

Analiza mehanizma mahokriline letjelice oblika vilinskog konjica

Hrgarek, Ania

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:461192>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ania Hrgarek

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Dario Zlatar, mag. ing.

Student:

Ania Hrgarek

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Zlataru na prenesenom znanju, uloženom vremenu i korisnim savjetima tijekom pisanja ovog završnog rada. Također, zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju kroz cijelo razdoblje studija.

Ania Hrgarek



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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ania Hrgarek** JMBAG: **0035219766**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mehanizma mahokriline letjelice oblika vilinskog konjica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of dragonfy-like flapping wing vehicle mechanism**

Opis zadatka:

Mahokriline UAV letjelice koje koriste uzgonske i propulzijske značajke mahokrila insektnog tipa, tijekom posljednjih godina privlače velik interes istraživača. Interes se zasniva na mogućnosti osnivanja letjelica malih dimenzija, povoljnije energetske učinkovitosti, niske razine buke, visoke manevarske sposobnosti, mogućnosti vertikalnog polijetanja i slijetanja te lakšeg uklapanja u okoliš, što čine ovakve letjelice optimalnim sredstvom za zadaće izviđanja u urbanom okolišu, zatvorenim prostorima kao i susjednim planetima. Međutim, uspješno projektiranje mahokriline letjelice s takvim značajkama još uvijek nije u potpunosti ostvareno, a razlog tome je složenost konstrukcije krilnog mehanizma koja mora omogućiti složenu kinematiku visokih frekvencija mahanja, radi ostvarivanja aerodinamičkih uvjeta nužnih za let u zadanim okolnostima (izražene nestacionarnosti, mali Reynoldsovi brojevi, upravljanje dinamikom vrtloga i na prednjem i na stražnjem rubu pomičnog krila). Neki od već razvijenih koncepata mahokrilih letjelica temelje se na uzgonskim i propulzijskim značajkama mahokrila insektnog tipa oblika vilinskog konjica što im omogućuje dodatna dobra svojstva.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Istražiti mehanizme mahokrilih letjelica oblika vilinskog konjica za uzorak gibanja u obliku osmice te analizirati načine njihova pogona.
- Odabrati mehanizam pokretnog krila s obzirom na kriterij postizanja traženog kinematičkog profila uzorka gibanja mahokrila letjelice oblika vilinskog konjica.
- Izraditi CAD modele (engl. Computer Aided Design) koji će poslužiti za sintezu mehanizma mahokriline letjelice oblika vilinskog konjica. A kasnije i kao priprema za izradu mehanizma pokretnog krila pomoću 3D tehnologije.
- U programskom paketu za simulaciju dinamike sustava više tijela ADAMS, izraditi model mahokriline letjelice, odnosno modelirati kinematičku strukturu takvog sustava, primjenom dinamike više tijela (engl. Multibody Dynamics).
- Propisati funkcije gibanja krila s obzirom na kriterij postizanja traženog kinematičkog profila uzorka gibanja mahokrila. Uz navedeno, potrebno je izmjeriti i potrebnu snagu aktuatora.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Dario Zlatar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY | VII |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. POVIJEST | 1 |
| 1.2. MEHANIZAM | 3 |
| 1.3. MIKRO ZRAČNA LETJELICA (MAV)..... | 5 |
| 2. KINEMATIKA I KONSTRUKCIJA | 8 |
| 2.1. BIO-INSPIRANI MAV-OVI (BMAV) | 8 |
| 2.2. VILINSKI KONJICI | 8 |
| 2.3. MAHANJE U OBLIKU OSMICE | 10 |
| 2.4. METODE KONSTRUKCIJE..... | 11 |
| 3. DEFINIRANJE KINEMATIČKE STRUKTURE MODELA UZ PRIMJENU TEORIJE DINAMIKE VIŠE TIJELA..... | 14 |
| 3.1. DINAMIKA SUSTAVA..... | 14 |
| 3.1.1. Problemi dinamike sustava..... | 14 |
| 3.2. MODELIRANJE MEHANIČKOG SUSTAVA | 15 |
| 3.2.1. Mehaničko modeliranje..... | 16 |
| 3.2.2. Matematičko modeliranje..... | 17 |
| 3.2.3. Jednadžbe gibanja krutih tijela..... | 17 |
| 3.3. O KORIŠTENOM PROGRAMSKOM PAKETU MSC ADAMS..... | 18 |
| 3.4. SIMULACIJA KINEMATIKE KRILA VILINSKOG KONJICA | 19 |
| 3.4.1. Kinematičko modeliranje | 20 |
| 3.4.2. Modeliranje u Adamsu | 21 |
| 3.4.2.1. Gibanje krila gore-dolje | 24 |
| 3.4.2.2. Gibanje krila u obliku osmice | 26 |
| 3.5. IZRADA CAD MODELA MEHANIZMA POKRETNOG KRILA | 28 |
| 3.5.1. SolidWorks..... | 28 |
| 3.5.2. Modeliranje mehanizma u SolidWorks-u | 28 |
| 4. KVAZISTACIONARNI AERODINAMIČKI MODEL – PROCJENA UZGONSKE SILE | 30 |
| 4.1. PROCJENA UKUPNE MASE | 30 |
| 4.2. KVAZISTACIONARNI MODEL | 31 |
| 4.3. MATLAB | 33 |
| 5. PRIMJENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA NA MODEL | 39 |
| 5.1. ADITIVNE TEHNOLOGIJE | 39 |

| | | |
|------|--------------------------------|----|
| 5.2. | VIZUALIZACIJA CAD MODELA | 40 |
| 6. | REZULTATI..... | 41 |
| 6.1. | ANALIZA POMAKA..... | 41 |
| 6.2. | ANALIZA BRZINE | 42 |
| 6.3. | ANALIZA UBRZANJA..... | 44 |
| 6.4. | ANALIZA SNAGE..... | 45 |
| 7. | ZAKLJUČAK | 47 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Skica mahokrilne letjelice Leonarda da Vinci-ja [2] | 1 |
| Slika 2. Pokušaj leta Otta Lilienthala [3] | 2 |
| Slika 3. Prikaz mahokrilne letjelice Edwarda Frosta [4] | 3 |
| Slika 4. Prikaz mehanizma „clap-and-fling“ [6] | 4 |
| Slika 5. Odnos mase i raspona krila za razne letače [7] | 6 |
| Slika 6. Odnos mase i Reynoldsa za razne letače [7] | 6 |
| Slika 7. Vilinski konjic u letu [9] | 9 |
| Slika 8. Detaljni prikaz krila vilinskog konjica [10] | 9 |
| Slika 9. Gibanje vilinskog konjica [11] | 10 |
| Slika 10. Primjer piezoelektričnog aktuatora [12] | 12 |
| Slika 11. Shema podjele dinamike [13] | 15 |
| Slika 12. Koraci modeliranja mehaničkog sustava [13] | 16 |
| Slika 13. Sučelje MSC Adams-a | 19 |
| Slika 14. Prikaz mehanizma [14] | 20 |
| Slika 15. Prikaz rada mehanizma a) u smjeru gore dolje, b) zakretanja krila [14] | 21 |
| Slika 16. Prikaz mehanizma u izometriji | 22 |
| Slika 17. Prikaz mehanizma sprijeda | 22 |
| Slika 18. Prikaz kinematičkih ograničenja mehanizma | 23 |
| Slika 19. Pomoćna skica pri izradi | 23 |
| Slika 20. Mehanizam s krilima | 24 |
| Slika 21. Trag markera u gibanju gore-dolje | 24 |
| Slika 22. Prikaz mehanizma gibanja u obliku osmice | 26 |
| Slika 23. Trag markera u gibanju u obliku osmice | 26 |
| Slika 24. Kutovi krila pri mahanju u obliku osmice [14] | 27 |
| Slika 25. Prikaz kutnih varijacija [14] | 27 |
| Slika 26. Prikaz mehanizma u SolidWorks-u | 29 |
| Slika 27. Prikaz korištene baterije (lijevo) i DC motora (desno) [15] [16] | 31 |
| Slika 28. Prikaz sila na cijeli mehanizam [14] | 37 |
| Slika 29. Dimenzije krila | 38 |
| Slika 30. Graf utjecaja raspona krila na silu uzgona (lijevo) i utjecaja frekvencije na silu uzgona (desno) | 38 |
| Slika 31. Prikaz cijelog modela u SolidWorks-u | 40 |
| Slika 32. Graf pomaka po osi x | 41 |
| Slika 33. Graf pomaka po osi y | 42 |
| Slika 34. Graf pomaka po osi z | 42 |
| Slika 35. Brzina po osi x | 43 |
| Slika 36. Brzina po osi y | 43 |
| Slika 37. Brzina po osi z | 44 |
| Slika 38. Ubrzanje po osi x | 44 |
| Slika 39. Ubrzanje po osi y | 45 |
| Slika 40. Ubrzanje po osi z | 45 |
| Slika 41. Snaga potrebna za gibanje gore-dolje | 46 |
| Slika 42. Snaga potrebna za gibanje u obliku osmice | 46 |

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis masa i momenata inercije za svako tijelo 25
Tablica 2. Popis masa tijela..... 30

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|--------------------|---|
| c | m | duljina tetive |
| \bar{c} | m/s ² | vektor ubrzanja |
| \hat{c} | | bezdimenzijska duljina tetive |
| C_{LT} | | translacijski koeficijent uzgona |
| C_{DT} | | translacijski koeficijent otpora |
| E | | jedinični vektor |
| F_{LT} | N | translacijska sila uzgona |
| F_{DT} | N | translacijska sila otpora |
| f_i | | matrica sila na tijelo |
| H_R | | matrica veze kutne brzine i derivacija Eulerovih kutova |
| I | kgm ² | moment inercije |
| m | kg | masa |
| MH | | matrica inercije |
| Q | | matrica derivacija jednadžbi kinematičkih ograničenja |
| q^a | | matrica vanjskih opterećenja |
| q^v | | matrica sila uslijed nelinearnosti brzine |
| r | | radijalni položaj duž krila |
| \hat{r} | | bezdimenzijski radijalni položaj krila |
| R | m | duljina krila |
| \ddot{x} | | matrica akceleracija |
| \ddot{x}_R | | matrica drugih derivacija Eulerovih kutova |
| \ddot{x}_T | | matrica drugih derivacija vektora položaja tijela |
| α | rad | napadni kut |
| $\bar{\alpha}$ | | matrica nelinearnih članova kutnog ubrzanja |
| $\dot{\alpha}$ | | prva derivacija napadnog kuta |
| $\ddot{\alpha}$ | | druga derivacija napadnog kuta |
| β | rad | horizontalni kut mahanja |
| $\dot{\eta}$ | rad/s | brzina zakretanja |
| θ | rad | kut silaznog zamaha |
| θ' | rad | kut rotacije zupčanika |
| λ | | Lagrangeov multiplikator |
| ρ | kgm ³ | gustoća |
| $\dot{\phi}$ | rad/s | brzina zamaha |
| $\ddot{\phi}$ | rad/s ² | ubrzanje zamaha |
| ω | rad/s | kutna brzina |

U okviru ovog rada analiziran je mehanizam mahokrilne letjelice inspirirane oblikom i funkcijom krila vilinskog konjica. Fokus je stavljen na stvaranje kinematičkog uzorka gibanja gore-dolje te gibanja u obliku osmice, s ciljem postizanja traženih aerodinamičkih performansi. Aerodinamički fenomeni aproksimirani su pomoću kvazistacionarnog aerodinamičkog modela, a njegovom primjenom u programskom paketu MATLAB izračunata je sila uzgona i dobivena procjena raspona krila. U programskom paketu MSC Adams simulirana je dinamika sustava više tijela nakon čega su analizirani pomaci, brzine i ubrzanja krila kako bi se osiguralo pravilno funkcioniranje u simuliranim uvjetima, te je ispitana snaga aktuatora potrebna za pokretanje krila prema zadanim parametrima. Također je napravljen i CAD model kao mogućnost za korištenje u svrhe aditivne tehnologije.

Ključne riječi: mahokrilne letjelice, vilinski konjic, dinamika više tijela, kinematička struktura, ADAMS, mahanje u obliku osmice

SUMMARY

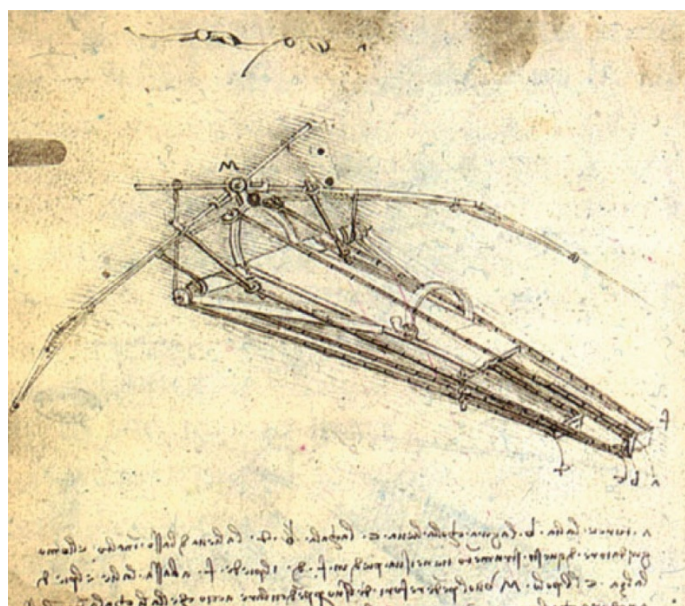
In the framework of this thesis, the flapping-wing mechanism inspired by the shape and function of a dragonfly was analyzed. The focus is on creating a kinematic movement pattern of up-and-down and movement in the figure of eight, with the aim of achieving the required aerodynamic performance. Aerodynamic phenomena are approximated using a quasi-stationary aerodynamic model, and by using it in the MATLAB software package, the lift was calculated and the wingspan was defined. In the MSC Adams software package the dynamics of the multi-body system was simulated, after which the displacements, speeds and accelerations of the wings were analyzed to ensure proper functioning in the simulated conditions, and the power of the actuators required to move the wings according to the given parameters was tested. A CAD model was also created as a possibility for use in additive technology purposes.

Key words: flapping-wing, dragonfly, multibody dynamics, kinematic structure, ADAMS, figure of eight

1. UVOD

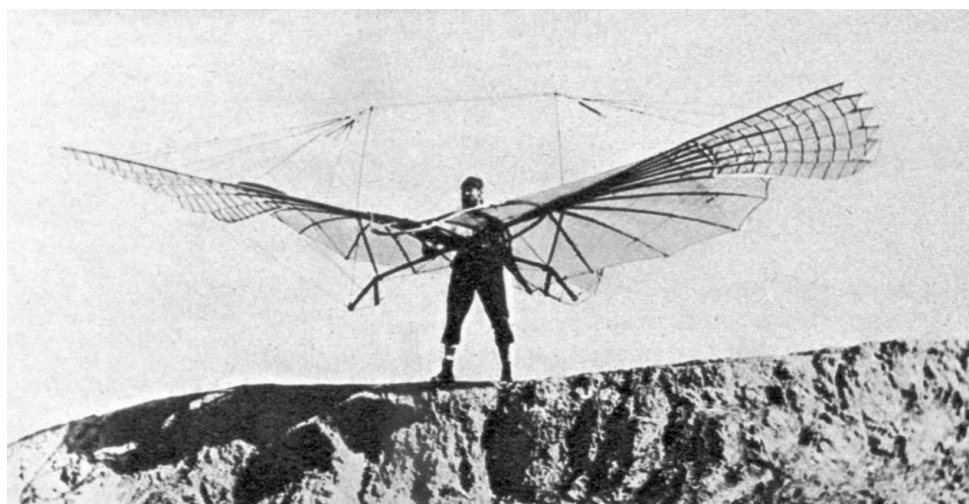
1.1. Povijest

S gotovo milijun različitih vrsta krilatih kukaca i preko deset tisuća vrsta ptica i šišmiša životinje s letenjem kao primarnim kretanjem nalaze se svuda oko nas. Lakoća i elegantnost s kojom se vinu u visine predmet su proučavanja mnogih znanstvenika od samih početaka bilježene ljudske povijesti čemu svjedoče brojni mitovi i legende iz raznih kultura. Jedna od najpoznatijih priča dolazi iz antičke Grčke i govori o talentiranom majstoru Dedalu i njegovom pokušaju leta krilima izrađenim od ptičjeg perja i voska kako bi zajedno sa sinom Ikarom pobjegao s Krete. „Tower jumpers“, termin koji se u više navrata spominje u povijesnim zapisima, označava ljude koji su skakali s tornjeva vođeni loše improviziranim krilima i slijepom vjerom [1]. Ta iluzija da ljudi mogu letjeti poput ptice mnoge je koštala živote. Osim mita o ocu i sinu, u folkloru se javljaju mnoge priče o letjelicama koje mogu podnijeti težinu čovjeka, a variraju od kočija bogova do vještica i njihovih metli. Prvi zapisani dokument u kojem se spominje ideja mahokriline letjelice potječe od engleskog filozofa, Roger Bacon-a iz 13. stoljeća, no najpoznatija skica mahokriline letjelice prepisuje se Leonardo da Vinci-ju [1]. Početkom 16. stoljeća, da Vinci izbacuje djelo „Kodeks o letu ptica“ u kojem piše o svojim saznanjima o letu ptica te ih podupire nacrtima strojeva koji bi oponašali takav let. (Slika 1.)



Slika 1. Skica mahokriline letjelice Leonarda da Vinci-ja [2]

Iako neuspješni, ono što odvaja Da Vinci-jeve skice od prijašnjih pokušaja je to što njegovi modeli podnose težinu čovjeka te ih čovjek sam pogoni. U 17. stoljeću talijanski fizičar, Giovanni Borelli izdaje djelo *De Motu Animalium* u kojem detaljno opisuje mahanje krila ptica. Njegova shvaćanja aerodinamike leta ptica kao i da Vinci-jeve ideje imale su važan doprinos razumijevanju mehanike leta (ptica). Prvo čovjekovo uzdizanje u zrak bilo je balonom. 1709. godine u Portugalu brazilski svećenik i izumitelj Bartolomeu Lourenço de Gusmão započeo je pokusima s letjelicom, no prvi let čovjeka balonom omogućila su braća Montgolfier. Stotinjak godina nakon francuz Gustave Trouvé prvi je postavio motor s unutarnjim izgaranjem na svoju mahokrilnu letjelicu, njegov model 1890. godine preletio je put od 80 metara. Otto Lilienthal, pionir zrakoplovstva, postao je slavan u Njemačkoj po svojim uspješnim letovima jedrilicom [2]. (Slika 2.) Lilienthal je također proučavao let ptica i proveo neke srodne pokuse. Konstruirao je mahokrilca, ali je njegov potpuni razvoj spriječila njegova prerana smrt 9. kolovoza 1896. u nesreći jedrilice.



Slika 2. Pokušaj leta Otta Lilienthala [3]

1902. godine Edward Frost konstruirao je mahokrilnu letjelicu (Slika 3.) koristeći materijale poput vrbe, svile i perja kako bi pogonio svoj mahokrilni stroj, no neuspješno. U 1930-ima Alexander Lippisch zajedno s njemačkim socijalističkim savezom letača uspješno provodi niz letova koristeći se konceptom Lawrence Hargrave-ovog mahokrilca s unutarnjim izgaranjem. Tijekom 20.stoljeća mnogi su pokušavali ostvariti let mahokrilne letjelice, no najznačajniji projekt dolazi sa Sveučilišta u Torontu gdje profesor James DeLaurier-a sa suradnicima konstruira mahokrilca s mlaznim motorom i mjestom za pilota nazvanog „Big Flapper“. U srpnju 2006. godine „Big Flapper“ s pilotom Jack Sanderson-om letio je 14 sekundi, no zbog

greške na krilu let je obustavljen. Ovaj let, osim što je pokazao tehnološki napredak, razbio je psihološku barijeru dokazujući da su pilotirani mahokrilci održiva tehnologija.



Slika 3. Prikaz mahokrilne letjelice Edwarda Frosta [4]

Interes za mahokrilne letjelice posljednjih godina naglo je porastao kao i interes za mikro letjelice. Svojom veličinom čine idealne platforme za razne mogućnosti njihovog korištenja od sustava za praćenje, nadzora i transporta do poljoprivrede i topografskog mapiranja, kao i njihove primjene u svemirskoj i vojnoj industriji.

1.2. Mehanizam

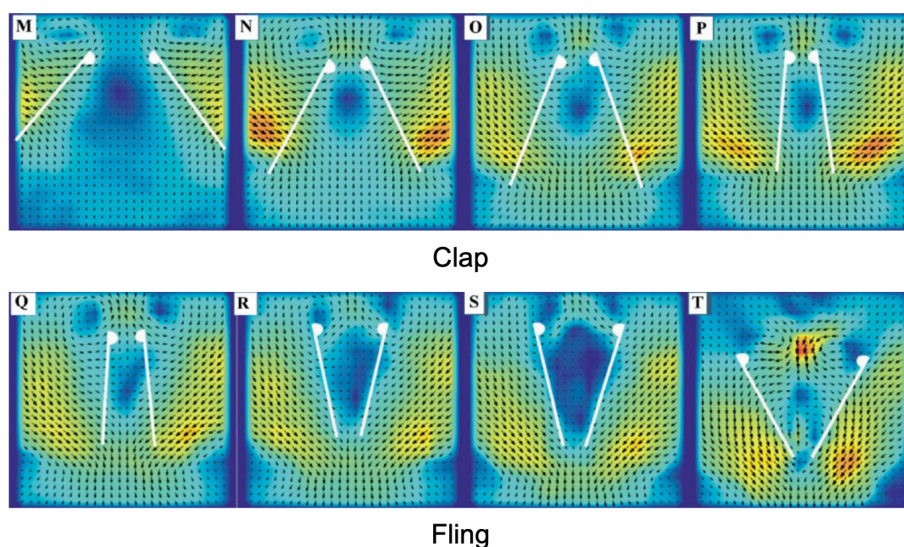
Želimo li poletjeti moramo prvo stvoriti uzgon kako bi savladali gravitacijsku silu. Postoji više načina kako ga možemo dobiti. Kod letjelica s fiksno postavljenim krilima koriste se stabilni mehanizmi, tj., zbog pogonske sile dolazi do opstrujavanja krila i time se na njima stvara uzgon. Kod mahokrilnih letjelica slučaj je drugačiji. Uzgon i pogonska sila nastaju mahanjem para identičnih krila pri relativno visokim frekvencijama. Jedan zamah krila dijeli se na dvije translacijske faze, zamah prema dolje i zamah prema gore, te dvije rotacijske faze, pronaciju i supinaciju. (Rotaciju krila unazad uvijek vodi napadni rub krila.) Za ovakav let koriste se nestabilni mehanizmi, odnosno utjecaji pojava nestacionarnih aerodinamičkih sila. To su: efekt pridružene mase, utjecaj vrtloga napadnog ruba, „clap-and-fling“ efekt, međudjelovanje krila i vrtložnog traga te „rotational circulation“ [5].

Efekt pridružene mase govori o utjecaju viskoznosti fluida na kinematiku krila. Ubrzano ili usporeno gibanje krila utječe na fluid u neposrednoj blizini, odnosno dolazi do pojave

inercijskih sila koje se suprotstavljaju promjeni gibanja. Fluid svojom viskoznošću djeluju na područje oko krila te uzrokuje da se kreće zajedno s krilom stvarajući dodatnu masu. Tom dodatnom masom javlja se sila koja djeluje na krilo i doprinosi stvaranju aerodinamičkih sila.

Uslijed translacijskog gibanja krila s povećanjem napadnog kuta dolazi do odvajanja struje zraka na napadnom rubu. Taj odvojeni granični sloj formira stabilan vrtlog napadnog ruba koji ostaje pričvršćen na krilo. Iza nastalog vrtloga struja zraka se ponovno pokušava spojiti na krilo kako ne bi došlo do sloma uzgona. To omogućava krilu da prenese veću količinu energije na fluid nego što bi bilo moguće kod fiksno postavljenog krila. Povećanjem napadnog kuta raste i vrtlog napadnog ruba što upućuje na postojanje granice iza koje se struja zraka više ne može prilijepiti uz krilo te dolazi do gubitka uzgona.

Povećanjem uzgona za vrijeme pronacije krila može doći do njihovog dodira. Zamahom prema gore, napadni rubovi krila mogu se dotaknuti („clap“). Ta pojava uzrokuje međusobno poništenje suprotnih cirkulacija na svakom krilu što znatno smanjuje vrtložnost struje koja se stvara na izlaznom rubu idućeg zamaha. Posljedično, krila mogu brže generirati cirkulaciju i produžiti vrijeme djelovanja uzgonske sile tijekom zamaha prema dolje. Fluid potisnut između krila stvara dodatnu potisnu silu, a nastavkom rotacije krila dolazi do odvajanja napadnih rubova („fling“) stvarajući područje nižeg tlaka. To dovodi do uvlačenja fluida čime se pospješuje stvaranje vrtloga u sljedećem zamahu krila prema dolje. Ova kombinirana interakcija krila za vrijeme pronacije naziva se „clap-and-fling“. (Slika 4.)



Slika 4. Prikaz mehanizma „clap-and-fling“ [6]

Uslijed promjene zamaha, krilo nailazi na trag vrtloga nastalog izlaznim rubom u prethodnom zamahu. Time se dio izgubljene energije (iz prethodnog zamaha) nadoknađuje što doprinosi stvaranju aerodinamičkih sila. Neposredno nakon promjene zamaha primjećuje se skok u aerodinamičkim silama, a njihov intenzitet ovisi o faznom podudaranju rotacija i translacija. Ovaj nestabilni aerodinamički učinak poznat je kao međudjelovanje krila i vrtložnog traga.

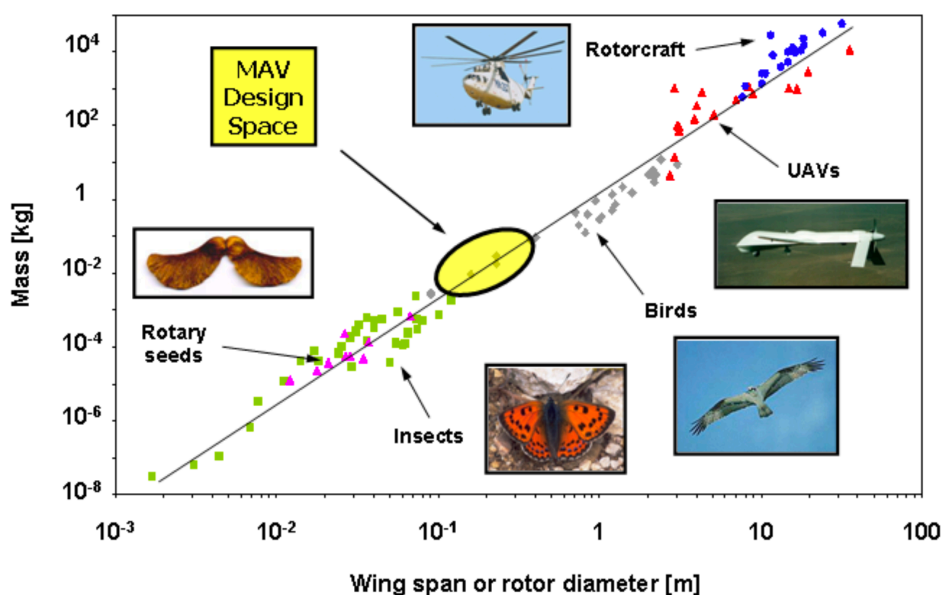
Tijekom rotacijskog gibanja krila (pronacije i supinacije) stvara se cirkulacija u okolnom zraku koja je proporcionalna kutnoj brzini rotacije krila (Kramerov efekt). Ovisno o trajanju i tempiranju rotacije u odnosu na svaki zamah krila mogu se pojačati ili prigušiti sile nastale translacijom krila. Nakon što se krilo zarotira, ono se neposredno prije kraja zamaha zakrene još malo čine pripomaže stvaranju uzgona. Za slučaj da se spomenuta rotacija dogodi nakon završetka zamaha, napadni rub se okrene naprijed (u odnosu na translacijski smjer) i stvara negativan uzgon. Stvaranjem različitih iznosa uzgona na pojedinom krilu omogućava se let mahokrilih letjelica.

Opisani mehanizmi predstavljaju neke od osnovnih principa letenja mahokrila. Oni se međusobno isprepliću i utječu jedni na druge. Kao primjer možemo povezati mehanizme međudjelovanja krila i vrtložnog traga te „rotational circulation“: kada bi precizno tempirali trenutak, sila međudjelovanja krila i vrtložnog traga bi se povećala prateći spomenuti učinak „rotational circulation“. Ovime se dokazuje kako su kukci sposobni iskoristiti energiju nastalu vlastitim pokretom i time znatno poboljšati vlastitu učinkovitost.

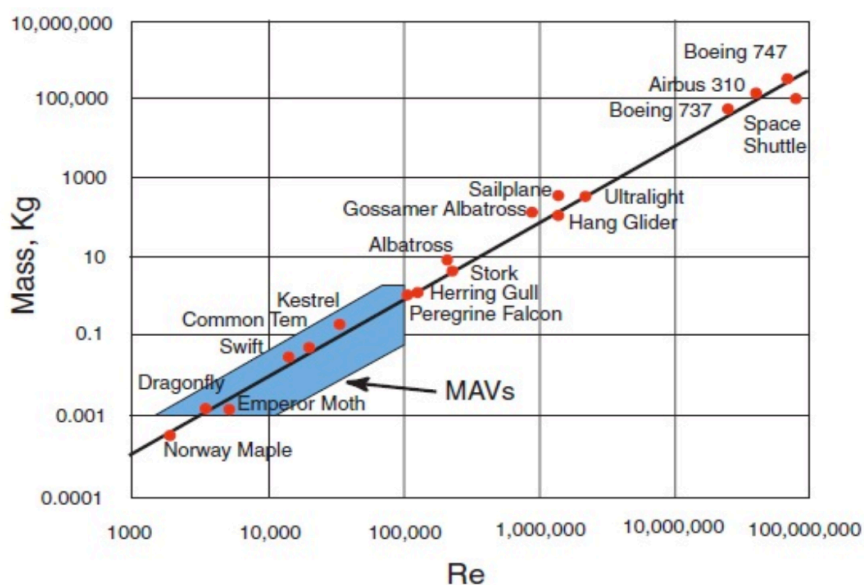
1.3. Mikro zračna letjelica (MAV)

Krajem 1990-ih došlo je do naglog porasta interesa za mikro letjelice (MAV – Micro Air Vehicle) unutar inženjerskih i znanstvenih zajednica. MAV se može definirati kao vozilo s maksimalnom dimenzijom od 15 centimetra ili manje, usporedivo s veličinom malih ptica ili šišmiša, bruto težinom manjom od 100 grama (20 g namijenjeno teretu) te brzinom leta od 20 m/s. MAV možemo smatrati zračnim robotom ili strojem sa šest stupnjeva slobode čineći ga idealnom podlogom za razne pothvate [7]. Ovisno o zadatku, teret se može sastojati od video kamera, raznih senzora ili komunikacijskih uređaja. Tako opremljeni, mogu se koristiti za nadzor, biokemijsko detektiranje, ciljanje, inspekcije na udaljenim ili opasnim lokacijama. Napredak u materijalnim tehnologijama kao i u tehnikama proizvodnje minijaturnih komponenti potaknuo je mnoge timove na uspješan razvoj raznih koncepata MAV-ova.

Možemo ih podijeliti u tri glavne kategorije: s fiksnim krilima, s rotirajućim krilima te bioinspirirane mikro letjelice [7]. MAV-ovi s fiksnim i rotirajućim krilima temelje se na dobro poznatoj tehnologiji, no nailaze na probleme pri skaliranju, što je potaknulo znanstvenike na alternativne konfiguracije. MAV-ovi, sa svojom veličinom i ograničenjima težine (Slika 5.), kao i po Reynoldsovom broju (Slika 6.) nalaze se između velikih insekata i malih ptica.



Slika 5. Odnos mase i raspona krila za razne letače [7]



Slika 6. Odnos mase i Reynoldsa za razne letače [7]

Glavna ideja iza bio-inspiriranih MAV-ova je imitacija tehnike leta kukaca i ptica odnosno mahanje krilima. Za razliku od prije navedenih fiksnih i rotirajućih krila, mahokriline letjelice pokazuju potencijal za bolju stabilnost u olujnim uvjetima kao i razne prednosti poput bolje sposobnosti upravljanja, veće učinkovitosti, mogućnost vertikalnog uzlijetanja i slijetanja te lakšeg uklapanja u okoliš. Provedena su razna istraživanja kako bi se ispitala učinkovitost takvih koncepata i mogućnosti njihove reprodukcije u laboratoriju. Prvi korak istraživanja je razumijevanje aerodinamike i kinematike prirodnih letača. Postoje dvije glavne kategorije prirodnih letača, ptice i kukci. Ornitopteri, vozila konstruirana da oponašaju ptice, i entomopteri, vozila koja oponašaju insekte, značajno se razlikuju. Ornitopteri, poput većine ptica, generiraju vertikalnu silu mašući krilima gore-dolje uz male sinkronizirane promjene upadnog kuta. Ova metoda pogona zahtjeva let prema naprijed, sličan MAV-ovima s fiksnim krilima, zbog čega ornitopteri ne mogu lebdjeti i zahtijevaju početnu brzinu za polijetanje. Nasuprot tome, entomopteri za let koriste kinematiku insekata, odnosno brzu i značajnu promjenu upadnog kuta. (Zbog velike varijacije upadnog kuta ova tehnika se ponekad naziva „Pitch Reversal“.) Za razliku od leta ptica, entomopteri mogu generirati znatno veću vertikalnu silu. Posljedično, izvrsni su u vertikalnom polijetanju i slijetanju (VTOL) i lebdenju, pružajući jasnu prednost u odnosu na ornitoptere i MAV-ove s fiksnim krilima.

2. KINEMATIKA I KONSTRUKCIJA

2.1. Bio-inspirani MAV-ovi (BMAV)

Bio-inspirirane mikro letjelice, poznate i pod drugim nazivom kao biomimetički MAV-ovi (engl. BMAV – Bio-inspired Micro Air Vehicle), oponašaju mahanje krila prirodnih letača što im omogućava postizanje uzgona i potisne sile s relativno male površine, čineći ih lakšim i idealnim za zračne misije u ograničenim područjima (oko dalekovoda, u uskim ulicama, u zatvorenom prostoru itd.). Iz toga proizlazi da same konstrukcijske komponente BMAV-ova moraju biti jako lagane, kompaktne i fleksibilne. Većina prethodno provedenih istraživanja o MAV-ovima bila je usredotočena na fiksna krila, koja su u biti smanjene verzije krila na konvencionalnim zrakoplovima s fiksnim krilima, što nam govori da takva krila nisu prikladna za BMAV-ove zbog nedostatka fleksibilnosti.

2.2. Vilinski konjici

Vilinski konjici (lat. *Odonata*) su izuzetno pokretljivi letači, čineći ih izvrsnim modelima za BMAV. Koristeći svoja dva seta neovisno pokretnih krila, imaju mogućnost izvođenja složenih manevara poput lebdenja, nagle promjene smjera i ubrzanja, kao i letenja u svim smjerovima (Slika 7.). Krila su im prošarana venama koje im daju čvrstoću, no ne predstavljaju dodatnu težinu, što im omogućuje da izdrže velike sile u letu pri velikim brzinama (Slika 8.). Vilinski konjici su jedni od najbržih insekata sa sposobnošću dostizanja brzine u letu i do 54 km/h, dok im je prosječna brzina krstarenja 16 km/h. Tokom leta zbog specifičnog oblika krila dolazi do nastanka vrtloga koji pomažu pri stvaranju uzgona i održavanju stabilnosti, čineći ih učinkovitim letačima i u turbulentnim uvjetima. Njihova sposobnost da dulje lebde na mjestu ključna je za lov i izbjegavanje grabežljivaca ili, u slučaju BMAV-a, za nadzor i prikupljanje podataka na stacionarnim položajima. Precizna kontrola svakog krila omogućuje vretencima da uštede energiju. Aerodinamička učinkovitost dodatno je poboljšana njihovim laganim, izduženim tijelom koje minimizira otpor. Vid od gotovo 360° i sposobnost preciznog ciljanja, primijenjene na BMAV, pospješile bi navigaciju kao i otkrivanje objekata. Sve navedene osobine vilinskog konjica utjelovljuju idealne karakteristike za konstruiranje pokretnih, učinkovitih i svestranih BMAV-ova. [8]



Slika 7. Vilinski konjic u letu [9]

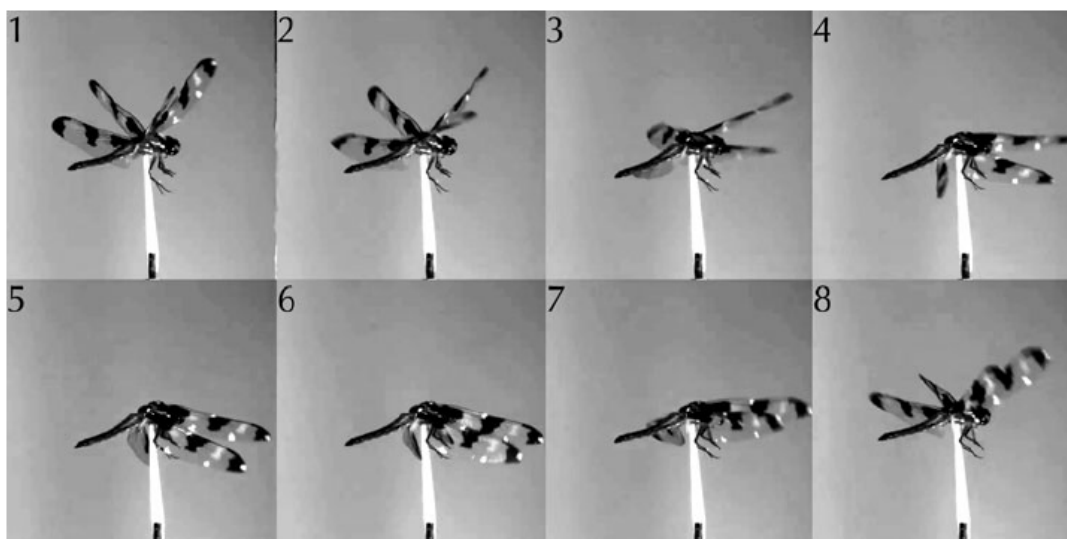


Slika 8. Detaljni prikaz krila vilinskog konjica [10]

2.3. Mahanje u obliku osmice

Kao što je već spomenuto, vilinski konjici su izvrsni letači. Mahanje krila u obliku osmice ključni je element mehanike leta ovog insekta. Ovakav jedinstven uzorak mahanja krila omogućuje im pokretljivost i sposobnost manevriranja u zraku, kao i mogućnost lebdenja, ubrzanja te precizne promjene smjera.

Mahanje u obliku osmice karakterizira složeno trodimenzionalno kretanje. Tokom svakom ciklusa zamaha, vrh krila prati putanju oblika broja osam. Mahanje se sastoji od dvije ključne faze: hod prema gore i hod prema dolje (Slika 9.). Za vrijeme zamaha prema dolje krilo nam se pomiče unaprijed i dolje, generirajući uzgon i potisak, dok se u zamahu prema gore krilo pomiče unatrag i gore, stvarajući dodatan uzgon i mogućnost brze promjene smjera. Ovakvo kontinuirano kretanje u obliku osmice omogućava vilinskim konjicima da generiraju uzgon tokom cijelog ciklusa zamaha krila dajući im vrhunsku učinkovitost leta [8].



Slika 9. Gibanje vilinskog konjica [11]

Pri konstrukciji BMAV-ova glavni cilj inženjera je ugraditi mehanizme koji omogućuju neovisno kretanje krila i rotacijskih zglobova, ključnih za repliciranje pokreta oblika osam. Implementacijom ovih značajki, može se stvoriti sustav letenja koji blisko oponaša složene pokrete vilinskog konjica. Ovaj pristup ne samo da poboljšava sposobnost BMAV-a da brzo mijenja smjer, već i značajno poboljšava njegovu prilagodljivost različitim uvjetima leta, čineći ga učinkovitijim i svestranijim za niz primjena.

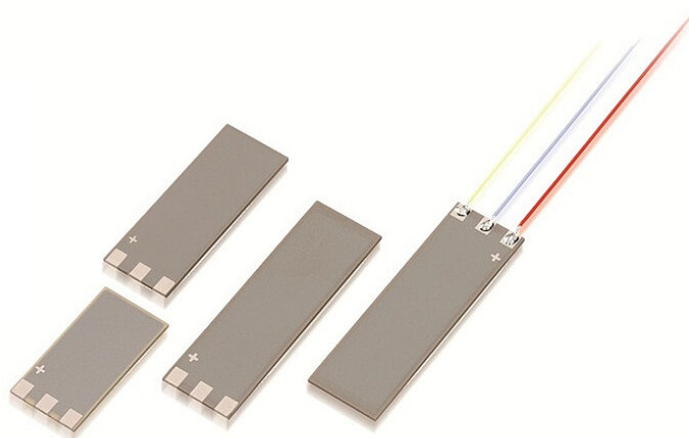
Integracija pokreta osmice u BMAV-ovima ima nekoliko prednosti. Prvo, omogućuje poboljšanu upravljivost, mogućnost navigacije kroz uske prostore i izvođenje složenih obrazaca leta. Ovo je osobito korisno u situacijama poput potrage i spašavanja ili nadzor u ograničenim područjima. Drugo, kretanje u obliku osmice pridonosi povećanju stabilnosti tijekom leta, jer kontinuirano stvaranje uzgona pomaže u održavanju ravnoteže čak i u turbulentnim uvjetima. Također, ovaj uzorak leta potencijalno može poboljšati energetska učinkovitost BMAV-ova, budući da oponaša tehnike uštede energije koje koriste vilinski konjici u prirodi.

Međutim, repliciranje pokreta osmice u BMAV-ovima istovremeno predstavlja značajne izazove. Mora se uzeti u obzir složeno međudjelovanje sila uključenih u ovaj obrazac leta, zahtijevajući sofisticirane sustave upravljanja i precizne tehnike proizvodnje. Osim toga, materijali korišteni za konstrukciju krila moraju biti pažljivo odabrani kako bi izdržali naprezanja, a pritom ostali lagani i fleksibilni. Unatoč ovim izazovima, potencijalne prednosti uključivanja pokreta osmice u BMAV-ove nastavljaju poticati istraživanje i razvoj u području zračne robotike.

2.4. Metode konstrukcije

Znanstvenici i inženjeri, nadahnuti složenim, ali učinkovitim obrascima leta, žele replicirati i primijeniti karakteristike vilinskog konjica na MAV-ove putem naprednih mehanizama. Konstrukcija MAV-a po uzoru vilinskog konjica zahtjeva vrhunsko znanje i isprepletanje biologije i tehnologije.

Jedna od ključnih metoda konstrukcije je korištenje piezoelektričnih aktuatora [8]. Piezoelektrični aktuatori su materijali koji imaju jedinstvenu karakteristiku mijenjanja oblika kao odgovor na električni napon. Ovo svojstvo materijala može se iskoristiti za postizanje visoke razine točnosti u kontroli kretanja krila MAV-a. Zbog svoje kompaktne i lagane prirode, piezoelektrični aktuatori su idealni za integraciju u MAV-ove, ispunjavajući bitan zahtjev da budu mali i lagani (Slika 10.).



Slika 10. Primjer piezoelektričnog akuatora [12]

Drugo ključno razmatranje u konstrukciji ovakvog MAV-a je izbor materijala za krila. Vilinski konjic ima krila koja su izuzetno lagana i fleksibilna. Ta im fleksibilnost omogućuje izvođenje širokog raspona pokreta i brzu reakciju na uvjete okoline. Stoga je bitno u konstrukciji krila MAV-a koristiti materijale koji oponašaju ta svojstva. Nanomaterijali ili kompozitni materijali, poznati po svom visokom omjeru čvrstoće, težine i fleksibilnosti, mogli bi biti potencijalni kandidati za ovu svrhu.

Sljedeća metoda konstrukcije razmatra integraciju istosmjerne struje. Istosmjerni generatori proizvode istosmjernu struju iz mehaničke energije, obično putem elektromagnetske indukcije. Ta se mehanička energija može dobiti iz različitih izvora, u kontekstu MAV-ova gibanjem krila. Ovaj koncept pretvorbe energije koristi se u područjima obnovljive energije, gdje se mehanička energija iz izvora poput vjetera ili vode pretvara u električnu energiju. Za MAV-ove, princip je isti: pretvaranje mehaničke energije iz mahanja krilima u električnu energiju kako bi se stvorio samo održiviji sustav. Ovakav pristup mogao bi dovesti do MAV-ova koji rade dulje bez potrebe za čestim punjenjem generirajući vlastitu snagu tijekom leta. Međutim, implementacija ove tehnologije u MAV-ove predstavlja izazov. Generator istosmjerne struje mora biti dovoljno kompaktan i lagan da stane u malu strukturu MAV-a bez narušavanja performansi leta. Dodatno, generator mora biti dovoljno učinkovit da pretvori ograničenu mehaničku energiju koju proizvode krila MAV-a u upotrebljivu električnu energiju.

Jedan od navedenih problema mogao bi se riješiti implementacijom MEMS (mikro elektromehanički sustav) tehnologije. MEMS tehnologija omogućuje umanjeње mehaničkih i elektromehaničkih elemenata. Koristeći MEMS tehnologiju, inženjeri mogu stvoriti MAV-ove

koji nisu samo kompaktni, već i nevjerojatno lagani. Ovo umanjenje proteže se na senzore, aktuatore i upravljačke sustave, omogućujući im da rade s većom preciznošću i odzivom. Nadalje, smanjena veličina i težina koju omogućuje MEMS mogla bi otvoriti put razvoju MAV-ova koji mogu upravljati uskim prostorima i učinkovitije izvršavati zadatke u zatvorenim prostorima, gusto naseljenim urbanim područjima ili složenim prirodnim krajolicima.

Razvoj MAV-ova poput vilinskog konjica predstavlja uzbudljivu priliku za pomicanje granica u zračnoj robotici. Uključivanjem kombinacije gore predloženih naprednih mehanizama, moguće je stvoriti MAV-ove koji točno oponašaju obrasce leta vilinskog konjica. Ovakve konstrukcije mogle bi pružiti praktična i učinkovita rješenja za niz primjena, od nadzora i izviđanja do praćenja okoliša i šire, najavljujući novu eru mogućnosti u zračnoj robotici.

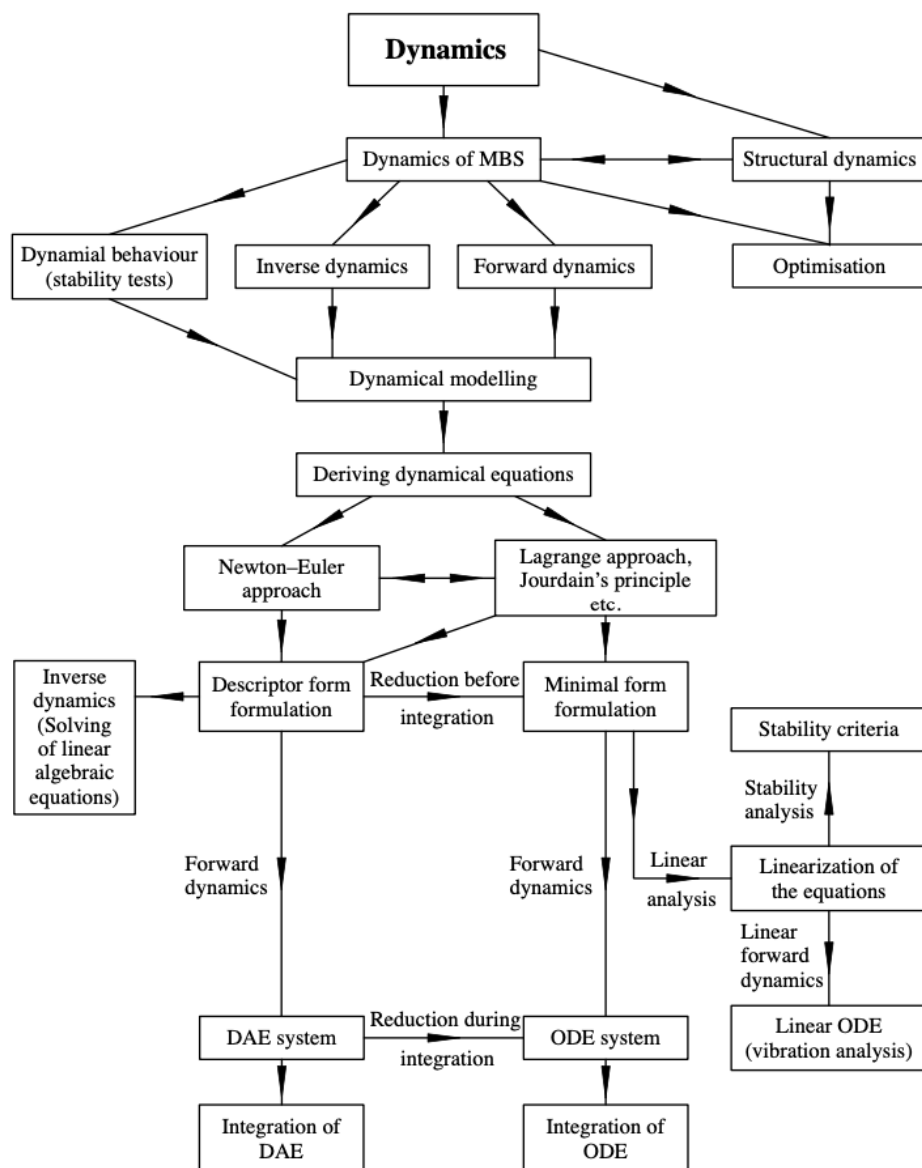
3. DEFINIRANJE KINEMATIČKE STRUKTURE MODELA UZ PRIMJENU TEORIJE DINAMIKE VIŠE TIJELA

3.1. Dinamika sustava

Dinamika spada pod granu mehanike koja proučava gibanje tijela i sile koje uzrokuju ili utječu na to gibanje. Bavi se razumijevanjem kako sile, poput gravitacije, trenja ili primijenjenih sila, utječu na kretanje tijela i sustava tijekom vremena. Dinamiku možemo podijeliti u dva glavna područja: dinamiku konstrukcije te dinamiku više tijela. Dinamika konstrukcije proučava deformabilne mehaničke strukture čije se elastične komponente obično podvrgavaju malim pomacima i rotacijama. Matematičko modeliranje takvih sustava općenito rezultira parcijalnim diferencijalnim jednačbama (engl. PDE – *Partial Differential Equations*) zbog diskretizacije po prostornoj i po vremenskoj varijabli. Uobičajene primjene uključuju ploče, ljuske, konstrukcije zrakoplova, rešetke i građevinske konstrukcije. S druge strane, dinamika više tijela proučava mehaničke sustave međusobno povezanih krutih tijela čije se kretanje odlikuje velikim pomacima i rotacijama. Ovakvo matematičko modeliranje rezultira običnim diferencijalnim jednačbama (engl. ODE – *Ordinary Differential Equations*) zbog diskretizacije samo po vremenskoj varijabli. Dinamika sustava više tijela uspješno se koristi u raznim inženjerskim područjima, uključujući mehatroniku, robotiku, zrakoplovne i biomehaničke sustave.

3.1.1. Problemi dinamike sustava

U području dinamike sustava susrećemo se s različitim vrstama problema, a pristupamo im ovisno o uvjetima i željenim rezultatima (Slika 11.). Izravna dinamika analizira kako će se sustav kretati na temelju pogonskog sustava, sila i momenata koji djeluju na mehanizam te ograničenja mehanizma. Ovi problemi obično se svode na rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednačbi. S druge strane, inverzna dinamika polazi od unaprijed određenog gibanja sustava kako bi odredila sile i momente koji djeluju na njegove članove, a rješava se sustavom algebarskih jednačbi. Dakle, dinamiku možemo podijeliti na izravnu, koja se bavi predviđanjem gibanja, i inverznu, koja se bavi određivanjem sila na temelju poznatog gibanja [13].

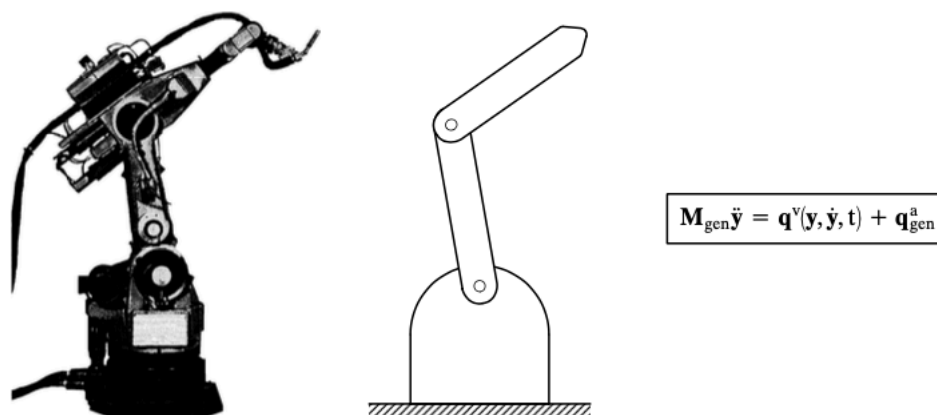


Slika 11. Shema podjele dinamike [13]

3.2. Modeliranje mehaničkog sustava

Proces modeliranja mehaničkog sustava može se provesti u dva koraka (Slika 12.). Prvi korak uključuje prikazivanje promatranog sustava kroz skup pojednostavljenih elemenata s ciljem stvaranja mehaničkog modela. Važno je da model obuhvati sve relevantne čimbenike, a istovremeno bude što jednostavniji kako bi se olakšala provedba analize samog sustava. Razrada mehaničkog modela specifična je za svaki problem, a njegova složenost ovisi o željenim rezultatima analize. Nakon što se završi modeliranje mehaničkog modela prelazi se na

drugi korak, odnosno na formulaciju matematičkog modela. Matematički model podrazumijeva sustav jednažbi koji opisuje gibanje zadanog mehaničkog modela.



Slika 12. Koraci modeliranja mehaničkog sustava [13]

3.2.1. Mehaničko modeliranje

Kao što je već spomenuto, mehaničko modeliranje služi za prikaz stvarnog sustava kao skupa pojednostavljenih elemenata. Međutim, ovaj proces, uvjetovan prirodom problema i željenim ishodom analize, zahtijeva inženjersko iskustvo kako bi se osiguralo da je model točan i optimalan. Prvi korak u razvoju mehaničkog modela uključuje odluku hoće li se sustavu pristupiti iz perspektive dinamike više tijela ili dinamike konstrukcije. Za slučaj mahokrilnih letjelica, obzirom na relativno velike pomake i rotacije prilikom mahanja krila, koristimo dinamiku više tijela.

Ako su kretanja elemenata sustava unaprijed određena, kao što je slučaj s mehanizmima mahokrilaca, a potreban je izračun sila i momenata koji djeluju na sustav, metoda inverzne dinamike nudi odgovarajuće metode za rješavanje tih problema. Osim modeliranja elemenata sustava kao krutih tijela s inercijom, također je bitno definirati odnose među njima. Ovi odnosi su vođeni kinematičkim ograničenjima i dinamičkim spregovima, koja su implementirane kao sustav jednažbi koje opisuju ograničenja nametnuta kretanju pojedinačnih elemenata unutar sustava. To osigurava da model točno odražava mehaničko ponašanje stvarnog sustava.

3.2.2. Matematičko modeliranje

Matematičko modeliranje je proces formuliranja sustava jednačbi za opisivanje određenog mehaničkog modela, pridržavajući se fizikalnih zakona i načela. Učinkovit matematički model trebao bi točno predstavljati vrstu i opseg analize (na primjer, linearna naspram nelinearne analize) i biti prikladno formuliran kako bi odgovarao računalnim metodama i algoritmima koji se koriste za rješavanje i procjenu jednačbi. U određenim slučajevima, rješenje matematičkog modela može se odrediti analitički, dajući 'točan' rezultat temeljen na pretpostavkama tijekom mehaničke i matematičke faze modeliranja. Međutim, u većini slučajeva za pronalaženje rješenja potrebne su numeričke metode i računalni postupci. Iako se za određenu analizu mogu koristiti različiti matematički modeli, odabir odgovarajućeg modela može značajno utjecati na proces izračunavanja, smanjujući vrijeme izračuna i povećavajući točnost rezultata.

3.2.3. Jednačbe gibanja krutih tijela

Dinamika sustava može se analizirati pomoću matematičkog modela koji se sastoji od sustava jednačbi, uključujući diferencijalne i algebarske jednačbe. U inverznom dinamičkom pristupu obično se koristi oblik "full descriptor" matematičkog modela. Ovaj oblik pojednostavljuje proces modeliranja i prikladan je za implementaciju u računalne algoritme. U obliku "full descriptor", svako tijelo u sustavu određeno je sa šest koordinata te se konačni sustav jednačbi sastoji od diferencijalnih i algebarskih jednačbi. Dok diferencijalne jednačbe opisuju gibanje sustava, algebarske jednačbe uspostavljaju odnose između pojedinih elemenata, namećući kinematička ograničenja. Ovaj pristup također olakšava prilagodbe kinematike sustava prema potrebi.

Glavne jednačbe koje opisuju dinamiku krutih tijela poznate su kao Newton-Eulerove jednačbe. Ove se jednačbe obično izražavaju u matricnom obliku i služe kao temelj za analizu dinamičkog ponašanja mehaničkih sustava, a glase [13]:

$$\begin{bmatrix} m_i E & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & H_{R_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{T_i} \\ \ddot{x}_{R_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_i \bar{a}_i & 0 & I_i \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ I_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_i^c \\ I_i^c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Sustav Newton-Eulerovih jednačbi možemo prikazati i na drugi način:

$$M_i H_i \ddot{x}_i + q_i^v = q_i^a + Q^T \lambda \quad (2)$$

gdje član

$$Q(x, t) = \frac{\partial g}{\partial x} \quad (3)$$

predstavlja matricu kinematičkih ograničenja, a λ Lagrangeov multiplikator.

Obzirom na broj stupnjeva slobode; 3 translacije i 3 rotacije, za svako tijelo se određuje 6 jednadžbi. Za sustav s p tijela to podrazumijeva $6p$ jednadžbi. Tijela u sustavu su međusobno povezana s q brojem veza te da bismo odredili kinematiku sustava moramo odrediti ukupno $6p + q$ jednadžbi. Komponente vektora položaja zadovoljavaju sustav preostalih q jednadžbi

$$g(x, t) = 0 \quad (4)$$

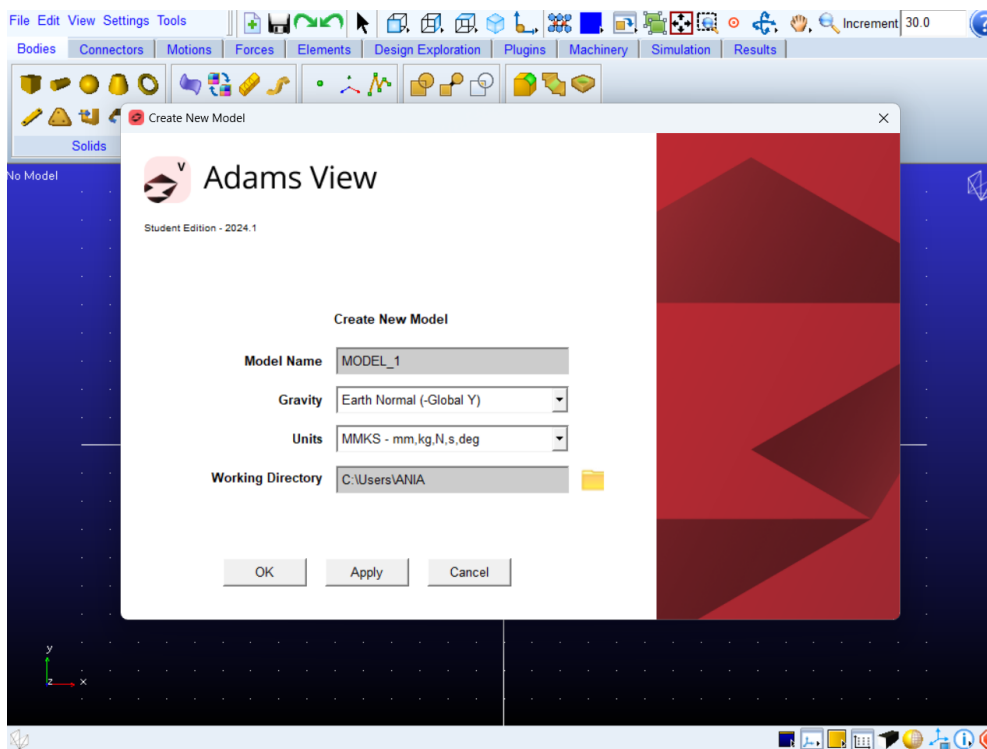
koji možemo izraziti i pomoću ubrzanja jednadžbom:

$$Q\ddot{x} = \bar{c}. \quad (5)$$

Tako dobivamo sustav diferencijalno-algebarskih jednadžbi koji u potpunosti opisuje sustav dinamike više tijela.

3.3. O korištenom programskom paketu MSC Adams

MSC Adams (engl. Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) jedan je od vodećih programskih paketa koji se koristi za simulaciju i analizu dinamike više tijela. Razvijen od strane MSC Softwarea sredinom 1970-ih, Adams pruža robusnu platformu za modeliranje, analizu i optimizaciju sustava sastavljenih od više međusobno povezanih tijela. Nudi specijalizirane module prilagođene različitim primjenama, kao što su konstrukcije vozila (Adams/Automobil), vjetroturbine, robotski i zrakoplovni sustavi, obnovljivi izvori energije i drugo. Adams omogućuje inženjerima modeliranje složenih mehaničkih sustava, definiranje kinematičkih ograničenja i simulaciju ponašanja međusobno povezanih krutih tijela u različitim uvjetima. Njegovi moduli, uključujući Adams/Car za dinamiku vozila i Adams/View (Slika 13) za kreiranje i analizu modela, nude sveobuhvatnu platformu za procjenu performansi sustava. Softver podržava uvoz CAD datoteka i pruža mogućnost definiranja fizičkih svojstava i odnosa između komponenti sustava. Uz napredne alate za rješavanje problema i mogućnosti naknadne obrade, Adams omogućuje inženjerima vizualizaciju rezultata kroz dijagrame i animacije, što ga čini neprocjenjivim alatom za optimizaciju konstrukcija i osiguravanje pouzdanosti mehaničkih sustava.



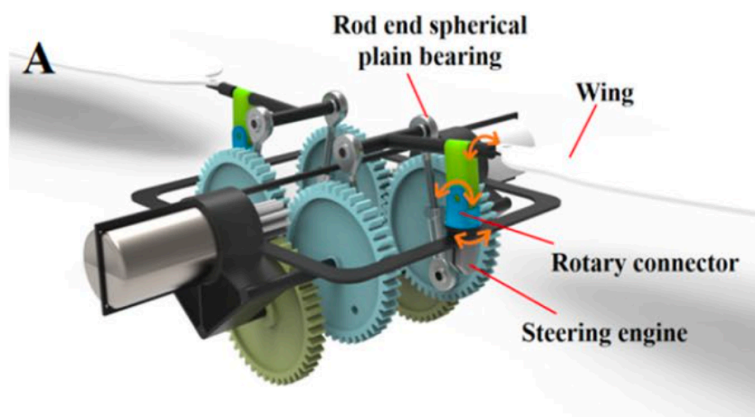
Slika 13. Sučelje MSC Adams-a

3.4. Simulacija kinematike krila vilinskog konjica

Analiza strukture tijela i gibanja krila vilinskog konjica dovela je do pojednostavljene konstrukcije mahokrilnog MAV-a (Slika 14.) koji omogućuje dva ključna pokreta: mahanje gore i dolje za stvaranje uzgona i zakretanje za podešavanje položaja leta. Osim toga, krila vilinskog konjica također izvode zamahe naprijed-natrag, generirajući potisak prema naprijed i poboljšavajući upravljivost. Istraživanja pokazuju da krila s više stupnjeva slobode imaju bolju aerodinamičku izvedbu u usporedbi s krilima s jednim stupnjem slobode. [14]

Kako bi se optimizirao mehanizam zamahivanja, implementiran je višestruki sustav koji se temelji na konstrukciji dvostruke klackalice, osiguravajući simetrično kretanje krila. Mehanizam dopušta i mahanje i okretanje, s dva motora koji pokreću zupčanici. Kad su motori sinkronizirani, krilca se ne uvijaju, ali kad im se faze razlikuju, krilca se uvijaju ili naprijed ili

natrag. Zamahom unaprijed i unatrag upravljaju rotacijski zglobovi koji se pokreću s više aktuatora.



Slika 14. Prikaz mehanizma [14]

3.4.1. Kinematičko modeliranje

Načelo rada mehanizma odgovornog za mahanje krila gore-dolje ilustrirano je na slici 15a. Ovaj se mehanizam temelji na osnovnoj konfiguraciji poluge i klackalice, gdje θ predstavlja kut silaznog zamaha, a θ' odgovara kutu rotacije zupčanika. Odnos između ovih kutova opisan je sljedećom jednadžbom [14]:

$$\theta = \arccos \frac{DB^2 + DA^2 - BA^2}{2 \times DB \times DA} \times (-1)^{\text{Ceiling}(\frac{\theta'}{\pi})} + \arccos \frac{DC^2 + DB^2 - CB^2}{2 \times DC \times DB} - \arctan \frac{OD}{OA} \quad (6)$$

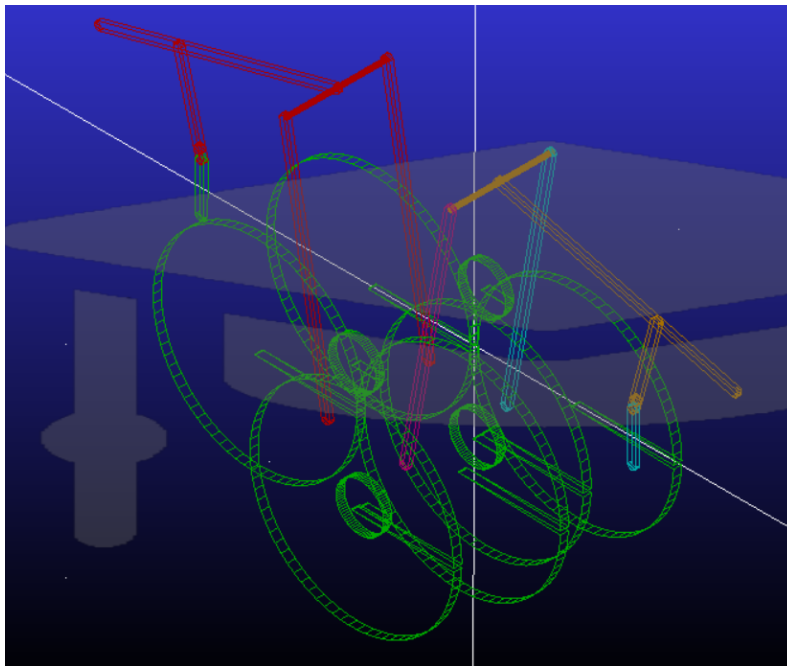
Kut za koji se zupčanik rotira tijekom ovog procesa dan je jednadžbom [14]:

$$\theta' = \pi + \arccos \left[\frac{DA^2 + (CB - BA)^2 - DC^2}{2 \times DA \times (CB - BA)} \right] - \arccos \left[\frac{DA^2 + (CB + BA)^2 - DC^2}{2 \times DA \times (CB + BA)} \right] \quad (7)$$

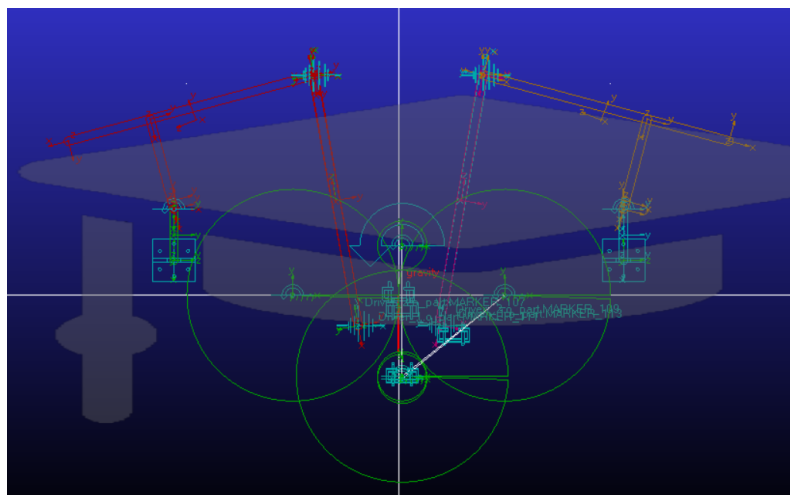
Korištenjem ovih odnosa, zajedno s konstrukcijskim zahtjevima za željeni kut zakretanja, duljine klipnjača mogu se precizno izračunati, osiguravajući optimalnu izvedbu mehanizma.

Mehanizam koji upravlja zakretanjem krila prikazan je na slici 15b. Upadni kut je u korelaciji s geometrijom klipnjača formulom:

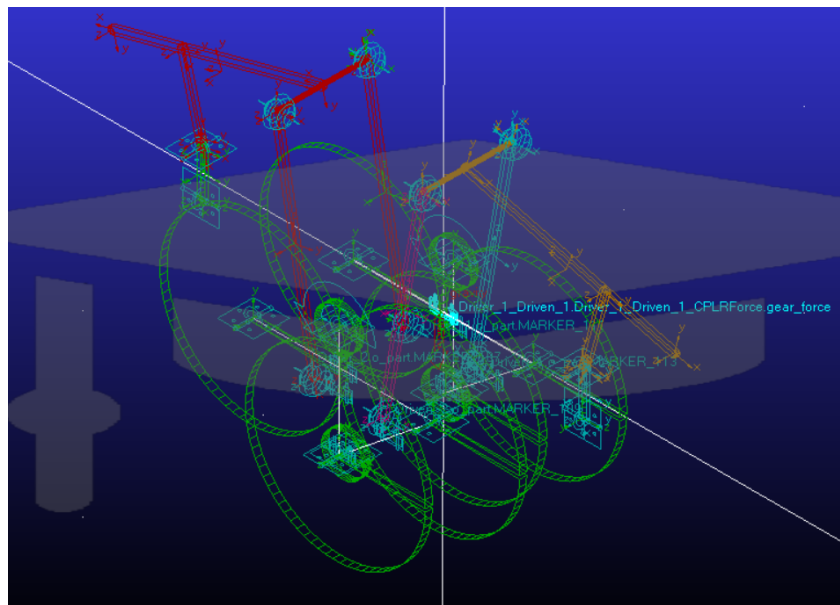
sferne zglobove. Na sredini dobivenog cilindra postavimo marker te od njega do željene lokacije stvorimo drugi cilindar. Cilindre spojimo opcijom '*Boolean: Merge two bodies*' kako bi ih pretvorili u jedno tijelo. Dalje, na kruto tijelo postavimo novi marker te povučemo vezu prema dolje do željene lokacije. Vezu također fiksiramo za tijelo klackalice opcijom '*Merge*'. Na donji rub veze postavimo još jednu vezu okomito na tlo. Njih međusobno povežemo rotacijskim zglobom (engl. *Rotational Joint*), dok donju vezu spojimo s tlom, no specificiramo opcijom '*Pick Geometry Feature*' da je rotacija oko osi y. Time smo završili s konstrukcijom mehanizma.



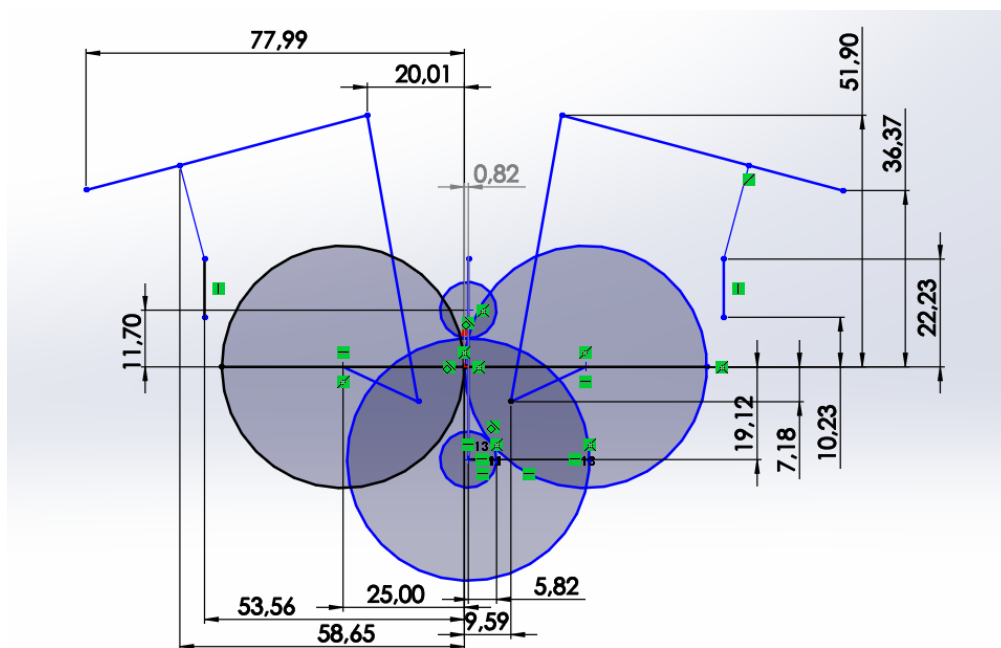
Slika 16. Prikaz mehanizma u izometriji



Slika 17. Prikaz mehanizma sprijeda



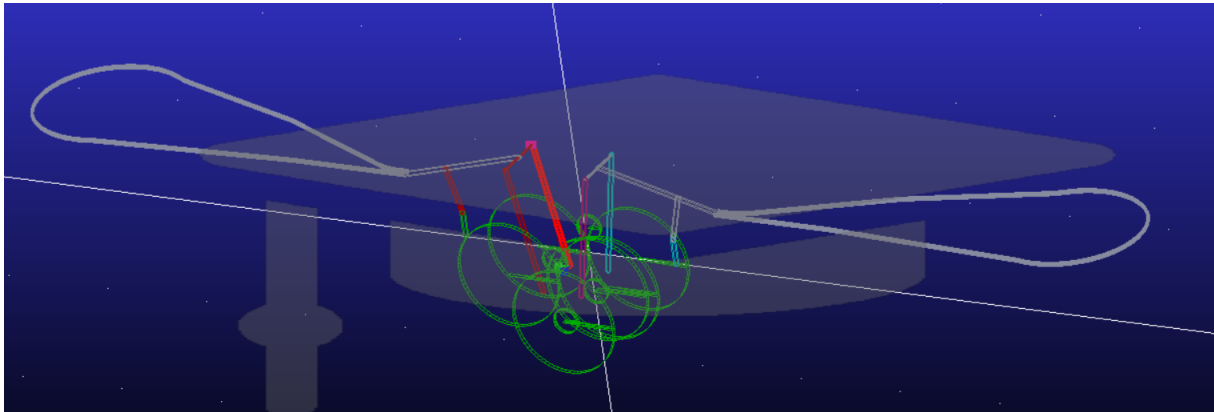
Slika 18. Prikaz kinematičkih ograničenja mehanizma



Slika 19. Pomoćna skica pri izradi

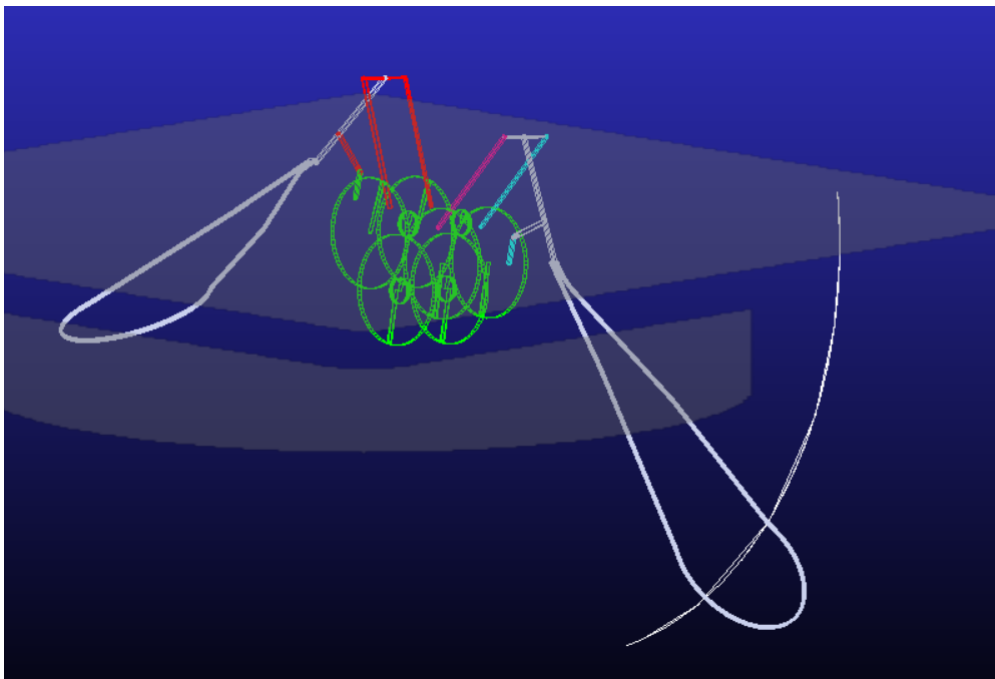
3.4.2.1. Gibanje krila gore-dolje

Kod gibanja krila gore-dolje ostvarujemo kretanje mehanizma kao na slici 15.a) te nam se javljaju kut silaznog zamaha (θ) te kut rotacije zupčanika (θ'). Potrebno je još ubaciti krila u mehanizam i spojiti ih opcijom 'Merge two solids' sa zadanim linkovima.



Slika 20. Mehanizam s krilima

Postavljanjem markera na vrh krila te odabirom opcije 'Animation Controls' možemo pratiti kretanje krila tokom jednog zamaha. Na slici 21. vidimo trag koji se ostavlja.



Slika 21. Trag markera u gibanju gore-dolje

Kako bi mogli izvući snagu za zadani mehanizam potrebno je definirati gustoće pojedinih dijelova. Za krila se uzela gustoća materijala polietilen tereftalat, poznatog kao PET (engl. *Polyethylene Terephthalate*), a iznosi 1.38 g/cm^3 , odnosno za svrhe Adamsa upisuje se $1.38\text{E}-06 \text{ kg/mm}^3$. Za sve preostale dijelove koristi se polilaktična kiselina oznake PLA (engl. *Polyactic Acid*) s gustoćom 1.25 g/cm^3 , tj. $1.25\text{E}-06 \text{ kg/mm}^3$.

Točne iznose masa i momenata inercije vidimo u tablici 1. :

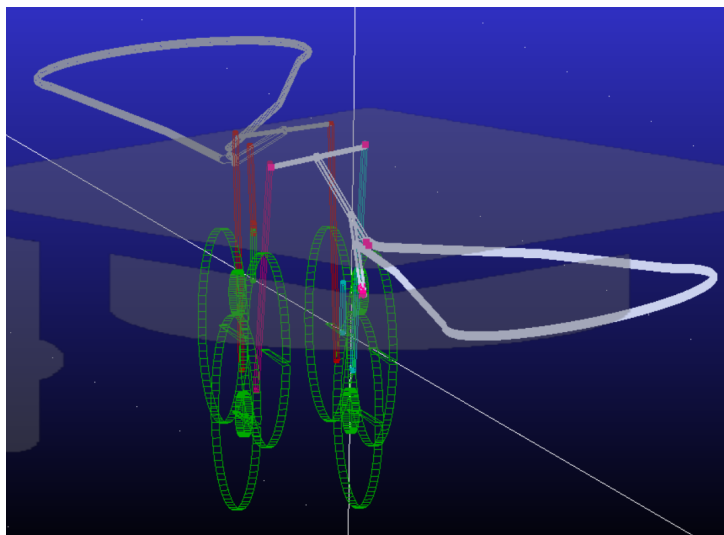
Tablica 1. Popis masa i momenata inercije za svako tijelo

| Tijelo | Masa [kg] | Moment inercije $I_{xx} [\text{kgmm}^2]$ | Moment inercije $I_{yy} [\text{kgmm}^2]$ | Moment inercije $I_{zz} [\text{kgmm}^2]$ |
|--|------------|---|---|---|
| Zupčanik r=25mm | 4.9087 E-3 | 1 | 1 | 1 |
| Zupčanik r=5.82mm | 2.6603 E-4 | 1 | 1 | 1 |
| Krilo | 2.2502 E-2 | 57.3217 | 51.9279 | 5.4299 |
| <i>Rigid Body:</i> <i>Link 1 -</i> klipnjača | 1.5380 E-4 | 4.8565 E-2 | 4.8527 E-2 | 6.3745 E-5 |
| <i>Rigid Body:</i> <i>Link 2 -</i> klackalica | 8.7256 E-5 | 3.3544 E-2 | 3.2073 E-2 | 4.0380 E-3 |
| <i>Rigid Body:</i> <i>Link 3 – veza</i> s tlom | 3.3862 E-5 | 5.3046 E-4 | 5.2234 E-4 | 1.3771 E-5 |

Potrebno je napomenuti da se u mehanizmu nalazi šest zupčanika radijusa 25mm, četiri radijusa 5.82mm, dva krila, četiri klipnjače, dvije klackalice te dvije veze s tlom što znači da je ukupna procijenjena masa mehanizma 0.0763 kg.

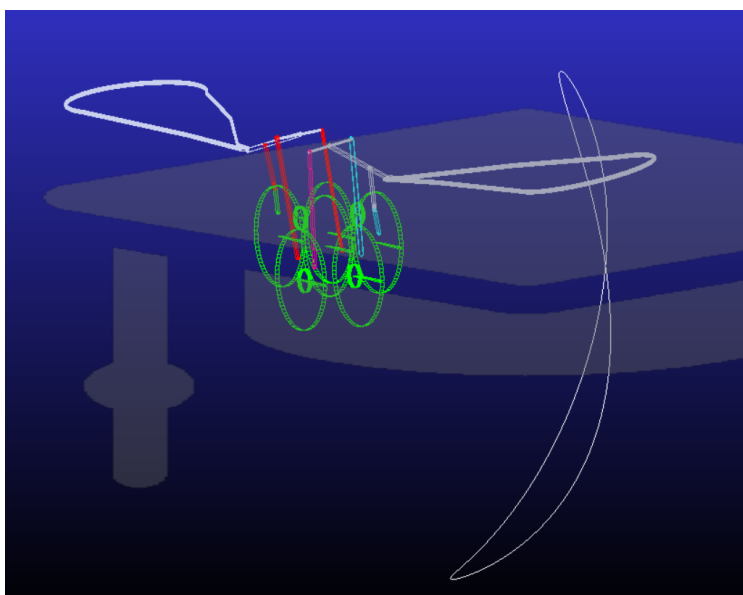
3.4.2.2. Gibanje krila u obliku osmice

Modeliranje mehanizma u obliku osmice prati gore navedeni opis uz jednu razliku. Klipnjača koja veže zupčanik i cilindar klackalice pomakne se za 15 stupnjeva (po zupčaniku) zadržavajući istu duljinu što rezultira nagninjanjem klackalice i dobivanjem kuta uvijanja. Na slici 22. vidimo nagnutu klackalicu.



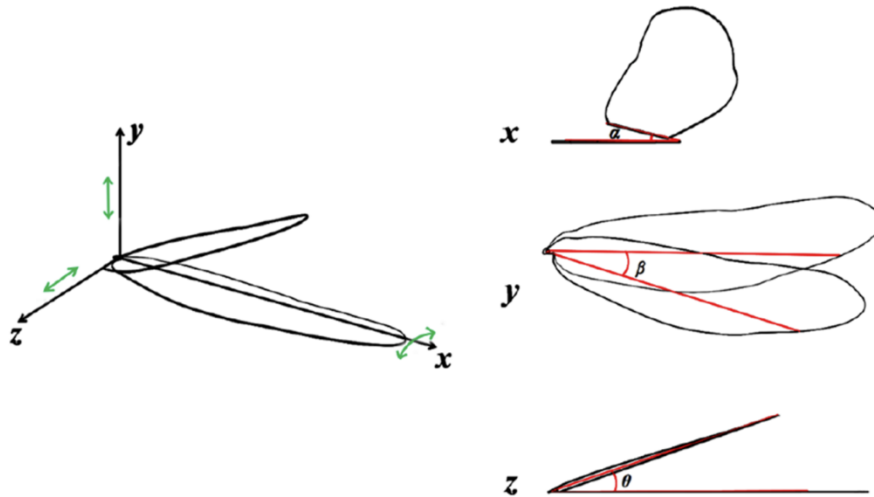
Slika 22. Prikaz mehanizma gibanja u obliku osmice

Postavljanjem markera na vrh krila te odabirom opcije '*Animation Controls*' možemo pratiti kretanje krila tokom jednog zamaha. Na slici 23. vidimo trag osmice koji se ostavlja.



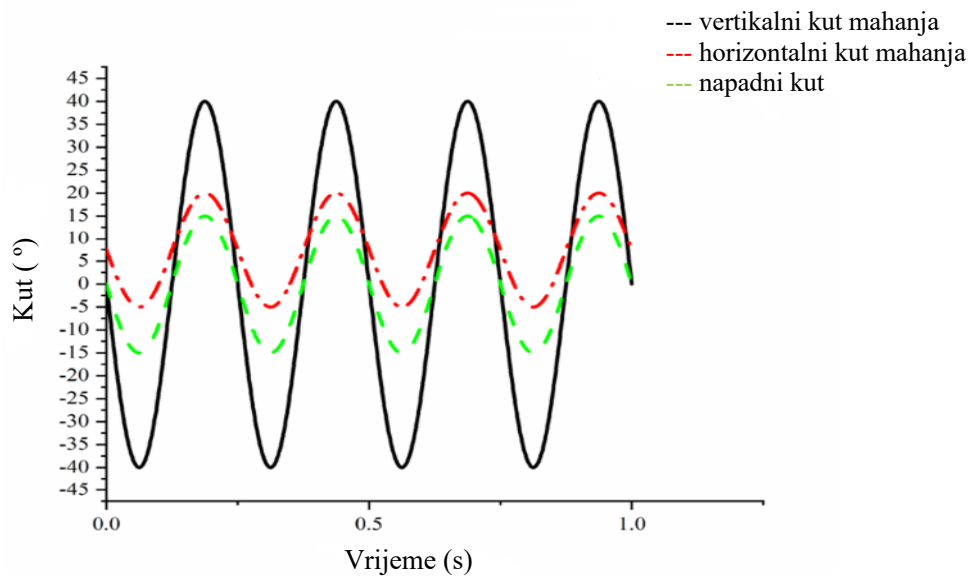
Slika 23. Trag markera u gibanju u obliku osmice

Kod mahanja u obliku osmice ključno je spomenuti kutove koje krila formiraju u sva tri smjera (Slika 24.). Napadni kut α (engl. attack angle) mjeri se u odnosu na x os, horizontalni kut mahanja β (engl. sweep angle) u odnosu na y os, a vertikalni kut mahanja θ (engl. flapping angle) u odnosu na z os.



Slika 24. Kutovi krila pri mahanju u obliku osmice [14]

Na slici 25. vidimo grafički prikaz kutnih varijacija u sva tri smjera.



Slika 25. Prikaz kutnih varijacija [14]

3.5. Izrada CAD modela mehanizma pokretnog krila

3.5.1. SolidWorks

SolidWorks je široko korišten program za trodimenzionalno projektiranje (engl. CAD – *Computer Aided Design*), razvijen od Dassault Systèmes, prvenstveno za izradu detaljnih 3D modela mehaničkih sustava i komponenti. Vrlo je popularan u inženjerstvu i proizvodnji zbog svog intuitivnog sučelja i raznih mogućnosti modeliranja. SolidWorks omogućuje korisnicima da konstruiraju pojedinačne dijelove, sastavljaju ih u cjelovite sustave i generiraju 2D tehničke crteže iz 3D modela. Program također podržava definiranje dimenzijskih odnosa, svojstava mase i karakteristika materijala, koji su ključni za točnu simulaciju i analizu.

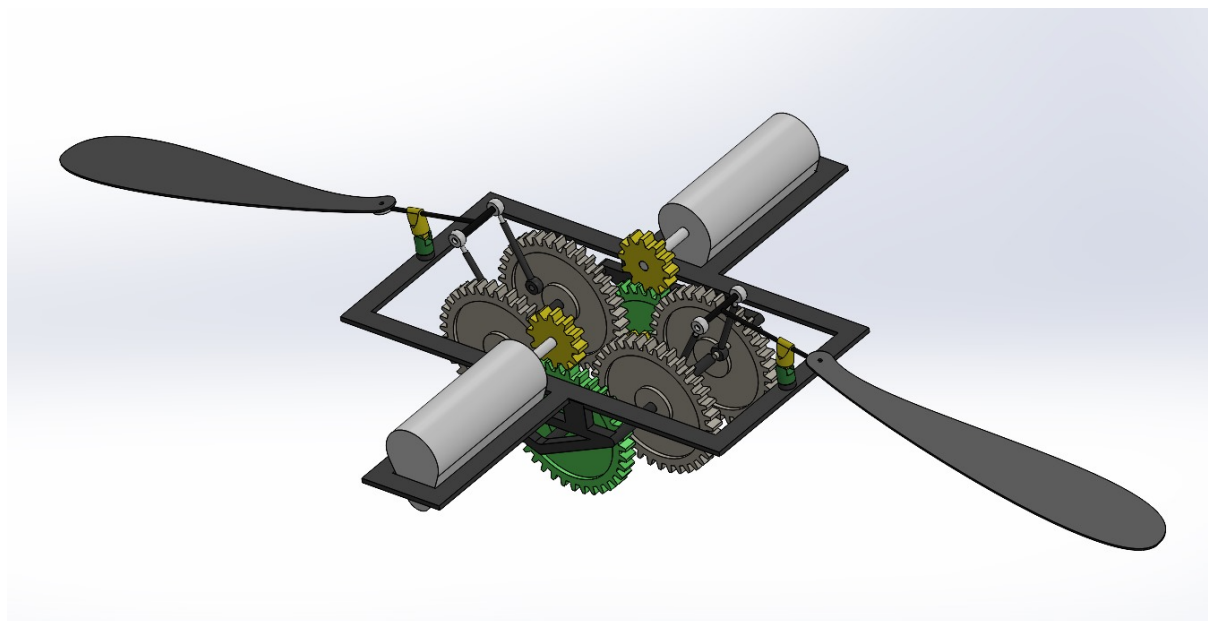
U SolidWorks-u, modeliranje obično počinje stvaranjem 2D skica, koje se zatim pretvore u 3D objekte različitim tehnikama kao što su ekstrudiranje ili okretanje. Program je opremljen naprednim alatima za površinsko modeliranje, dizajn limova i zavarenih spojeva, što ga čini svestranim alatom u različitim područjima inženjerstva. Modeli stvoreni u SolidWorks-u mogu se izvesti u formate poput '.STEP' ili '.IGES', omogućujući jednostavnu integraciju s drugim softverskim alatima za simulaciju i analizu. SolidWorks igra ključnu ulogu u dizajnu i analizi mehaničkih sustava, nudeći temelj za dinamičke simulacije i optimizacijske zadatke.

3.5.2. Modeliranje mehanizma u SolidWorks-u

Za izradu modela u SolidWorks-u koristimo kinematičku shemu i geometrijsku interpretaciju sa slika 14. i 15. Mehanizam se sastoji od dvokrillnog sustava koji oponaša dinamiku krila vilinskog konjica. Ovaj sustav pokreće središnji sklop zupčanika, konstruiran kako bi osigurao preciznu kontrolu gibanja i prijenosa sile prema krilima. U središtu mehanizma nalaze se dva simetrična zupčanika za usporavanje, koja su izravno povezana sa sfernim kliznim ležajevima smještenim na krajevima klipa. Ležajevi omogućuju glatko kretanje klipova unutar sustava, postižući optimalan prijenos rotacijskog gibanja u linearno kretanje. Primarna uloga zupčanika u mehanizmu je smanjenje brzine gibanja aktuatora, omogućujući preciznu kontrolu krila tijekom različitih faza leta. Dva pogonska kotača, smještena s obje strane, pokreću se aktuatorima koji upravljaju cijelim mehanizmom. Međusobno povezani zupčanci sinkroniziraju kretanje krila, koja su montirana na obje strane okvira, i postižu simetrično gibanje. Sklop zupčanika zajedno s aktuatorima osigurava precizno usklađivanje kretanja krila kako bi se postiglo učinkovito zamahivanje tijekom leta. Fleksibilnost upravljanja postiže se podesivim fazama aktuatora, koje utječu na smjer i dinamiku kretanja krila. Reguliranjem

faznog pomaka između aktuatora, možemo manipulirati načinom zamaha krila, čineći ih da se kreću sinkrono ili s namjernim faznim pomakom. Kada su faze aktuatora potpuno usklađene, oba krila djeluju kao jedna jedinica, bez uvijanja, što je korisno za stabilniji i ujednačeniji let. S druge strane, podešavanjem različitih faza omogućavamo krilima da se kreću neovisno, što je ključno za složenije manevre ili prilagodbe aerodinamičkim zahtjevima, kao što su brze promjene smjera ili održavanje stabilnosti u turbulentnim uvjetima.

Cijeli sklop je konstruiran da bude kompaktan, čime se smanjuje ukupna težina i povećava učinkovitost prijenosa gibanja s aktuatorskog sustava na krila. Zupčanici i klizni ležajevi rade u skladu kako bi osigurali minimalan gubitak energije pri prijenosu snage, što je ključno za održavanje stabilnog i kontroliranog leta. Ovako konstruiran mehanizam omogućava visoku razinu upravljivosti i prilagodljivosti, pružajući fleksibilnost u postizanju različitih letnih obrazaca i zadovoljavajući aerodinamičke potrebe mahokrilnog MAV-a inspiriranog vilinskim konjicom.



Slika 26. Prikaz mehanizma u SolidWorks-u

4. Kvazistacionarni aerodinamički model – procjena uzgonske sile

4.1. Procjena ukupne mase

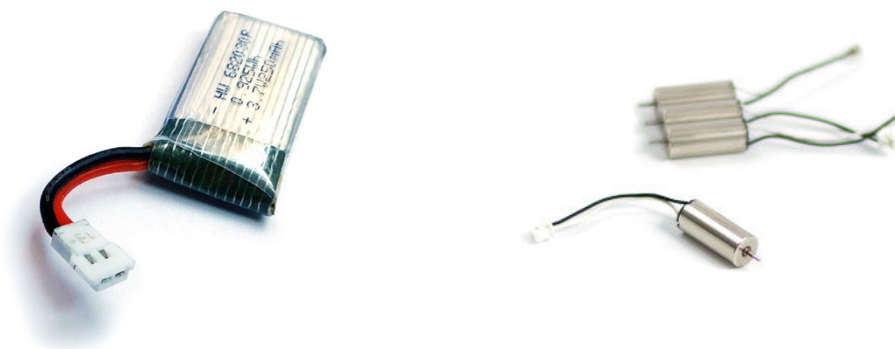
U tablici vidimo popis dijelova mehanizma i njihove procijenjene mase:

Tablica 2. Popis masa tijela

| Dio mehanizma | Masa [kg] |
|--------------------------------------|-----------|
| Krilo | 2.250 E-2 |
| Zupčanik, $r=25\text{mm}$ | 4.909 E-3 |
| Zupčanik, $r=5.82\text{mm}$ | 2.660 E-4 |
| <i>Rigid Body Link</i> - Klipnjača | 1.538 E-4 |
| <i>Rigid Body Link</i> - Klackalica | 8.726 E-5 |
| <i>Rigid Body Link</i> – Veza za tlo | 3.387 E-5 |
| Baterija | 0.0027 |
| DC motor | 0.0071 |

Potrebno je napomenuti da se u mehanizmu nalazi šest zupčanika radijusa 25mm, četiri radijusa 5.82mm, dva krila, četiri klipnjače, dvije klackalice, dvije veze za tlo, baterija te dva DC motora (Slika 26.) što znači da je procijenjena masa mehanizma 0.089 kg. Obzirom da vilinski konjic ima dva seta krila, odnosno potrebna su nam dva mehanizma, ukupna masa iznosi 0.178kg.

Kada poznajemo masu, množenjem s gravitacijom, $g = 9.81\text{m/s}^2$, možemo doći do težine koja ispadne 1.746 N.



Slika 27. Prikaz korištene baterije (lijevo) i DC motora (desno) [15] [16]

4.2. Kvazistacionarni model

Složeni aerodinamički fenomeni koji insektima omogućuju izvanredne sposobnosti manevriranja teški su za precizno modeliranje i primjenu na konstrukciju mahokrilih letjelica. Kao odgovor na ovaj izazov, znanstvenici su razvili kvazistacionarni aerodinamički model koji bilježi bitne aspekte leta kukaca, a istovremeno održava dovoljno učinkovitosti za optimizaciju mahokrilih mehanizama. Model je utemeljen na diskretnoj mehanici i teoriji optimalnog upravljanja, dopuštajući prirodniji prikaz potrošnje energije kroz uključivanje fizikalnih zakona, koristeći diskretne Lagrange–d'Alembertove jednačbe unutar ograničenja optimizacije. Ovaj pristup pretvara kontinuiranu prirodu problema u diskretni oblik, omogućujući algoritmu da učinkovito traži optimalna rješenja u cijeloj domeni.

Ključna pretpostavka kvazistacionarnog aerodinamičkog modela je da aerodinamičke sile ostaju neovisne o vremenu, što znači da su u bilo kojem trenutku funkcije kinematičkih varijabli, poput napadnog kuta i brzine. Ovaj pristup pojednostavljuje problem tretirajući aerodinamičke sile kao stacionarne u svakom trenutku, pri čemu su promjene tijekom vremena isključivo potaknute kinematičkim varijacijama. Iako model ne obuhvaća u potpunosti složenost nestabilne aerodinamike u letu insekata, nudi učinkovit omjer između točnosti i učinkovitosti, što ga čini prikladnim za mnoge aplikacije u konstrukciji.

Let insekata pokreće šest glavnih aerodinamičkih fenomena: translacijska i rotacijska cirkulacija, dodana masa (engl. *added mass*), interakcija krila i traga (*wake-wing*), mehanizam *clap-and-fling* te i *CO vortex* strukture. Kvazistacionarni model učinkovito aproksimira sile koje proizlaze iz translacijske i rotacijske cirkulacije, kao i dodanih učinaka mase.

Nestacionarne pojave, iako ih je teže modelirati, često su značajne samo na početku gibanja i imaju tendenciju međusobnog poništavanja zbog svojih suprotnih utjecaja, tako da imaju ograničen utjecaj na ukupne aerodinamičke performanse. Jedan takav primjer je vrtlog vodećeg ruba (engl. LEV - *leading edge vortex*), koji se, unatoč tome što je inherentno nestabilan, može aproksimirati kao kvazistacionarni učinak pri izračunavanju sila.

Kvazistacionarni model daje algebarske izraze za koeficijente uzgona i otpora kao funkcije napadnog kuta. Ovi su izrazi eksperimentalno potvrđeni, s podacima iz izmjerenih aerodinamičkih sila prilagođenih izvedenim formulama. Iako nije savršen prikaz pune složenosti aerodinamike insekata, ovaj kvazistacionarni model postiže dobru ravnotežu između jednostavnosti i aerodinamičke točnosti, što ga čini praktičnim alatom za optimizaciju mehanizama mahokrilaca.

Izrazi za koeficijente uzgona i otpora glase:

$$C_{LT}(\alpha) = 0.225 + 1.58 \sin(2.13\alpha - 7.2) \quad (9)$$

$$C_{DT}(\alpha) = 1.95 - 1.55 \cos(2.04\alpha - 9.82) \quad (10)$$

gdje nam C_{LT} označava translacijski koeficijent uzgona, a C_{DT} translacijski koeficijent otpora.

Formule za translacijske sile:

$$F_{LT} = \int_0^R \frac{1}{2} \rho r^2 \dot{\phi}^2 c(r) C_{LT}(\alpha) dr \quad (11)$$

$$F_{DT} = \int_0^R \frac{1}{2} \rho r^2 \dot{\phi}^2 c(r) C_{DT}(\alpha) dr \quad (12)$$

gdje F_{LT} predstavlja translacijsku silu uzgona, a F_{DT} translacijsku silu otpora. R je duljina krila, ρ gustoća fluida, $\dot{\phi}$ brzina zamaha, $c(r)$ duljina tetive te r radijalni položaj duž krila.

Treba spomenuti i rotacijske sile:

$$F_R = \rho C_R R^2 \dot{\phi} \dot{\eta} \bar{c}^2 \int_0^1 \hat{r} \hat{c}^2(\hat{r}) d\hat{r} \quad (13)$$

gdje nam je C_R koeficijent rotacijske sile, $\dot{\phi}$ brzina zamaha, $\dot{\eta}$ brzina zakretanja, c prosječna duljina tetive, \hat{r} je bezdimenzijski radijalni položaj krila (r/R), a $\hat{c}(\hat{r})$ bezdimenzijska duljina tetive ($c(r)/c$).

Sila dodane mase glasi:

$$F_R = \frac{\pi}{4} \rho R^2 \bar{c}^2 (\ddot{\phi} + \dot{\phi} \dot{\alpha} \cos \alpha) \int_0^1 \hat{r} \hat{c}^2(\hat{r}) dr - \frac{\pi}{16} \rho \ddot{\alpha} \bar{c}^3 R \int_0^1 \hat{r} \hat{c}^2(\hat{r}) dr \quad (14)$$

gdje $\ddot{\phi}$ predstavlja ubrzanje zamaha, α i $\ddot{\alpha}$ prvu i drugu derivaciju napadnog kuta.

4.3. MATLAB

MATLAB (engl. MATrix LABoratory) je programski jezik koji se koristi za numeričko računanje i analizu podataka. Omogućuje širok raspon ugrađenih funkcija za matematičke operacije, vizualizaciju podataka i razvoj algoritama. MATLAB je posebno dobar za matricne operacije, čineći ga popularnim za zadatke koji uključuju linearnu algebru i modeliranje sustava. Također podržava razne alatne kutije za specijalizirane primjene, kao što su obrada signala, sustavi upravljanja i strojno učenje. Platforma je poznata po svojoj jednostavnosti korištenja i interaktivnom okruženju, koje uključuje naredbeni prozor, skripte i funkcije.

U ovom radu koristimo MATLAB za izračunavanje aerodinamičkih sila upotrebom skripte (dalje u tekstu *Prikaz koda u MATLAB-u*) temeljene na kvazistacionarnom aerodinamičkom modelu. U skriptu se unose dimenzije krila, gustoća okolnog fluida te kut zamaha i kut zakreta, čije se vrijednosti mijenjaju u različitim vremenskim intervalima. Skripta također uključuje jednadžbe za koeficijente uzgona i otpora, kao i za aerodinamičke sile FL_t i FD_t koje želimo dobiti. Pokretanje skripte dobivamo maksimalne vrijednosti aerodinamičkog uzgona i sile otpora za dane dimenzije krila.

Informacija o iznosu sile uzgona nam je bitna kako bi je mogli usporediti s dobivenom težinom.

```

clc
clear

g = 9.81;           % gravitacija Zemlje
f = 65;            % frekvencija mahanja
Ruk = 0.19897;    % duljina krila [m]
dy = 0;           % brzina letjelice

%----- MORFOLOGIJA KRILA -----
% dimenzije i druge karakteristike krila

n2 = Ruk / 2.5;    % faktor skaliranja
RK = 1.9 * n2;    % [m]
L2 = 1.45 * n2;   % [m] udaljenost od zgloba do tezista krila
SK = 1.63 * n2^2; % [m^2] , prema Dickinsonu 2009 je 1.67, prema
                  % DiDi2004 je 1.5
b = 0.01 * n2;    % debljina krila
x_hat = 0.5;      % polozaj osi rotacije krila, bezdimenzijski
r1na1 = 0.59;     % prema [DiDi2004], first moment of area
r2na2 = 0.39;     % prema [DiDi2004], second moment of area

chord_mean = 0.8561 * n2;

%----- Gustoca okolnog fluida -----

ro_CO2 = 0.01622;
mi_CO2 = 1.21e-5;

%----- FUNKCIJE MAHANJA -----

DuR=pi/180;       % sluzi pretvaranju stupnjeva u radijane
fi_m = 90 * DuR;
K =0.97;
alfa_T = 30 * pi/180; % prva znamenka u ovom izrazu podešava čitavi
                    % sustav
eta_m = ( pi - alfa_T * 2)/2;
C_eta = 0.3;      % veći C_eta znači brže zakretanje
eta_0 = pi/2 ;

%-----

dtp = 1/f;        % vremensko trajanje jednog perioda
bt = 100;        % na koliko se tocaka dijeli dtp
bp = 1;          % broj perioda promatranih u simulaciji
ds = dtp * bp;   % ukupno trajanje simulacije
b_it = bt * bp;  % broj iteracija for petlje

```

```
dt = 1/(f*bt);
```

```
for i=1:b_it  
    t = i / (f*bt);
```

```
%----- KUT ZAMAHA -----
```

```
    fi = (fi_m / asin(K)) * asin( K * sin(2 * pi * f * t) );  
    fi_plot(i) = fi;
```

```
%----- KUT ZAKRETA -----
```

```
    eta = eta_m / tanh(C_eta) * tanh( C_eta * (-1) *cos( 2 * pi * f * t ) )  
    + eta_0;  
    eta_plot(i) = eta;
```

```
end
```

```
x = [fi_plot,eta_plot];
```

```
fi1 = x(1);  
fi0 = x(bt);  
eta1 = x(101);  
eta0 = x(bt*2);
```

```
for i=1:b_it
```

```
    fi1 = x(i);  
    fi_plot(i) = fi1;  
    d_fi = (fi1 - fi0)/dt ;  
  
    d_fi_plot(i) = d_fi;  
  
    eta1 = x(i+b_it);  
    eta_plot(i) = eta1;  
    d_eta = (eta1 - eta0)/dt;  
  
    d_eta_plot(i) = d_eta;
```

```
%----- NAPADNI KUT -----
```

```
    if eta0 < pi/2 && d_fi > 0  
        alfa = eta0;  
    elseif eta0 < pi/2 && d_fi < 0  
        alfa = pi - eta0;  
    elseif eta0 > pi/2 && d_fi < 0  
        alfa = pi - eta0;
```

```
else
```

end

```

    alfa_plot(i) = alfa;
    alfa_stupnjevi = alfa * 180 / pi;

```

%-----

```

    mi_tip = ( dy * cos(fi0) ) / (Ruk * d_fi);    % tip velocity ratio

```

%-----

KOEFIKIJENTI SILA -----

```

    k00 = 2.01; k01 = 1.65; k02 = 1.38;
    k10 = 1.38; k11 = 1.44; k12 = 1.38;
    k20 = 0.32; k21 = 0.24; k22 = 0.15;

```

```

    CL = ( (k02 + 2 * k01 * mi_tip + k00 * mi_tip^2) / ( r2na2 + 2 *
r1na1 * mi_tip + mi_tip^2 ) ) * sind(alfa_stupnjevi)*cosd(alfa_stupnjevi);

```

```

    CD = ( (k12 + 2 * k11 * mi_tip + k10 * mi_tip^2) / ( r2na2 + 2 *
r1na1 * mi_tip + mi_tip^2 ) ) * sind(alfa_stupnjevi)^2 + ( (k22 + 2 * k21
* mi_tip + k20 * mi_tip^2)/ ( r2na2 + 2 * r1na1 * mi_tip + mi_tip^2 ) );

```

```

    FL_t = 0.5 * ro_C02 * SK * CL * Ruk^2 * d_fi^2 * ( r2na2 + 2 *
r1na1 * mi_tip + mi_tip^2 );

```

```

    FD_t = 0.5 * ro_C02 * SK * CD * Ruk^2 * d_fi^2 * ( r2na2 + 2 *
r1na1 * mi_tip + mi_tip^2 );

```

```

    Fuk_t = sqrt(FL_t^2 + FD_t^2);

```

```

% FD samo treba okretat, FL je po jednadzbi funkcionira

```

```

    if d_fi > 0
        FD_t = - FD_t;
    else

```

end

```

    if (d_fi > 0 && eta0 < pi/2) || (d_fi > 0 && eta0 > pi/2)
        Fuk_t = Fuk_t;

```

else

end

```

    FL_t_plot(i) = FL_t;
    FD_t_plot(i) = FD_t;

```

```
Fuk_t_plot(i) = Fuk_t;
```

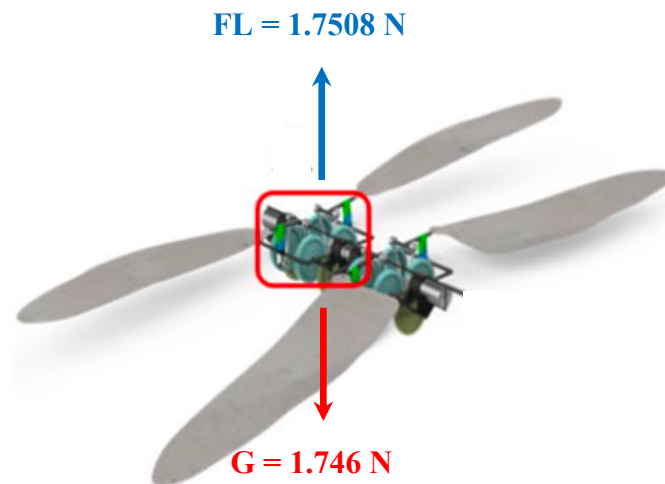
```
%-----
```

```
fi0 = fi1;
```

```
eta0 = eta1;
```

end

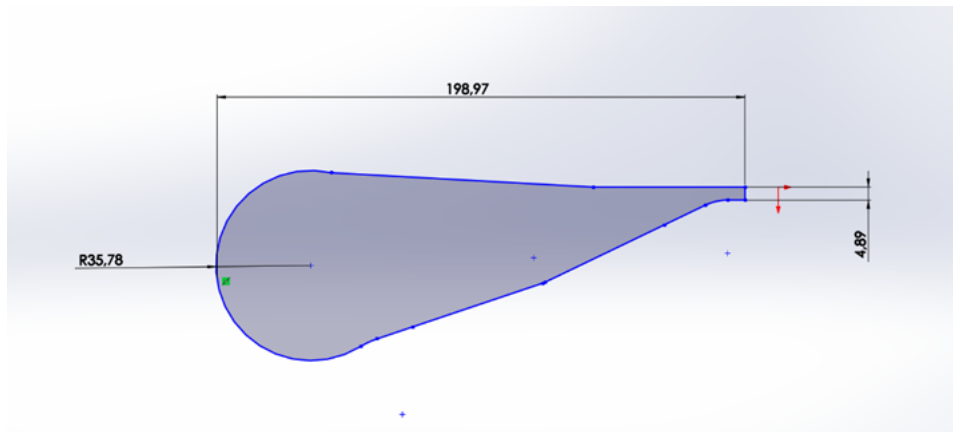
Dobivena sila uzgona MATLAB kodom iznosi 0.4377N za jedno krilo. Kako mehanizam vilinskog konjica ima 2 seta krila, odnosno četiri krila, ukupna sila uzgona je 1.7508N što je više od dobivene težine (Slika 26.). Iz ovog rezultata možemo zaključiti da mehanizam generira dovoljnu silu uzgona ne samo za lebdenje već i za uzdizanje.



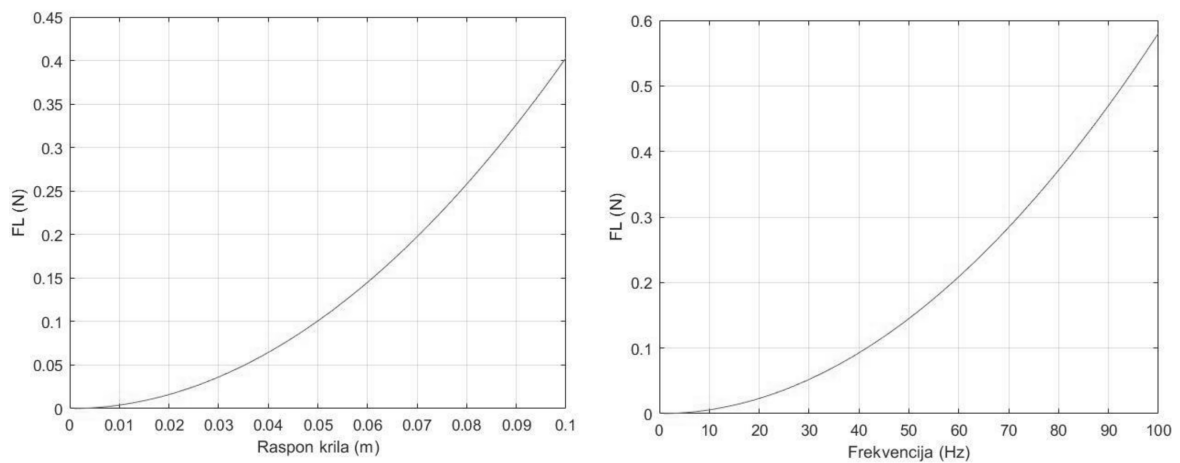
Slika 28. Prikaz sila na cijeli mehanizam [14]

Uz skriptu, napravljen je i grafički prikaz (Slika 28.) koji pokazuje utjecaj raspona krila na silu uzgona pri frekvenciji mahanja od 65 Hz . Analizom vidimo da se veličina krila mora povećati u odnosu na početnu vrijednost kako bi se postigao potreban uzgon za let.

Graf na desnoj strani prikazuje odnos između sile uzgona i frekvencije mahanja za odabrani raspon krila od 0.19897m (Slika 27.).



Slika 29. Dimenzije krila



Slika 30. Graf utjecaja raspona krila na silu uzgona (lijevo) i utjecaja frekvencije na silu uzgona (desno)

5. Primjena aditivnih tehnologija na model

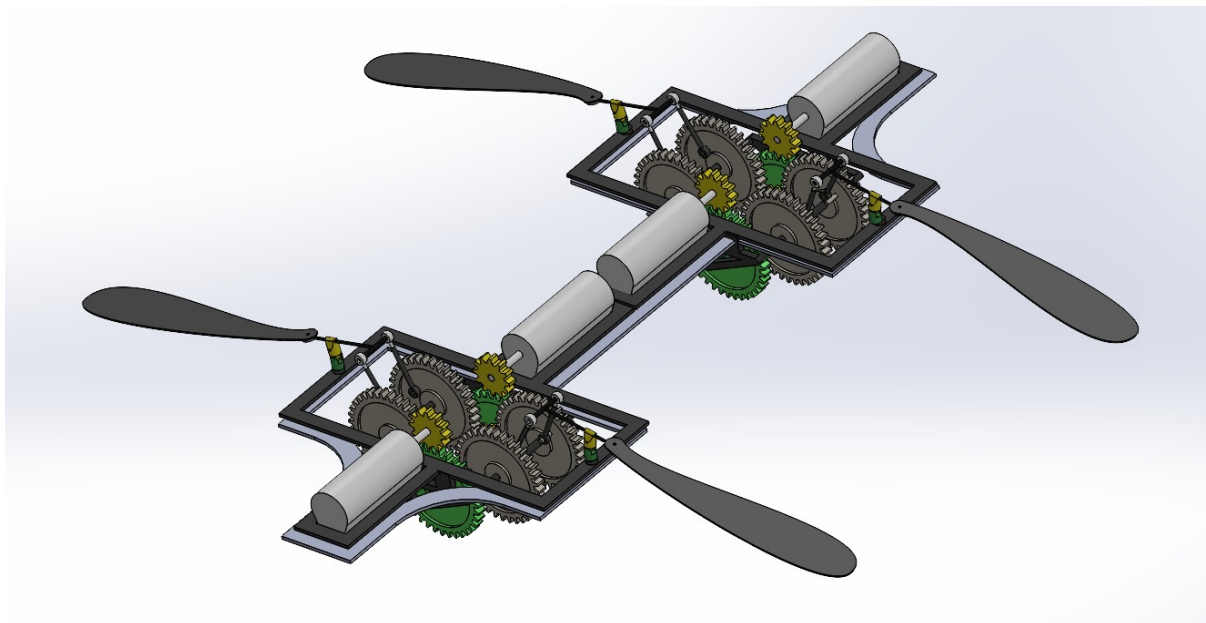
5.1. Aditivne tehnologije

Aditivna tehnologija, obično poznata pod nazivom 3D printanje, proces je stvaranja objekata nanošenjem čestica u tankim slojevima. Za razliku od tradicionalnih proizvodnih metoda, koje često uključuju rezanje ili oblikovanje materijala, aditivna proizvodnja proizvodi sloj po sloj, nudeći veću slobodu konstrukcije i preciznost. Ovaj proces obično počinje digitalnim 3D modelom koji se stvara pomoću CAD programa za modeliranje. Model se zatim reže na slojeve, a 3D printer taloži materijal u skladu s tim slojevima kako bi se formirao konačni objekt. Ovisno o primjeni, mogu se koristiti različiti materijali, uključujući termoplastiku kao što je ABS ili PLA, metale kao što su titan i aluminij, keramiku i napredne kompozite. Izbor materijala ovisi o specifičnim zahtjevima za čvrstoću, fleksibilnost, otpornost na toplinu ili biokompatibilnost. Postoji nekoliko vrsta aditivnih proizvodnih tehnologija, uključujući FDM (engl. *Fused Deposition Modeling*), stereolitografiju (SLA) i SLS metodu (engl. *Selective Laser Sintering*), od kojih svaka ima svoje specifične primjene. FDM je popularan za proizvodnju prototipova i robe široke potrošnje, dok se SLS koristi za složenije i izdržljivije dijelove u industrijama poput zrakoplovne i automobilske.

Aditivna tehnologija nudi nekoliko ključnih prednosti. Jedna od glavnih prednosti je mogućnost izrade složenih geometrija koje bi bilo teško ili nemoguće stvoriti tradicionalnim metodama. Također omogućuje značajne uštede materijala, jer koristi samo količinu potrebnu za predmet, smanjujući otpad. Osim toga, tehnologija omogućuje brzu izradu prototipova, omogućujući inženjerima da testiraju i modificiraju svoje konstrukcije brzo i isplativo. U sektorima kao što je zdravstvo, aditivna proizvodnja koristi se za izradu implantata i protetike prilagođenih pacijentima, a u zrakoplovstvu pomaže u proizvodnji laganih komponenti visokih performansi. Kako se tehnologija nastavlja razvijati, očekuje se da će aditivna tehnologija igrati sve važniju ulogu u industrijama koje se kreću od automobilske i zrakoplovne do zdravstvene zaštite i robe široke potrošnje. Njegov potencijal za prilagodbu, učinkovitost i inovacije čini ga moćnim alatom za budućnost proizvodnje.

5.2. Vizualizacija CAD modela

Na slici 31. prikazujemo vizualizaciju CAD modela razvijenog prema načelima aditivne proizvodnje, osiguravajući da je konstrukcija optimizirana za odabrani materijal i proizvodni proces. Iako je detaljan opis modela pokriven u prethodnom poglavlju, ovaj vizualni prikaz pruža dodatan uvid u to kako se konstrukcija integrira s ciljevima rada, posebno u odnosu na primjenu aditivnih tehnologija.



Slika 31. Prikaz cijelog modela u SolidWorks-u

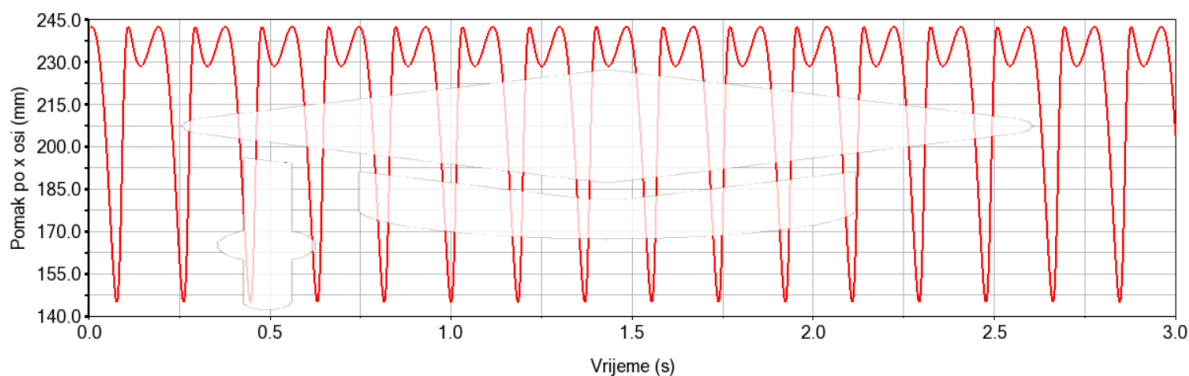
6. REZULTATI

U ovom poglavlju prikazat ćemo i opisati rezultate dobivene simulacijom mehanizma mahokrilne letjelice oblika vilinskog konjica. Postavljenjem markera na željenu lokaciju praćenja možemo izvući informacije o pomaku, brzini i ubrzanju te preko zadanog gibanja doći do podataka o snazi. Svi rezultati prikazani su za frekvenciju 65 Hz jer se upravo ta frekvencija dobila iz analize kvazistacionarnog aerodinamičkog modela.

Za prikaz rezultata koristit ćemo se Adams/PostProcesor modulom.

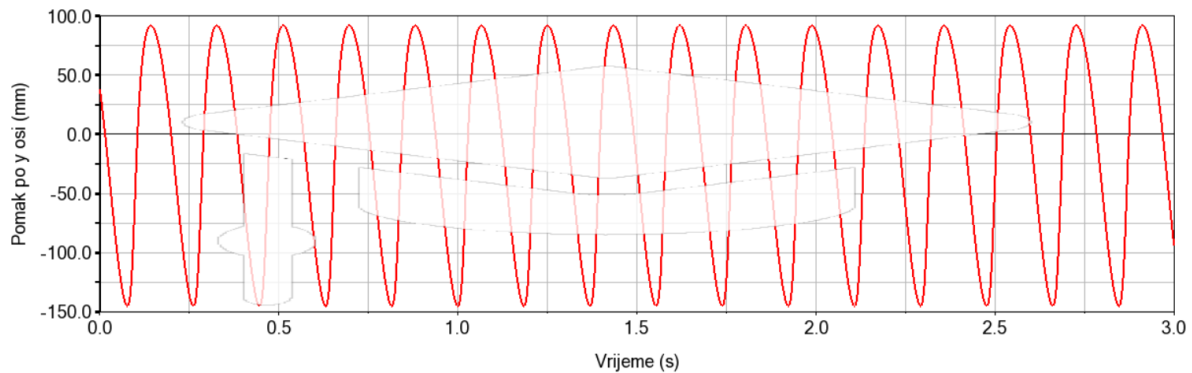
6.1. Analiza pomaka

Na grafu vidimo prikaz pomaka po x osi u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum pomaka iznosi 242 mm (0.242 m), dok je minimum 144 mm (0.144 m). Ukupni hod pomaka po x osi je 97 mm (0.097 m).



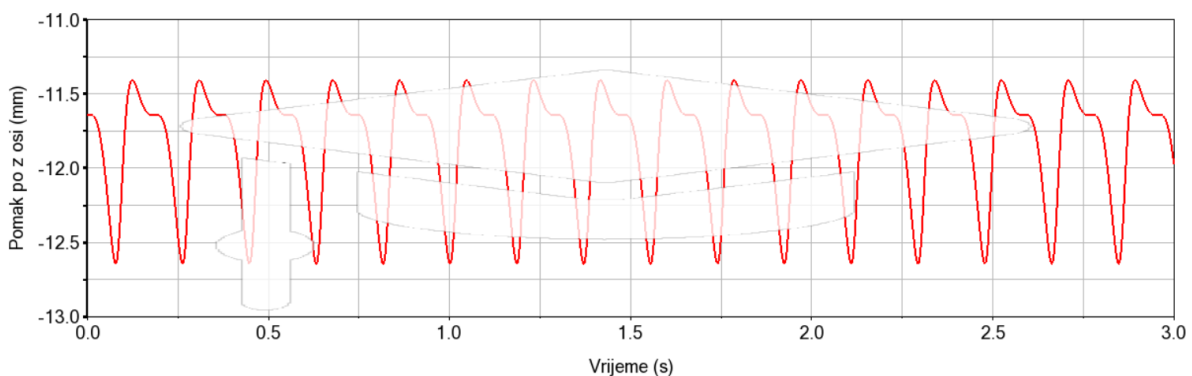
Slika 32. Graf pomaka po osi x

Graf na slici 33. prikazuje pomak po y osi u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum pomaka iznosi 92mm (0.092m), dok je minimum -145 mm (-0.145 m). Ukupni hod pomaka po y osi je 237 mm (0.237 m).



Slika 33. Graf pomaka po osi y

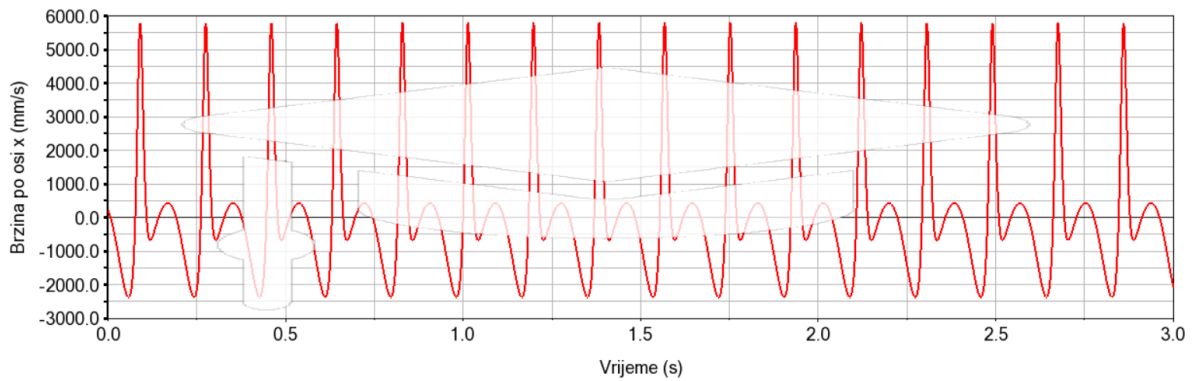
Slika 34. prikazuje pomak po z osi u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum pomaka iznosi -11.4mm (-0.0114m), dok je minimum -12.6mm (-0.0126m). Ukupni hod pomaka po z osi je 1.2mm (0.0012m).



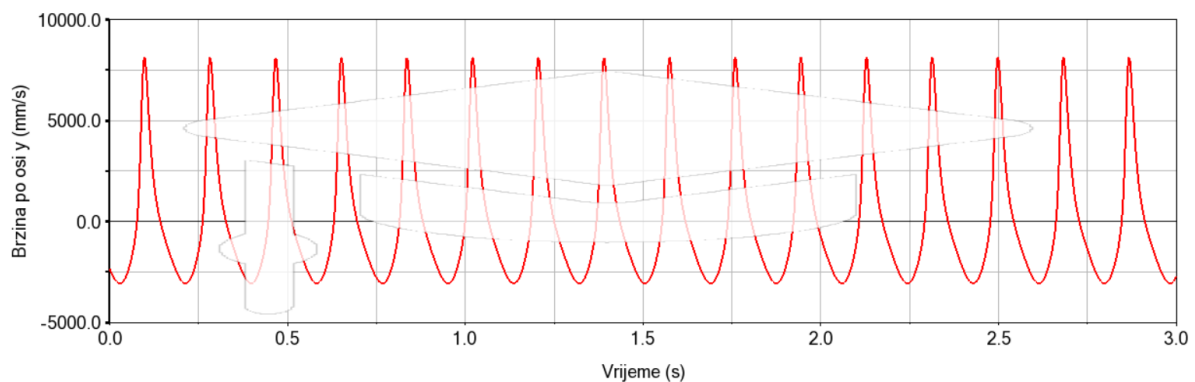
Slika 34. Graf pomaka po osi z

6.2. Analiza brzine

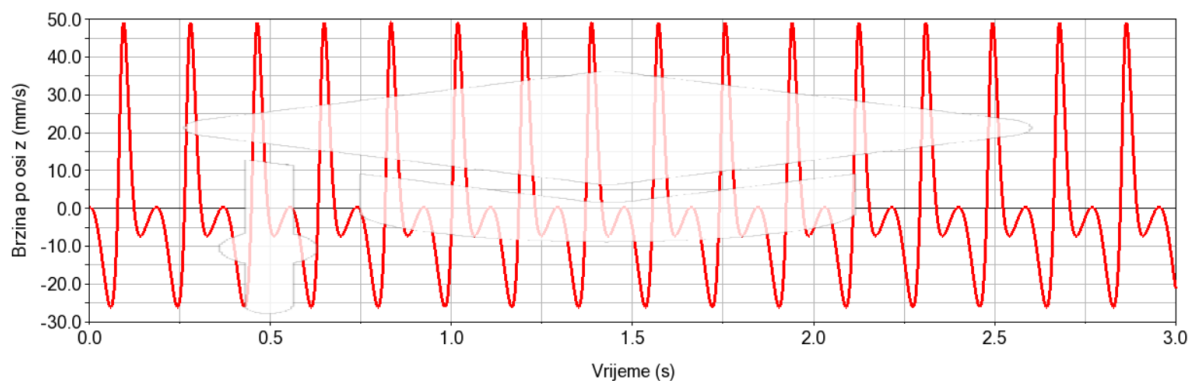
Graf na slici 35. prikazuje promjenu brzine po osi x u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum koji doseže iznosi 5814 mm/s, odnosno 5.814 m/s, dok je minimum -2379 mm/s, tj. -2.379 m/s.

**Slika 35. Brzina po osi x**

Na slici 36. graf prikazuje promjenu brzine po osi y u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum koji doseže iznosi 8129 mm/s, odnosno 8.129 m/s, dok je minimum -3070 mm/s, tj. -3.07 m/s.

**Slika 36. Brzina po osi y**

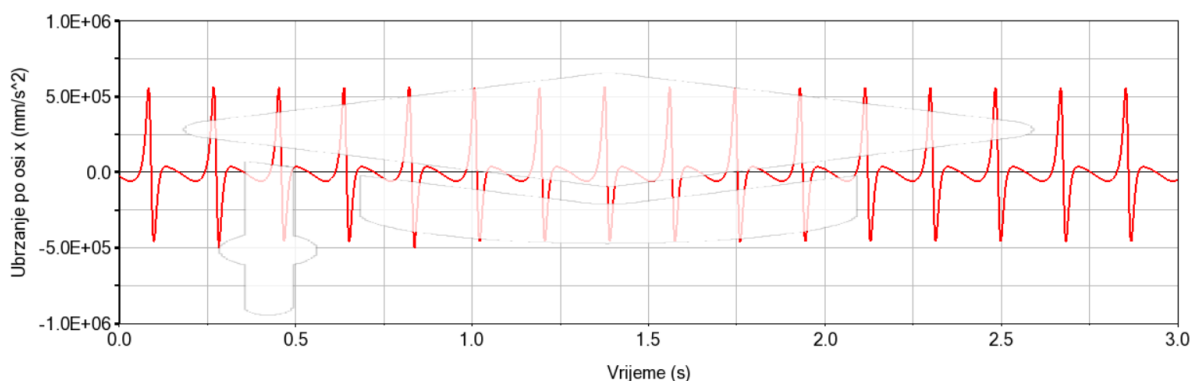
Slika 37. prikazuje promjenu brzine po osi z u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum koji doseže iznosi 49 mm/s, odnosno 0.049 m/s, dok je minimum -26 mm/s, tj. -0.026 m/s.



Slika 37. Brzina po osi z

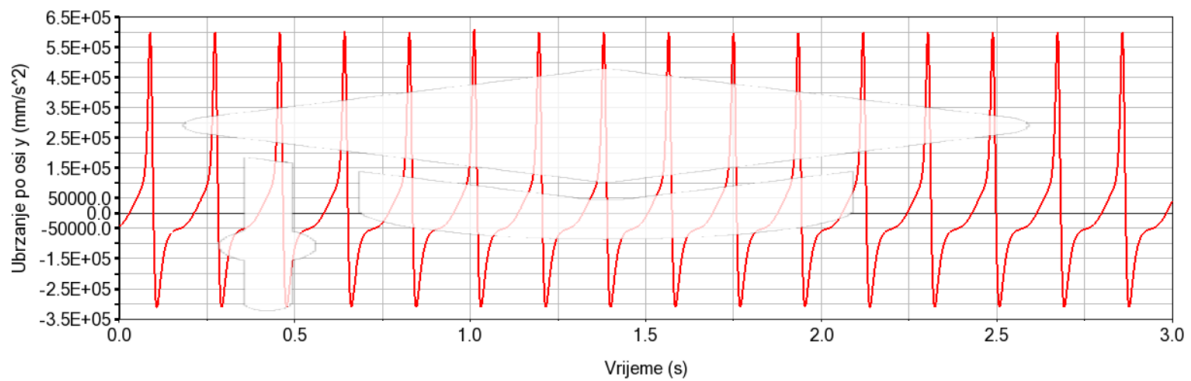
6.3. Analiza ubrzanja

Graf na slici 38. prikazuje ubrzanje krila po osi x u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum ubrzanja iznosi $5.8 \cdot 10^5 \text{ mm/s}^2$, odnosno 580 m/s^2 , dok minimum iznosi $-5.05 \cdot 10^5 \text{ mm/s}^2$, tj. -505 m/s^2 .



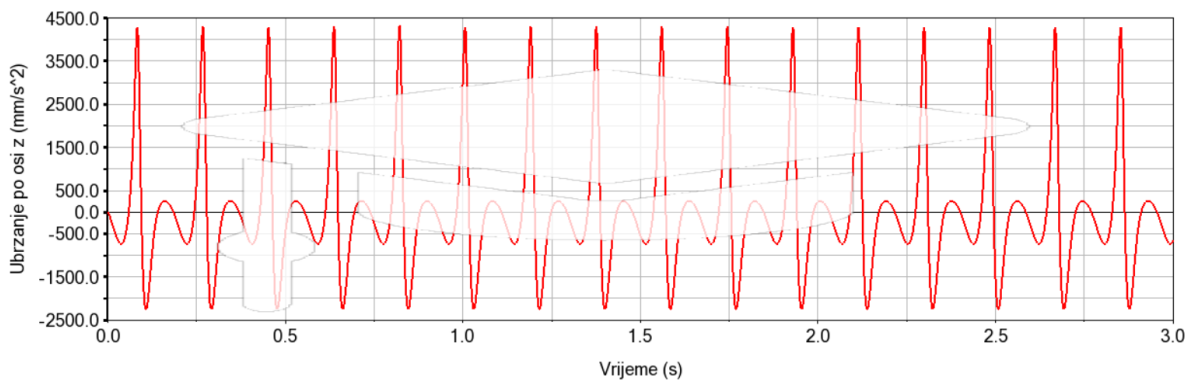
Slika 38. Ubrzanje po osi x

Na slici 39. vidimo ubrzanje krila po osi y u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum ubrzanja iznosi $6.1 \cdot 10^5 \text{ mm/s}^2$, odnosno 610 m/s^2 , dok minimum iznosi $-3.12 \cdot 10^5 \text{ mm/s}^2$, tj. -312 m/s^2 .



Slika 39. Ubrzanje po osi y

Graf na slici 40. prikazuje ubrzanje krila po osi z u periodu od 3 sekunde s korakom 1000. Maksimum ubrzanja iznosi 4330 mm/s^2 , odnosno 4.33 m/s^2 , dok minimum iznosi -2260 mm/s^2 , tj. -2.26 m/s^2 .

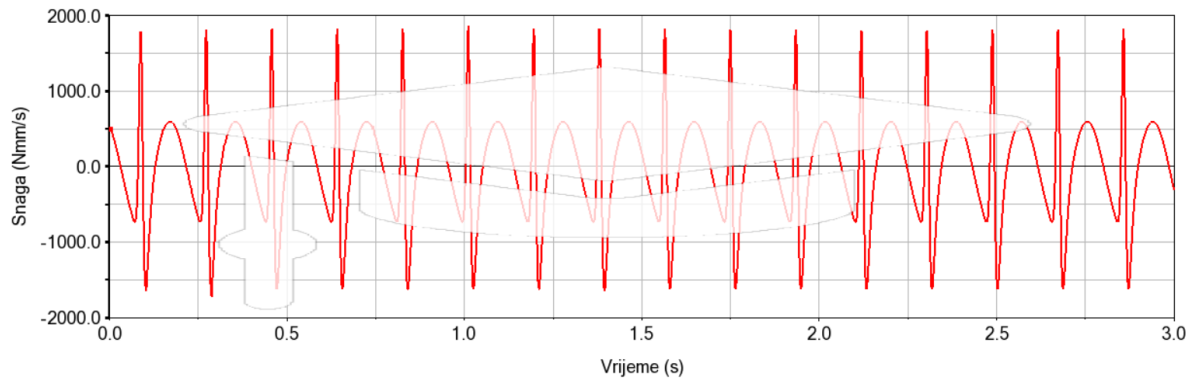


Slika 40. Ubrzanje po osi z

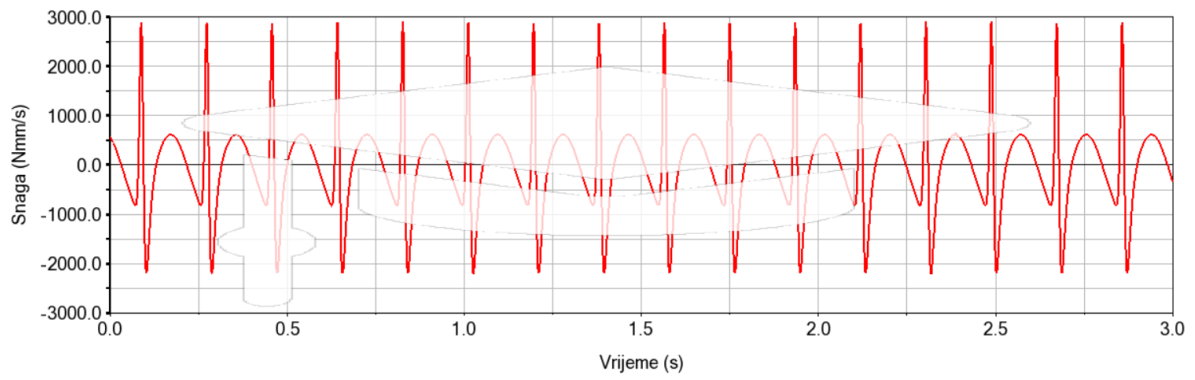
6.4. Analiza snage

Grafovi za snagu izvedeni su za oba mehanizma gibanja. Na slici 41. graf prikazuje snagu za gibanje gore-dolje dok na slici 42. vidimo za kretanje u obliku osmice.

Dobivena snaga za gibanje krila gore-dolje iznosi 1872 mW , odnosno 1.872 W . Za gibanje u obliku osmice dobije se snaga od 2916 mW , odnosno 2.916 W .



Slika 41. Snaga potrebna za gibanje gore-dolje



Slika 42. Snaga potrebna za gibanje u obliku osmice

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza mehanizam mahokrilne letjelice nadahnuta oblikom i funkcijom krila vilinskog konjica. Ova analiza osobito je relevantna s obzirom na sve veći interes za mahokrilne i mikro zračne letjelice (MAV-ove), koje se sve više prepoznaju zbog svog potencijala u različitim primjenama, uključujući praćenje, nadzor, prijevoz, poljoprivredu, topografsko kartiranje, pa čak i svemirsku i vojnu industriju.

Modeliranje mehanizma provedeno je prema zadanoj kinematičkoj shemi koja osigurava postizanje traženog gibanja. Korištenjem programskog paketa MSC Adams dobivena je konstrukcija za mahanje krila gore-dolje te za mahanje u obliku osmice. Analizom pomaka, brzina i ubrzanja dobiveni su rezultati koji zadovoljavaju tražene aerodinamičke performanse. Dobivena snaga za mahanje krila gore-dolje iznosi 1.872W, a snaga za mahanje krila u obliku osmice 2.916W. Kako se za model koriste dva DC generatora izlazne snage 3.2W, možemo zaključiti da generatori daju dovoljno snage za pokretanje ovog mehanizma.

Kvazistacionarnim aerodinamičkim modelom, kojim smo procijenili aerodinamičke fenomene, izračunata je potrebna uzgonska sila koja iznosi 1.7508N, kao i procijenjen raspon krila od 0.19897m. Težina, koju smo dobili množenjem ukupne mase mehanizma $m = 0.178$ kg i gravitacije $g = 9.81$ m/s², iznosi 1.746 N. Usporedbom te dvije sile zaključujemo da mehanizam generira dovoljnu silu uzgona ne samo za lebdenje već i za uzdizanje.

Štoviše, razvoj mikro letjelica (MAV) po uzoru na vilinskog konjica predstavlja uzbudljivu priliku za napredak u području zračne robotike. Integracijom naprednih mehanizama i oponašanjem zamršenih obrazaca leta vilinskog konjica, ovi bi MAV-ovi mogli ponuditi praktična i učinkovita rješenja za različite primjene. To uključuje nadzor, izviđanje, praćenje okoliša i više, što označava značajan korak naprijed u zračnoj robotici.

Konačno, stvoren je i CAD model mehanizma kao temelj za potencijalne primjene u aditivnim tehnologijama, naglašavajući izvedivost ugradnje takvih inovacija u rješenja u stvarnom svijetu.

LITERATURA

- [1] Grant, R. G.: Flight: The Complete History of Aviation, 2010.
- [2] Shyy W., Aono H., Kang C., Liu H.: An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics, 2013.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Lilienthal
- [4] <https://glosbe.com/en/hr/ornithopter - slika 3>
- [5] Vu Phan H, Park HC. Insect-inspired tailless, hover-capable flapping wing robots: Recent progress, challenges, and future directions. Progress in Aerospace Sciences
- [6] W. Shyy, H. Aono, S.K. Chimakurthi, P. Trizila, C.-K. Kang, C.E.S. Cesnik, H. Liu, Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity, Progress in Aerospace Sciences, Volume 46, Issue 7, Pages 284-327, 2010.
- [7] Mahlan, R. P.: Investigation of aerodynamics of flapping wings for micro air vehicle application. Doktorska disertacija, 2013.
- [8] Sanjay P. Sane: Bioinspiration and Biomimicry: What Can Engineers Learn from Biologists?, National Centre for Biological Sciences, Tata Institute of Fundamental Research, GKVK Campus, Bangalore 50065, India, 2016.
- [9] <https://www.mvsd.org/critter-of-the-quarter-meet-the-dragonflies>
- [10] <https://phys.org/news/2018-02-deadly-dragonfly-wings-bacteria.html>
- [11] BERGOU, ATTILA & Xu, Sheng & Wang, Z.. (2007). Passive wing pitch reversal in insect flight. Journal of Fluid Mechanics. 591. 321 - 337. 10.1017/S0022112007008440.
- [12] <https://www.physikinstrumente.co.uk/en/products/piezoelectric-transducers-actuators/bender-actuators>
- [13] Terze, Z., Eiber, A. Introduction to Dynamics of Multibody Systems, interna e-skripta za kolegij "Dinamika konstrukcijskih sustava"- dio objavljen u Dynamics, In: Mechanics, e-book, Institute B of Mechanics, University of Stuttgart, pp. 190-300, (EU classification CZ/98/1/82500/PI/i.1.1.b/FPI), 2001.
- [14] Hu, Y., Ru, W., Liu, Q. *et al.* Design and Aerodynamic Analysis of Dragonfly-like Flapping Wing Micro Air Vehicle. J Bionic Eng 19, 343–354 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42235-021-00137-1>
- [15] <https://store.bitcraze.io/collections/spare-parts-crazyflie-2-0/products/250mah-lipo-battery>
- [16] <https://store.bitcraze.io/collections/spare-parts-crazyflie-2-0/products/4-x-7-mm-dc-motor-pack-for-crazyflie-2>