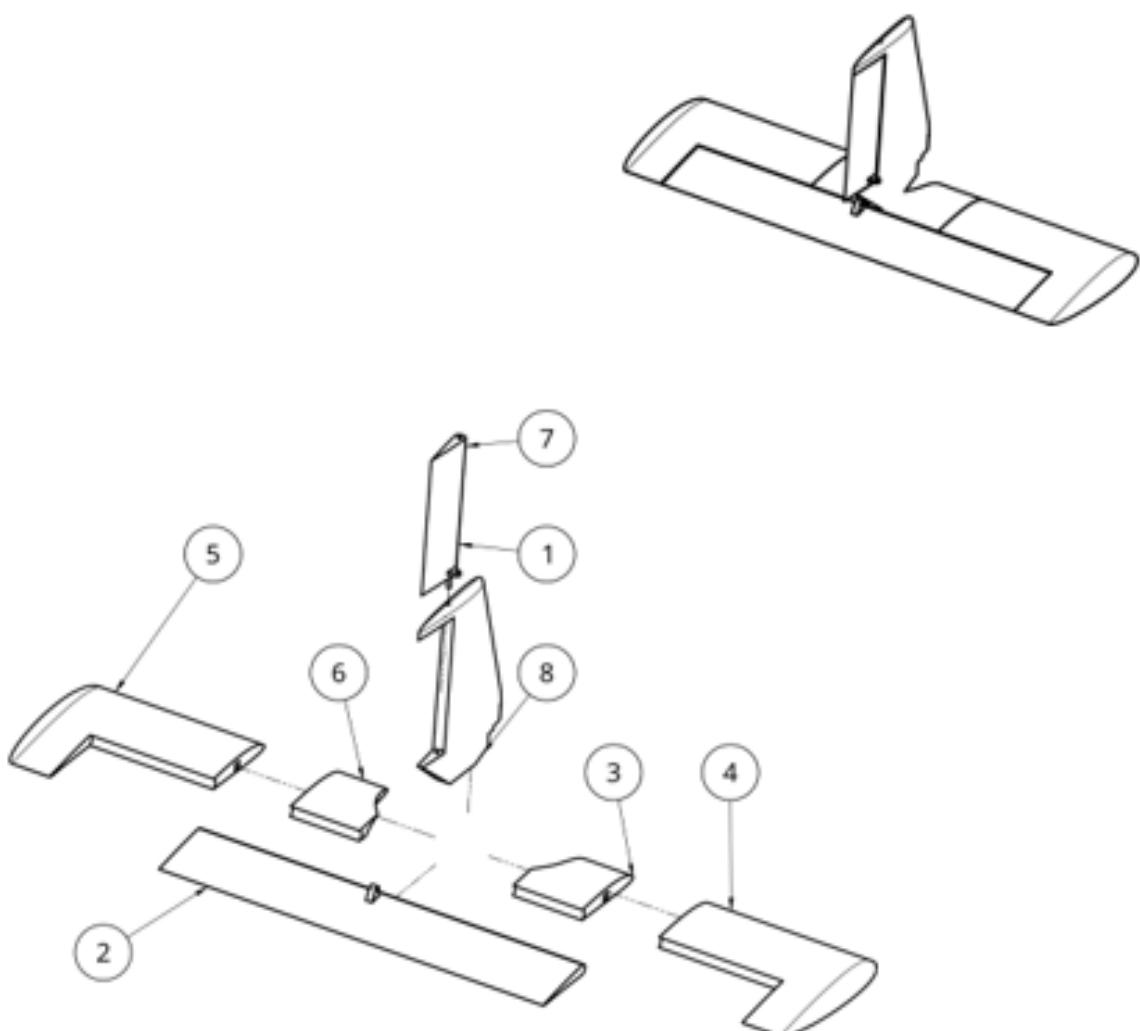
1:6

Item	Name
1	Desno krilo
2	Levo krilo
3	Rep
4	Trup



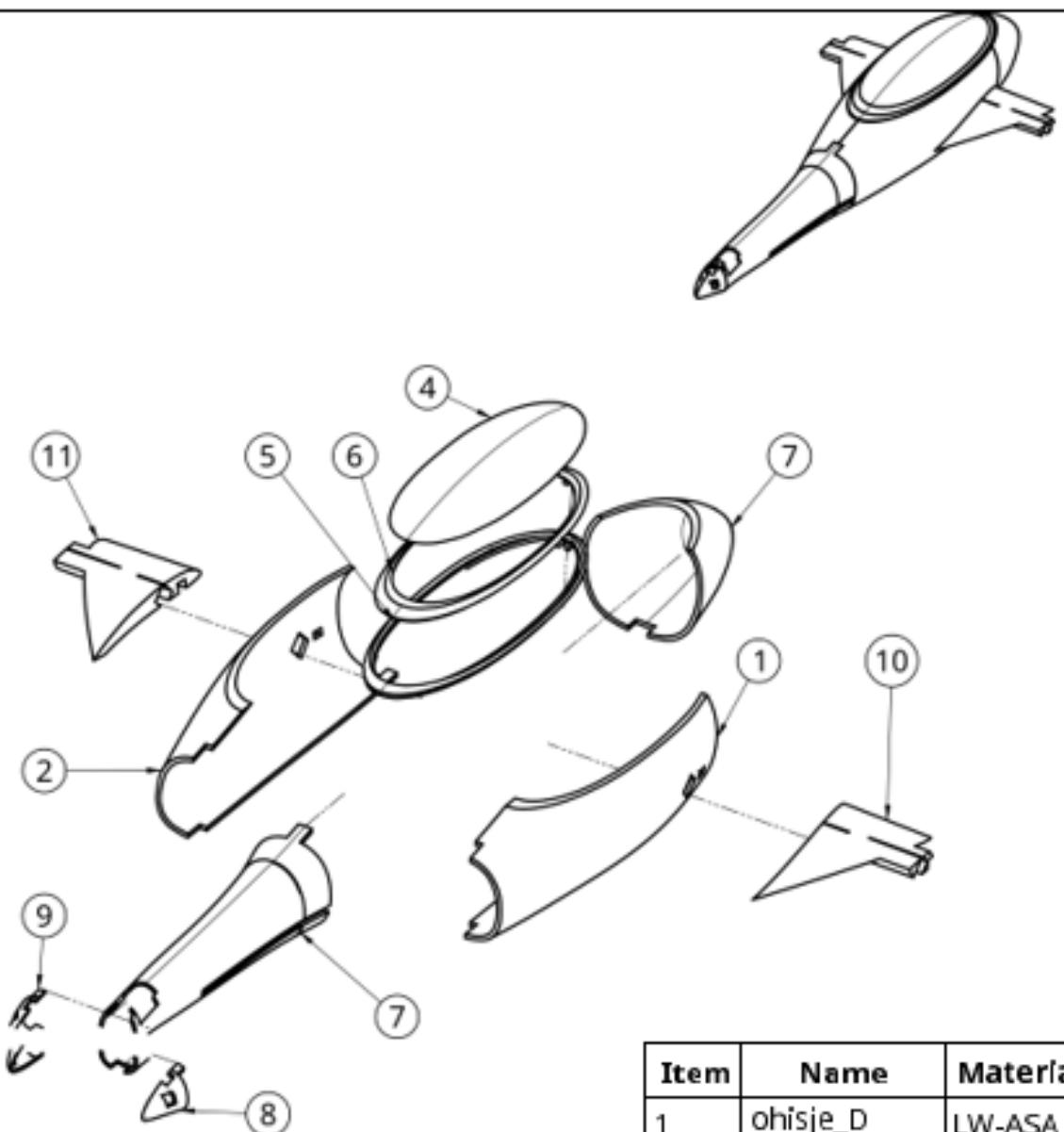


Item	Name	Material
1	krilo_zakljucek_L	LW-ASA
2	krilo_zunaj2_L	LW-ASA
3	krilo_zunaj3_L	LW-ASA
4	krilo_zunaj4_L	LW-ASA
5	Krilo L zunaj	LW-ASA
6	Pokrov_M_L2_Z	LW-ASA
7	Pokrov_M_L2_S	LW-ASA
8	Pokrov_M_L1_Z	LW-ASA
9	Pokrov_M_L1_S	LW-ASA
10	Zakrilce_L	LW-ASA



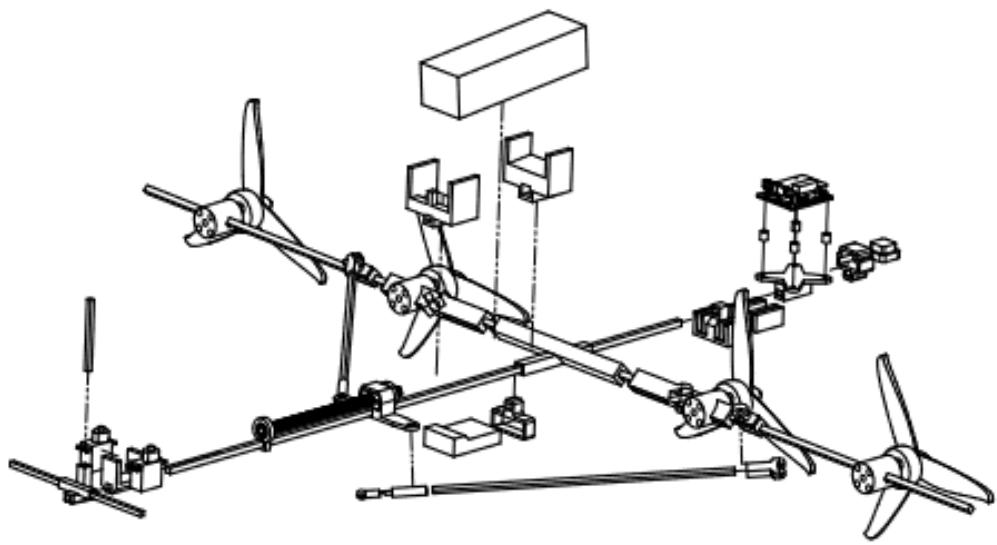
1:3

Item	Name	Material
1	palica_stab_rep_V	
2	stabilizer_H2	PLA
3	stabilizer_H_D	LW-ASA
4	stabilizer_H_D	LW-ASA
5	stabilizer_H_L	LW-ASA
6	stabilizer_H_L	LW-ASA
7	stabilizer_V2	PLA
8	stabilizer_V	LW-ASA

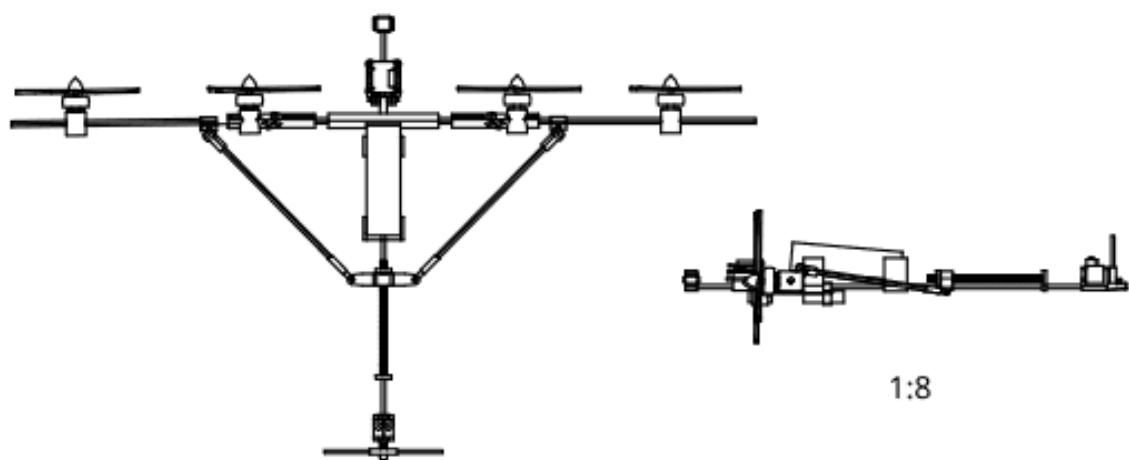


1:4

Item	Name	Material
1	ohisje_D	LW-ASA
2	ohisje_L	LW-ASA
3	ohisje_zadaj	LW-ASA
4	pokrov	LW-ASA
5	pokrov_z	PLA
6	pokrov_z2	PLA
7	spredaj	LW-ASA
8	zaključek_D	PLA
9	zaključek_L	PLA
10	Krilo noter	LW-ASA
11	krilo_noter_L	LW-ASA



1:5



1:8

1:8