

# Mehanizam krila mahokrilca

---

**Brzović, Helena**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:859100>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Helena Brzović**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Galić

Student:

Helena Brzović

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Helena Brzović**

JMBAG: **0035225947**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanizam krila mahokrilca**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The mechanism of the ornithopter wing**

Opis zadatka:

Mahokrilac (eng.: *Ornithopter*) je vrsta zrakoplova koji uzgon ostvaruje mašući svojim krilima. U prirodi postoje mnogi primjeri takvog letenja kojeg konstruktori zrakoplova s manje - više uspjeha pokušavaju oponašati.

Iako se zrakoplovi mogu razlikovati u obliku, obično su izgrađeni u veličini organizama kojeg oponašaju. Budući da mahokrilci u svom letu oponašaju ptice ili kukce, mogu se koristiti za primjene poput zračnog promatranja gdje nije poželjno uznemiravati okoliš. Uspješno je prikazana primjena daljinski upravljano mahokrilac nalik velikom kolibriću za moguće špijunske misije.

U radu je potrebno konstruirati mehanizam krila duljine 500 mm a koje bi se koristilo za pogon mahokrilca maksimalne težine 1 kg.

Potrebne proračune provesti prema odgovarajućim normama koristeći besplatni programski paket SMath Studio. Vrijednosti nužne za provedbu proračuna kao i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih sličnih rješenja, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom.

Konstrukcijsko rješenje modelirati u odabranom 3D programskom paketu i prikazati sklopnim crtežom. Kompletno konstrukcijsko rješenje razraditi do razine radioničkih crteža u opsegu koji će biti dogovoren s mentorom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu, podatke odabranih komercijalnih proizvoda, norme kao i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

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

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

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Galić

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Posebno se zahvaljujem mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Galiću za ukazanu pomoć i savjete tijekom pisanja rada.

Helena Brzović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VIII
1. UVOD .....	1
1.1. Mahokrilac .....	1
1.2. Zašto ne zrakoplov? .....	1
1.3. Dijelovi mahokrilca .....	5
1.4. Vrste mahokrilca prema izvedbi krila .....	6
1.5. Povijesni razvoj .....	8
2. ORNITOPTER RC .....	11
2.1. Opis i problematika zadatka .....	11
2.2. Problematika izrade .....	11
2.3. Opravdanje istraživanja .....	11
2.4. Radni princip .....	11
2.5. Aerodinamika oscilirajućeg mehanizma krila .....	11
2.6. Mehanizam leta .....	12
2.7. Komponente RC ornitoptera .....	12
2.1. Primjena .....	13
3. KONSTRUIRANJE MEHANIZMA KRILA .....	14
3.1. Proračun snage .....	14
3.1.1. Snaga potrebna za uzlijetanje .....	15
3.1.2. Snaga potrebna za održavanje minimalne brzine .....	16
3.1.3. Snaga za ubrzavanje do 20 m/s .....	16
3.2. Odabir motora .....	18
3.3. Kinematska skica .....	19
3.4. Ulazno vratilo mehanizma sa zupčanicom, <b>z1</b> .....	21
3.4.1. Kontrola na savijanje u korijenu zuba .....	22
3.4.2. Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka .....	23
3.4.3. Kontrola pojedinih presjeka vratila .....	24
3.4.4. Kontrola odabranih ležaja .....	30
3.5. Prvi međuzupčanik, <b>ZMZ</b> .....	32

3.5.1.	Kontrola na savijanje u korijenu zuba .....	32
3.5.2.	Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka.....	33
3.5.3.	Kontrola pojedinih presjeka vratila .....	34
3.5.4.	Kontrola odabranih ležaja.....	38
3.6.	Zupčanik krila, <b>z2</b> .....	40
3.6.1.	Kontrola na savijanje u korijenu zuba .....	40
3.6.2.	Kontrola pojedinih presjeka vratila .....	40
3.6.3.	Kontrola odabranih ležaja.....	40
3.6.4.	Osovina poluge .....	40
3.7.	Poluga između <b>z2</b> i krila .....	43
3.8.	Osovina krila .....	43
4.	ZAKLJUČAK.....	45
	LITERATURA .....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Mahokrilac [8].....	1
Slika 2.	Kut napada [1].....	2
Slika 3.	Spust krila [1].....	2
Slika 4.	Aktivno kontroliranje kuta napada [1] .....	3
Slika 5.	Zamah krilima [1].....	3
Slika 6.	Ručno rađeni mahokrilac [1].....	5
Slika 7.	Jednokrilac [1].....	6
Slika 8.	Dvokrilac [2] .....	6
Slika 9.	Mahokrilac tandem [1] .....	7
Slika 10.	Sile koje djeluju na tijelo tijekom leta [9] .....	12
Slika 11.	NACA aeroprofil 2412 [10] .....	14
Slika 12.	Veličine odabranog motora [11].....	18
Slika 13.	Pozicija mehanizma 1 [12] .....	20
Slika 14.	Pozicija mehanizma 2 [12] .....	20
Slika 15.	Model zupčanika $z_1$ sa ležajevima i uskočnicima .....	21
Slika 16.	Horizontalna ravnina $z_1$ .....	24
Slika 17.	Vertikalna ravnina $z_1$ .....	25
Slika 18.	Kritični presjeci vratila zupčanika $z_1$ .....	26
Slika 19.	Model međuzupčanika sa ležajem i uskočnikom .....	32
Slika 20.	Horizontalna ravnina $z_{MZ}$ .....	34
Slika 21.	Vertikalna ravnina $z_{MZ}$ .....	35
Slika 22.	Kritični presjeci osovine zupčanika $z_{MZ}$ .....	35
Slika 23.	Model zupčanika krila $z_2$ sa ležajevima i uskočnicima .....	40
Slika 24.	Osovina zupčanika koja pokreće krila.....	41
Slika 25.	Moment savijanja osovine .....	42



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti korištene u proračunu .....	15
Tablica 2. Procijenjene vrijednosti masa komponenti .....	18
Tablica 3. Specifikacije motora[11].....	18
Tablica 4. Dimenzije motora[11] .....	18
Tablica 5. Dopuštene vrijednosti odabranog materijala [1] .....	21
Tablica 6. Karakteristike odabranog ležaja $z_1$ [13].....	31
Tablica 7. Karakteristike odabranog ležaja $z_{MZ}$ [13].....	38
Tablica 8. Karakteristike odabranog ležaja poluge [13].....	41

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

HB-2024-S\_MKM

HB-2024-PS\_M

HB-2024-PP

HB-2024-SP1

HB-2024-SP2

HB-2024-Z1

HB-2024-MZ

HB-2024-Z2

HB-2024-P

HB-2024-D7D

HB-2024-OP

HB-2024-PK

HB-2024-PS\_SK

HB-2024-APK

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$m$	Kg	Masa
$L$	mm	Raspon krila
$v$	m/s	Brzina kretanja
$l_{krila}$	mm	Duljina krila
$b_{krila}$	mm	Širina krila
$l_{trupa}$	mm	Duljina trupa
$b_{trupa}$	mm	Širina trupa
$S$	mm <sup>2</sup>	Površina krila
$A$	mm <sup>2</sup>	Ukupna površina tupa i krila
$C_d$	-	Koeficijent otpora
$C_l$	-	Koeficijent uzgona
$g$	m/s	Gravitacijska konstanta
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća zraka na sobnoj temperaturi
$F_G$	N	Sila težine
$F_{UZ}$	N	Sila uzgona
$P$	W	Snaga
$P_{uzlijetanja}$	W	Snaga uzlijetanja
$P_{održavanja,min}$	W	Snaga održavanja minimalne brzine
$P_{ubrzanja,20}$	W	Snaga ubrzanja do brzine 20 m/s
$P_{održavanja,20}$	W	Snaga održavanja na brzini od 20 m/s
$P_{motora}$	W	Snaga motora
$P_{max}$	W	Maksimalna potrebna snaga
$i$	-	Prijenosni omjer
$K_V$	min <sup>-1</sup> /V	Konstanta brzine motora
$U$	V	Napon
$U_{max}$	V	Maksimalni napon
$I$	A	Struja
$I_{max}$	A	Radna struja
$n_{mot}$	min <sup>-1</sup>	Brzina vrtnje motora
$f$	Hz	Frekvencija
$z$	-	Broj zubi zupčanika
$\sigma_{FD}$	N/mm <sup>2</sup>	Dinamička izdržljivost za naprezanje u korijenu
$S_F$	-	Sigurnost protiv loma u korijenu zuba
$\sigma_{HD}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno Hertzovo naprezanje
$S_H$	-	Sigurnost protiv rupičavosti
$\sigma_{f,dop}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno naprzanje kod savijanja
$S_{potrebno}$	-	Potrebna sigurnost vratila
$T_1$	Nmm	Okretni moment na prvom zupčaniku
$\omega$	s <sup>-1</sup>	Kutna brzina motora
$F_t$	N	Obodna sila
$b$	mm	Širina kontakta
$m$	mm	Modul
$Y_F$	-	Faktor oblika zuba
$Y_\epsilon$	-	Faktor učestalosti opterećenja
$d$	mm	Diobeni promjer
$d_w$	mm	Kinematski promjer
$\lambda$	-	Faktor širine odnosa zuba

$\varepsilon_\alpha$	-	Stupanj prekrivanja
$\varepsilon_{k1}, \varepsilon_{k2}$	-	Značajka prekrivanja pojedinačnog zahvata
$\sigma_F$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje u korijenu zuba
$\sigma_H$	N/mm <sup>2</sup>	Hertzovo kontaktno naprezanje
$Z_H$	-	Faktor oblika zuba
$Z_M$	-	Faktor materijala
$\mu$	-	Poissonov faktor
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$\alpha_w$	°	Pogonski kut zahvatne linije
$\alpha$	°	Kut zahvatne linije
$F_r$	N	Radikalna sila
$F_{Ah}, F_{Av}, F_A$	N	Sile u ležaju A
$F_{Bh}, F_{Bv}, F_B$	N	Sile u ležaju B
$M$	Nmm	Moment savijanja
$M_{red}$	Nmm	Reducirani moment savijanja
$\beta_{kf}$	-	Faktor zareznog djelovanja
$c_1$	-	Faktor prijelaza
$\beta_{kf2}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod savijanja
$D$	mm	Vanjski promjer ležaja
$B$	mm	Širina ležaja
$L_{h10min}$	h	Očekivani vijek trajanja ležaja
$\varepsilon$	-	Eksponent vrijeka trajanja
$C_1$	kN	Dinamička nosivost ležaja
$C$	kN	Dopušteno dinamičko opterećenje ležaja
$a$	m/s <sup>2</sup>	Ubrzanje krila
$y$	mm	Maksimalni otklon krila

## **SAŽETAK**

U ovom radu tema je istraživanje i konstruiranje manjeg mahokrilca.

Obrađene su teoretske zakonitosti bitne za njegovo kretanje, usporedba sa zrakoplovom i sličnim letjelicama. Prikazan je pregled povijesnog razvoja kao i komponenti osnovnog mahokrilca.

Naglasak u konstruiranju ima masa letjelice. Potrebni su što lakši materijali u kompromisu sa dobrom čvrstoćom i izdržljivošću kako bi se zadovoljili uvjeti mase od 1 kilograma. Koncept je sačinjen od vrlo lakih materijala, poliamida 6 i PEEK, u kombinaciji sa nekoliko čeličnih i aluminijskih dijelova kako bi se osigurala trajnost i nosivost letjelice.

## 1. UVOD

### 1.1. Mahokrilac

Jedan od najvećih snova čovjeka oduvijek je bio let krilima. To je izraženo već u grčkoj mitologiji o Dedalu (grčki polubog inženjer) i Ikaru (sin Dedalov) te se pojavljuje u dijelima velikih učenjaka u povijesti, posebno u dizajnu Leonarda da Vincija. Da Vinci se vrlo zanimao za let ptica.

Zaključio je da su ljudi preteški te nedovoljno snažni da bi letjeli koristeći krila jednostavno pričvršćena za ruke. Rješenje se nametnulo kao uređaj u kojem pilot leži na dasci i upravlja s dva velika membranska krila pomoću ručica, papučica i sustava poluga. Zbog ovog djela Leonardo je prozvan izumiteljem mahokrilca.

Mahokrilac, češće poznat kao Ornithopter, predstavlja bespilotnu letjelicu koja simulira let ptica koristeći dinamičko kretanje svojih krilnih površina u svrhu što vjernijeg spoja prirodnih principa i tehnoloških rješenja. Krila generiraju potreban uzgon i potisno djelovanje za let putem mehanizma treptanja, koji rotacijsko kretanje motora pretvara u oscilirajuće kretanje krila. Inspiracija ove ideje potječe iz prirode. Sami naziv *ornithopter* spoj je grčkih riječi '*ornithos*', što znači ptica, i '*pteron*', što znači krilo. Pri proučavanju principa leta uzeti su u obzir također i šišmiši i neki insekti. Ponajviše modeli su ispočetka bili izrađivani prema veličinama organizama koje oponašaju, a nakon nekog vremena razvila se ideja o letjelici s posadom, ručno ili motorno pogonjenom. Uz većinski neuspješne letove, ponegdje se ipak pojavljivao uspjeh te se tako počela stvarati teorija i povijest koja vjerojatno ni dan danas nije došla do svojega vrhunca.

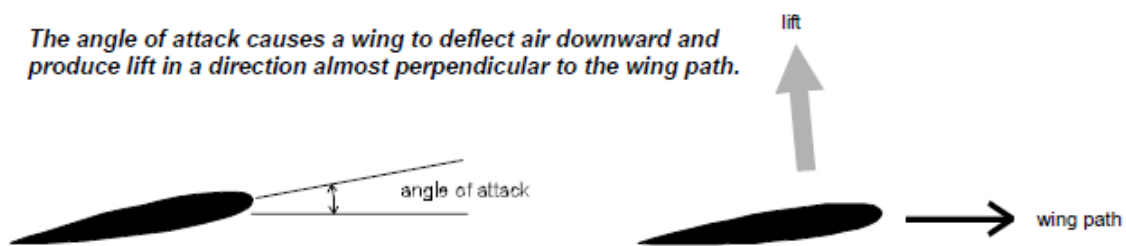


Slika 1. Mahokrilac [8]

### 1.2. Zašto ne zrakoplov?

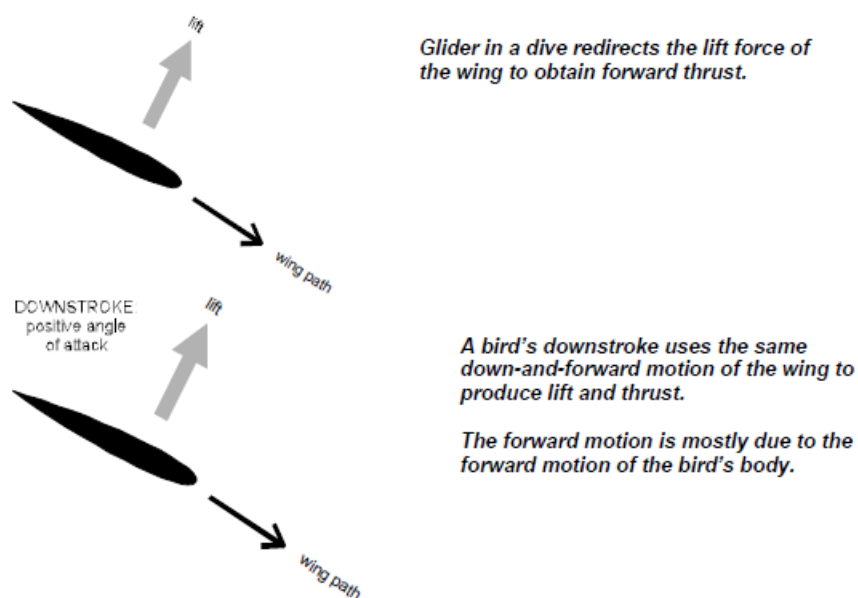
Često ljudi smatraju da je let oscilirajućim krilima nešto neizvedivo i iz toga razloga nastaje oduševljenje pri susretu s krilima kakva se ne mogu vidjeti na zrakoplovu. Međutim, za razumijevanje takvog principa letenja bitno je shvaćati jednostavniji koncept krila zrakoplova.

Kako krilo napreduje kroz zrak, drži se pod blagim kutom, koji se naziva kut napada a označava kut krila u odnosu na smjer kretanja. Na taj način krilo nježno preusmjerava zrak prema dole. Kao posljedica Newtonovog trećeg zakona gibanja, akcija-reakcija, zbog pritiska prema dole stvara se sila suprotnog djelovanja; u ovom slučaju uzgon. Tako se zrakoplov održava u zraku. Međutim zbog postojećeg otpora pri kretanju kroz zrak, zrakoplov ima tendenciju usporavanja smanjujući silu uzgona. U tu svrhu na krilo zrakoplova ugrađeni su propeleri čiji je zadatak nadvladati otpor zraka i održati zrakoplov u pokretu.



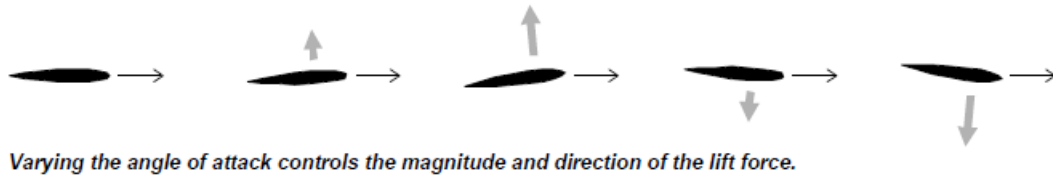
Slika 2. Kut napada [1]

Postoji još jedan način kako svladati otpor. Princip se može objasniti po letećem zmaju (eng. *Kite*), koji održava brzinu ulaskom u manji zaron. S obzirom da se krilo naginje unaprijed, događa se poništavanje sila otpora sa silama uzgona. Da bi se brzina održala kretanje se mora nastaviti prema dole u odnosu na okolni zrak.



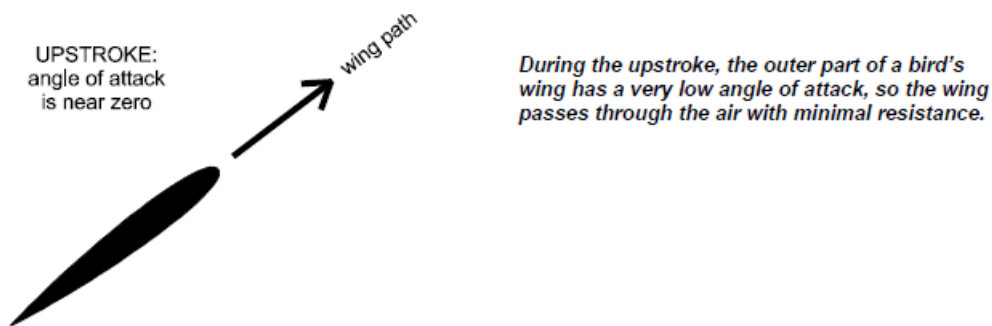
Slika 3. Spust krila [1]

Na isti princip funkcionira let ptica. Snaga se primjenjuje pri spuštanju krila; pokret prema dolje i kut krila uzrokuju snažnu silu uzgona s komponentom naprijed. Za razliku od zmaja, tijelo ostaje gore a samo krila se spuštaju. Dakle, količina uzgona i njegov smjer ovisi o kutu napada iz čega slijedi da ptice i mahokranci manipuliraju kutom napada kako bi letjeli.



Slika 4. Aktivno kontroliranje kuta napada [1]

Česta nedoumica je zašto spust krila ne poništava zamah krila. Prvi razlog koji se može uočiti je fiksirani dio krila blizu tijela, podignut prema gore stvarajući vrlo malen ali pozitivan kut napada, pa djeluje poput krila zrakoplova i uvijek proizvodi uzgon. Drugo, ptice poravnavaju vanjski dio krila sa smjerom kretanja krila. Time stvaraju kut napada koji je približno nula. To omogućava krilu da se vrati u položaj za sljedeći spust bez da stvori previše otpora koji bi mu smetao, te je time njegovo kretanje kroz zrak znatno lakše u usporedbi s kretanjem zrakoplova ili helikoptera.



Slika 5. Zamah krilima [1]

U krilima mahokrilca, kut napada reguliran je aeroelastičnošću. Struktura krila deformira se kao posljedica djelovanja aerodinamičkih sila koje u tom trenutku djeluju. Na prednjoj ivici krila nalazi se čvrsti nosač, dok je ostatak krila fleksibilan. Pravilno odabrana i izrađena razina fleksibilnosti omogućuje svakom dijelu krila održavanje odgovarajućeg kuta napada tijekom ciklusa udaranja krilima. Uspon i spust krila ne zahtijevaju različite fleksibilnosti samih krila.

Druga mogućnost, ona zanimljivija, aktivno upravljanje uvijanjem krila. Omogućuje veću kontrolu nad kutovima napada te vrlo moguće da rezultira učinkovitijim letom. Međutim zahtjeva složeniji dizajn krila i mehanizma mahanja krilima. Taj problem zanimljiv je inženjeru koji želi unaprijediti zrakoplov i njegove nedostatke. Ovo su neke polazne karakteristike za razmatranje:

- Povećanje stupnja korisnosti

Prosječan stupanj korisnog djelovanja iznosi otprilike 80%. Gubitak energije stvara se otporom na lopatici koji djeluje kao otpor okretu propelera. Kod mahokrilca otpor spuštanja krila stvara uzgon a kod uspona krila moguće je naginjati krilnu površinu u smjeru smanjenja otpora. Cijeli koncept otvara mogućnost povećanja stupnja korisnosti.

- Povećanje uzgona



Ptičja krila imaju više načina stvaranja uzgona i potiska koji nisu mogući s propelerima. Prva je tehnika insekata da spajanjem krila te iznenadnim širenjem proizvode snažan potisak. Druga tehnika opisuje odgađanje pada. Oscilirajuća krila ne padaju lako kao ona fiksirana. Zbog ciklusa zamahivanja krilima koji ne staje, pad ima manje vremena da se razvije. Padajući spust krila razvija veliki uzgon. Ove tehnike posebno treba iskoristiti u dijelu sporog leta i lebdenja mahokrila.

- Visoka upravljivost

Upravljanje krilima je vrlo pozitivna karakteristika koja pticama daje neograničene putanje kretanja. Nešto je što se kod krila zrakoplova ne može izvesti koliko god vješt pilot bio.

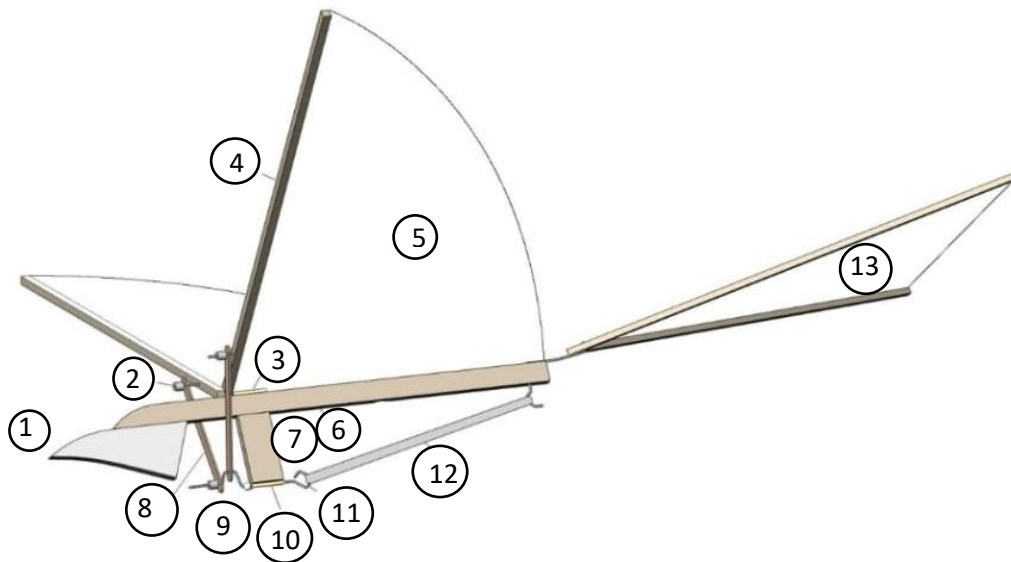
- Smanjenje buke

Zrakoplovi su jako glasni, kao i helikopteri. Međutim buka koja im je zajednička ne dolazi iz njihovih motora nego iz rotirajućih lopatica. Oscilirajuća krila mogu biti gotovo nečujna. Daljnji razvoj mahokrila može dovesti do upravljanja poput helikoptera s boljom potrošnjom goriva i smanjenom bukom.

Može se zaključiti da oscilirajuće kretanje pogonskih aeroprofila kod mahokrila može pružiti bolje rješenje od rotacijskog kretanja propelera na zrakoplovu ili helikopteru.

### 1.3. Dijelovi mahokrilca

Da bi razumjeli funkciju svih dijelova promatrat ćemo najjednostavniju izvedbu mahokrilca, ručno izrađena većinski od drveta, aluminija i papira te pokretana uvijenom gumicom.



Slika 6. Ručno rađeni mahokrilac [1]

Glavni dio koji drži sve dijelove je štap motora (6). Najvažnija mu je uloga održavanje krutosti, a čini većinu težine ovakvog mahokrilca. Rep (13) se nastavlja na štap motora, te služi održavanju ravnoteže i stabilnosti. Uloga glave (1) je zapravo ista kao i kod repa, uz to što se uravnotežuje s repom. Kruto vezan na donju površinu štapa motora nalazi se jarbol (7). Kao što znamo, na brodu jarbol služi za upravljanje jedrima, u ovom slučaju upravlja krilima. Na jarbolu nalazi se ležaj vratila (10). Vratilo sa ekscentrom (9) prenosi okretaje od odvrtnja gumice motora (12) prema polugama krila (8) i dalje na krila. Gumica je na vratilo vezana kukom motora (11). Poluge krila vezane su na krilne nosače (4) u spojnicama poluga (2). na gornjoj površini štapa motora pričvršćena je šarka krila (3) koja drži krilne nosače među kojima je razapeta opna krila (5).

Kako bi mahokrilac letio potrebno je gumicu motora, zakačenu za prednju kuku, uviti te zapeti za stražnju kuku. Gumica pohranjenom energijom se odvija i time preko osovine i poluga uzastopno pomjera krilne nosače. Krilni nosači pomiču membranu te tako dobivamo uzgon i let. Gumica se može uviti i preko 1000 puta.

#### 1.4. Vrste mahokrilca prema izvedbi krila

Ove letjelice raznovrsnije su po oblicima i tjelesnim karakteristikama čak više od stvorova koje imitiraju. Prva bitna razlika je veličina. Najmanji mogu težiti manje od grama, pogonjeni gumicom, dok oni veći a ujedno i teži se pogone na električne motore ili pak motore s unutarnjim izgaranjem. Posebna kategorizacija temelji se na vrsti i načinu izvedbe krila:

- Jednokrilci

Pod ovim nazivom vodi se mahokrilac koji u jednoj ravnini ima dva krila; lijevo i desno krilo.



Slika 7. Jednokrilac [1]

Terminologija je preuzeta od zrakoplova, jer kao što znamo ova krila ne leže u ravnini poput krila zrakoplova. Ova vrsta jednostavna je za izradu, učinkovita i pogodna za brz let unaprijed.

- Dvokrilci

Dvokrilni mahokrilac ima četiri krila koja čine gornji i donji par. Najčešće nema vertikalne praznine između gornjih i donjih krila na mjestu gdje se susreću s trupom. Krila osciliraju zajedno povećavajući pogon, dobiva se dvostruko više krila bez potrebe za udvostručavanjem svakog krila. Mogu biti vrlo stabilni, sposobniji su za sporiji let i mogli bi lebdjeti.

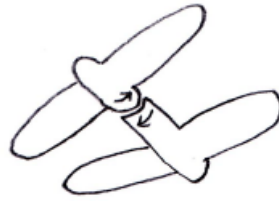


Slika 8. Dvokrilac [2]

Zbog povećanja broja krila očekivano je da je potrebno manje snage i manje osciliranja, međutim smanjuje se prostor zamaha jednog krila za pola a time se smanjuje potrebni okretni moment. Stoga zaključujemo da stopa mahanja mora ostati visoka iako je zahtjev za zamahom manji.

- Tandem

Tandemni ornitopter ima također 2 para krila, ali za razliku od dvokrilaca ovo su prednji i stražnji par krila. Prijenos energije na stražnji par može biti poprilično teško izveden međutim najčešće se to izbjegava korištenjem ljuljajućeg pokreta.



**Slika 9. Mahokrilac tandem [1]**

Skica prikazuje reakcijski tandem.

Na prednji nosač pričvršćena su prednja krila, a pokreće se kao njihalo. Dok jedna strana ide prema gore druga ide prema dolje. Reakcijske sile uzrokuju stalno zakretanje gore pa dolje što zakreće onda i stražnja krila pričvršćena za stražnji nosač.

Unatoč velikom razmaku između parova krila ako prednja krila imaju lagani pozitivan nagib u odnosu na stražnja, nije potreban horizontalni stabilizator. Za modele s blisko postavljenim parovima krila, karakteristike su najbolje ako stražnja krila vode prednja za četvrtinu ciklusa; što bi bilo od gornje pozicije do horizontalne.

## 1.5. Povijesni razvoj

Razvoj ideje počeo je davno, iako se kao prvi izumi često predstavljaju oni iz novije povijesti bez svijesti o starijim teorijama i saznanjima koja su već bila prisutna ranije.

Javnost pripisuje ovaj izum Leonardu da Vinci, što nije neobično. Da Vinci je svoju umjetnost i izume temeljio na pažljivom promatranju prirode i njezinih pojava. Zaključci koje je donio bili su polazišta za mnoga geološka i meteorološka otkrića. Otkrića primijenjene mehanike sadržana u njegovim rukopisima govore koliko je bio ispred svoga vremena te samo zbog nedostatka spoznaje pogonske snage pri letu nije uspio ostvariti potpuni razvoj i let mahokrilca. Međutim, treba razmotriti i ranija saznanja.

### Poslije Krista

Drevni grčki mit o Dedalu i Ikru pokazuje da je ideja o ljudima koji lete pomoću umjetnih krila tisućljećima stara. Najstariji zabilježeni pokušaji datiraju iz 60. godine Poslije Krista i prikazuju poduzetne pojedince koji izrađuju krila od pravih perja i skaču s visokih zgrada, s predvidljivo katastrofalnim rezultatima. Prvi prilično uspješan od tih testova dogodio se tisuću godina kasnije, 1060. godine, kada je redovnik uspio klizati otprilike 200 jardi.

### Rano doba

Gustav Trouve predstavio je prvi službeni izum mahokrilca 1870. godine, na Francuskoj akademiji znanosti u Parizu. Njegova 'ptica' letjela je 60 metara pogonjena eksplozijom dvanaest barutnih punjenja u cijevi. Na oko velika upotreba eksploziva opravdava potreba velike snage za masu pri pokretanju.

Već sljedeće godine Jobert objavljuje ideju monoplana s dva krila poput ptice, pogona gumicom. Gumica razvlačenjem pohranjuje energiju koju otpuštanjem pretvara u gibanje.

1872. godine Alphonse Penaud i Hureau de Villeneuve unapređuju Jobertov izum promjenom načina korištenja gumice. Njihov novi princip gdje se gumica uvija te otpušta, zadržava se sve do danas kao najjednostavniji pogon mahokrilca kućne izrade. Iste godine Jobert objavljuje prvi poznati Biplane Ornithopter, vrsta mahokrilca s četiri krila.

Izumitelji su već intuitivno pri pokušaju smanjenja sila na krilima počeli ih savijati. Međutim 1874. godine Victor Tatin to produbljuje i objavljuje složeni model ptice s mehanizmom aktivnog savijanja krila.

Pichancourt objedinjuje najnovija saznanja u 'Oiseau Mecanique', što znači mehanička ptica. Ovaj model 1879. godine postaje prva komercijalna primjena mahokrilca, model koji aktivno savija krila a pogonjen je uvijenom gumicom.

Za to vrijeme u Australiji, Lawrence Hargrave stvara velik doprinos ovim ranim istraživanjima. Predmet promatranja bila su mu trepćuća i fiksna krila a za pogon bira paru, stlačeni zrak i također napetu gumu. Glavna preporuka bila je povećanje horizontalnog stabilizatora te smanjenje veličine trepćućih krila. Uspjeh se očitovao u letovima dužim od 100 metara.

Sve do 1908. godine izumi su nazivani '*mehaničkim pticama*', a tada dobivaju naziv '*ornithopter*' što u prijevodu na hrvatski glasi '*mahokrilac*'.

### **Zlatno doba**

Prvi pilotirani mahokrilac pojavio se u Njemačkoj, 1929. godine. Alexander Lippisch lansirao je letjelicu povlačenjem užeta na let dugačak oko 300 metara. Zbog načina lansiranja nisu bili sigurni da li je mahanje krilima dovoljno efikasno da u ravnotežnom stanju samo mahanje krila održi brzinu i visinu letenja. S obzirom da je pogon radio čovjek, kratko trajanje leta bilo je opravdano. Narednih godina Aleksander sa svojim studentima razvija nove ideje na ovu temu. Izrađeni su bežični mahokrilci pokretani gumicom i unutarnjim sagorijevanjem. Njihov rad rezultirao je produljenjem vremena leta na čak 16 minuta.

Njemačka se pokazala kao plodno tlo istraživačima ove vrste letjelica. U periodu 1930-ih, Erich von Holst razvija seriju vrlo realističnih modela ptica te također proučava mehanizme sa četiri krila, kao oni kod buba. Maksimizirao je iskoristivost gume raznim sustavima remenica, sve u cilju pronalaska energije za treptanje velikih krila. Njegovi modeli postali su popularni u Americi te su počeli osnivati klubove za modeliranje zrakoplova u svrhu natjecanja gumicom pogonjenih mahokrilaca.

U lipnju 1942. godine Adalbert Schmid lansirao je pilotirani ornithopter na let od 900 metara iznad Münchena. Inspiriran Lippischovim radom letjelica je i dalje imala isti način lansiranja i pogon ljudskom snagom iako se to kasnije promijenilo kada su ugradili motor motocikla od 2,2kW koji mu produžava letove i omogućuje samostalno slijetanje. Pet godina kasnije Schmid izrađuje unaprijeđenu verziju letjelice. Temeljena je na jedrilici ali modificirana kako bi vanjski dijelovi krila mogli treptati.

### **Spencer Seagulls i Orniplane**

Percival H. Spencer, Spence, od svoje trinaeste godine letio je u visećem zmaju kućne izrade. Također je zaslužan za Republic Seabee, popularni amfibijski zrakoplov. 1958. godine predstavio je igračku Whamo Bird. Istovremeno je gradio niz motoriziranih mahokrilaca, poznatih kao 'Spencer Seagulls'. Njihov raspon kretao se do skoro 3 metra. Korišteni su motori zapremnine oko 0,1 kubičnih inča. Posvetio je puno pažnje njihovom izgledu. Koristeći stakloplastiku i ukrašena krila stvorio se vrlo prirodan izgled. U suradnji sa stručnjakom za jedrenje Jackom Stephensonom, 1961. godine razvio je prvi poznati radio-upravljeni (RC) ornithopter, Spencer Orniplane. Imao je gornja i donja krila koja su treptala suprotno jedno drugome kako bi pružila glađu vožnju za vibracijama osjetljivu opremu za radio-upravljanje. Pomoću repa i kormila podešavala su se krila izrađena poput jedra. Orniplane je bio model za dokazivanje valjanosti koncepta budućeg pilotiranog projekta, a poletio je bez pomoći.

## Noviji napredak

Jedan od zapaženih radova, ne previše uspješan, je 1986.godine replika pterosaura Quetzalcoatlus Northropi. Replika je izrađena u pola originalne veličine s rasponom od 5,5 metara. Projekt je financirala tvrtka Aerovironment a zasluge se prepisuju Paulu MacCreadyju. QN imao je zavidne kontrole leta za jednog mahokrilca. Osamnaest servomotora za prednje i stražnje kretanje krila, položaj glave, produženje kandži i druge funkcije bili su računalno kontrolirani. Velika glava činila ga je nestabilnim ali se funkcija glave pretvorila u prednje kormilo kompenzirajući stabilnost. Prednji i stražnji položaj krila je posebnom pažnjom određen kako bi poboljšao uzdužnu stabilnost. Sustav stabilizacije oponašao je živčani sustav letenja životinja. Iako je stabilnost održavalo računalo, smjer leta je određivao pilot sa tla. Razlog zašto ovaj rad nije bio u potpunosti uspješan leži u nedostatku snage za održavanje visine.

Patrick Deshayes 1984. godine počinje sa pisanjem časopisa u svrhu populariziranja mahokrilca, te dijeljenja informacija s njihovim ljubiteljima. Članovi Društva ornitoptera međusobno su dijelili znanja i ideje, te podizali međusobna natjecanja na višu razinu. Zahvaljujući novoj učinkovitoj konfiguraciji 'canard biplane', 1995. godine postavljen je rekord vremena letenja u zatvorenom prostoru na gotovo 22 minute.

Istovremeno u Rusiji Valentin Kiselev leti radio-kontroliranim, dvokrilnim mahokrilcem. Značajka koja je činila razliku bila je debljina krila, debela krila umjesto membranskog tipa. U Njemačkoj 1990. godine Horst Rabiger leti svojim izumom koji se od Kiselevova malo razlikuje; ima aktivno pokretanje vrtnje krila, električnu energiju i monoplane je oblik. Godinu kasnije, Jeremy Harris i James DeLaurier lete s kanadskih brda motornim mahokrilcem s pasivnim krilima debelog profila.

Sljedeći rad, temeljen na saznanjima o Spencer Seagulls, nastao je 1997. godine. Sean Kinkade izrađuje veliki radio-upravljeni mahokrilac, membranskih krila sa fleksibilnim nosačem preko dijagonale. Dizajn se godinu kasnije izbacuje na tržište pod nazivom Skybird kao prvi komercijalni dostupan radio-kontrolirani ornitopter. Potom su uslijedili i električni radio-kontrolirani mahokrilci.

## Mikrozračna vozila (MAV)

Tvrtka Aerovironment sklapa suradnju s Caltech-om, te tako 2000. godine izrađuju prvi mikroornitopter pod nazivom 'MicroBat'. Trokanalna radio-kontrola i tadašnja novost, litij-polimer baterija, pospješile su razvoj MAV-a. uz sposobnost manevriranja u uskim prostorima, bili su jako pogodni za špijunažu. Time inspirirano nastao je 'Mentor', prvi lebdeći mahokrilac s radio-kontrolom, 2002. godine na Sveučilištu u Torontu.

Posljednji značajan doprinos bio je upravo unaprjeđenje MAV-a. Godine 2006. na Tehničkom sveučilištu u Delftu i Sveučilištu Wageningen, pod nazivom Delfly, razvijena je serija malih letjelica s odlikama elemenata lebdenja. Iako prelaze iz lebdenja u letenje te sadrže malu kameru, sa slikama analiziranim na tlu, uz koju omogućuju autonomnu navigaciju.

## 2. ORNITOPTER RC

### 2.1. Opis i problematika zadatka

Ovaj rad donosi prikaz glavnih karakteristika mahokrilca te mehanizma njegovog kretanja. Za polazni model odabran je radio-kontrolirani ornitopter. Proveden je proračun mehanizma krila s dimenzioniranjem i konstrukcijskom razradom do razine radioničkih crteža. Proračun je rađen za cijeli mahokrilac i njegov mehanizam ali ovdje je prikazano samo jedno krilo.

### 2.2. Problematika izrade

Kao što se iz pregleda povijesti vidi, puno je pokušaja izgradnje ove letjelice. Dok su neki bili uspješni i otvarali nova poglavlja u teoriji o mahokrilcima, mnogi nisu uzletjeli ili su letjeli samo kratko vrijeme zbog njihove veće složenosti ili lošeg dizajna. Unatoč porastu broja izgrađenih električnih ornitoptera i dalje ne lete svi. Zajednički problem većine nefunkcionalnih uređaja je nedovoljna količina snage za savladavanje uzgona pri uzlijetanju. Stoga treba se još više približiti anatomiji ptica, kako težinom tako i mehanizmima, dizajnom i odabirom komponenti.

### 2.3. Opravdanje istraživanja

Područje ove vrste letjelica nije ni približno istraženo kao letjelice fiksnih krila. Većinu istraživanja napravili su zaljubljenici i entuzijasti zbog velikog vlastitog interesa, međutim neki veći razvoj kočila su ograničenja troškovima i težinom. Tek nedavno pojavilo se povećano istraživanje sa ciljem smanjenja težine električkih komponenti. Napredak se odvijao metodom pokušaja i pogrešaka ponajviše zbog nedostatka teoretskih znanja o aerodinamici fleksibilnih aeroprofila. Proučavanje postojećih modela pruža uvid u ključne izazove i kompromise uključene u dizajn, te izvedivost funkcionalnih mahokrilaca.

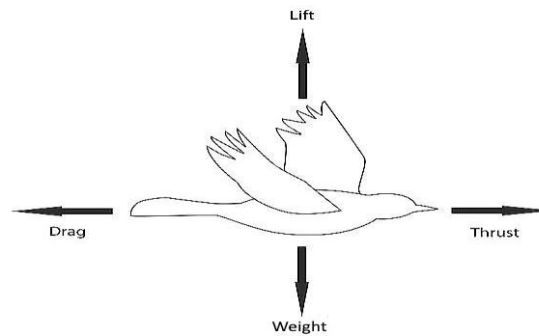
### 2.4. Radni princip

Kao što je objašnjeno u *poglavljju 1.2.*, princip rada ornitoptera isti je kao kod zrakoplova. Kretanje prema naprijed kroz zrak omogućava krilima da svojim oblikom usmjeravaju zrak prema dole proizvodeći uzgon. Jedina razlika u slučaju ovih letjelica su treptajuća krila koja zamjenjuju rotirajuće propelere. Krila imaju dvojni funkciju; pružanje potiska i uzgona. Teorijski oscilirajuće krilo može ostvariti *nulti kut napada* što znatno olakšava prolazak kroz zrak i čini ovakva krila efikasnijim od zrakoplovnih.

### 2.5. Aerodinamika oscilirajućeg mehanizma krila

Generalna teorija letenja može se sročiti u par rečenica. Bilo koji objekt (zrakoplov, helikopter, ptica, mahokrilac) koristi aerodinamične profile kako bi generirao potrebnu potisnu silu i silu uzgona. Pojam aerodinamični profili odnosi se na bilo koji dio ili površinu letjelice koja proizvodi silu kao rezultat svog kretanja u odnosu na zrak. Odlikuju ih posebno oblikovane i zakrivljene površine izrađene u cilju optimiranja pravca strujanja zraka oko tijela kako bi se stvorila razlika tlakova, samim time i uzgon. Na promatrani leteći model djeluju četiri sile. Uz uzgon i potisnu silu, javlja se otpor i djeluje težina modela. Na slici u nastavku prikazan je njihov raspored.





Slika 10. Sile koje djeluju na tijelo tijekom leta [9]

Uzgon je sila koja koristi kontinuitet fluida u kojem se tijelo kreće te Newtonovim zakonima stvara silu okomitu na tok fluida. Uzgonu se suprotstavlja težina koja vuče tijelo prema dolje. Potisak je sila koja pomiče tijelo unaprijed dok se suprotstavlja otporu, aerodinamičkoj sili koja smanjuje brzinu. Iz slike možemo zaključiti da kada ptica lebdi u zraku, održava visinu, njezine sile su poništene. Za pokretanje iz te pozicije, potrebno je stvoriti uzgon koji je po vrijednosti veći od težine tijela. To direktno ovisi o krilima i njihovom dizajnu. Stoga model ornitoptera treba isto napraviti uvažavajući sve spomenute karakteristike. Najviše istaknuta je upravljivost krilima; odgovorna za mogućnosti promjene kuta napada a to je omogućeno fleksibilnošću površine krila.

## 2.6. Mehanizam leta

Mahokrili ne uzlijeću samostalno s tla. S obzirom da nemaju nikakvo postolje niti postoji staza predviđena za uzletanje za pomoć pri uzlijetanju koristi se ljudska ruka. Za pokretanje potrebno je omogućiti dotok snage a sve daljnje kontrole zadaju se daljinskim radio-upravljanjem. Promjena smjera i potiska kontrolirana je servo motorima ugrađenima na dvije različite pozicije; na repu i na trupu. Njihovim podešavanjem upravljamo kretanjama ornitoptera.

## 2.7. Komponente RC ornitoptera

Komponente RC ornitoptera dijele se na mehaničke i električne. Neophodne mehaničke komponente mahokrilca su: trup, zupčanici, krila, mehanizam oscilirajućih krila, mehanizam krila repa i osovina krila. Električne komponente mogu se podijeliti i po svojoj namjeni na komponente pokretanja repa, komponente pokretanja krila te komunikacijske komponente.

### Mehaničke komponente

Trup je dio mahokrilca koji spaja ostale komponente. Prilikom izbora materijala potrebno je obratiti pažnju na njegovu težinu i čvrstoću. Zupčanici su strojni elementi koji prenose okretni moment pomoću veze oblikom. Koriste se kako bi osigurali gibanje krila. Izvedba krila prikazana je u *poglavlju 1.3.* pri ručno rađenom mahokrilcu. Najčešće se koriste membranska krila kod kojih je važno očuvati zaobljeni oblik i kada su ona opterećena. Ovim oblikom krila povećava se i sama nosivost krila bez potrebe povećanja raspona krila. Mehanizam oscilirajućih krila pretvara rotacijski pokret motora u oscilirajući pokret krila. Mehanizam se sastoji od koljenastog vratila i spojnih šipki (potisnika). Motor pokreće vratilo na koje su pričvršćene spojne šipke, dok je drugi kraj pričvršćen na krilo. Mehanizam krila repa omogućuje kretanje mahokrilca u različitim smjerovima. Krilo je obično izvedeno u obliku

slova V s kutom od  $120^\circ$ . Osovina krila spaja krilo i trup mahokrilca. Na nju djeluje moment savijanja koji je posljedica sile otpora zraka na površinu krila.

### Električne komponente

Električne komponente dijele se u tri skupine: izvor energije, komunikacija te pokretanje repa. Beskontaktni istosmjerni motori (eng. *DC brushless*) poboljšavaju efikasnost jer nemaju trenja. Preporučuje se tip eng. *Outrunner*, koji nudi visoki moment pri niskim brzinama. Elektronički regulator brzine (ESC) kontrolira brzinu motora uključivanjem i isključivanjem. Podešava se ovisno o potrebnoj snazi kako bi motor radio sigurno. Najčešće se koriste litij-polimerne (LiPo) i litij-željezo-fosfatne (LiFePO<sub>4</sub>) baterije. LiFePO<sub>4</sub> imaju dulji vijek trajanja i bolju temperaturnu otpornost, ali su teže u usporedbi sa LiPo baterijama. Za komunikaciju koriste se RC predajnik i prijammnik, međusobno izmjenjujući signale o kretanju mahokrilca. Pokretanje repa obavljaju dva servomotora na tijelu mahokrilca kontrolirajući kretanje repa. Time se omogućuje upravljanje smjerom i nagibom mahokrilca.

### 2.1. Primjena

Zbog svojih specifičnosti idealni su za različita područja primjene. S obzirom na njihovu sličnost kukcima i pticama, ornitopteri se bolje uklapaju u okolinu od bespilotnih letjelica i drugih letjelica s fiksnim krilima te uz to imaju bolju upravljivost. Puno su tiši stoga manje ometajući što ih čini pogodnima za veću upotrebu u izviđanju. Koriste se u vojsci i kao pomoć u provođenju zakona. Također pogodni su za vizualni kontakt; inspekcija polja, traženje žrtava, procjena nepristupačnih područja ili jednostavno za zračnu fotografiju. Zračne luke također koriste mahokrilce kako bi otjerali ptice s piste.

### 3. KONSTRUIRANJE MEHANIZMA KRILA

#### 3.1. Proračun snage

Ulazni podaci:

masa,  $m = 1$  kg;

raspon jednog krila,  $L/2 = 500$  mm;

mahokrillac u početnom trenutku miruje,  $v = 0$  m/s.

Proračun se provodi prema pretpostavljenim vrijednostima. Ukoliko krajnje vrijednosti modela ne odstupaju previše od pretpostavljenih, proračun nije potrebno ponavljati. Početne dimenzije letjelice:

Duljina jednog krila,  $l_{\text{trupa}} = 450$  mm;

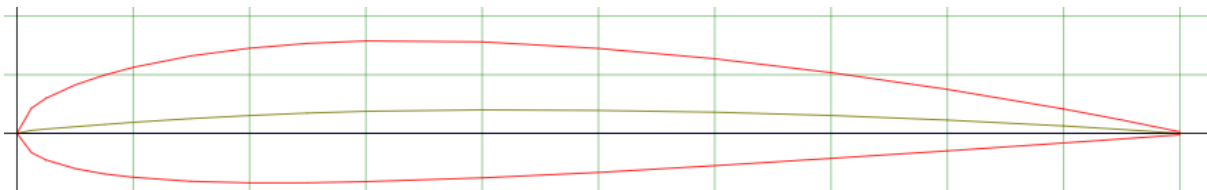
Širina jednog krila,  $b_{\text{trupa}} = 125$  mm;

Površina krila,  $S = 2 \cdot l \cdot b = 2 \cdot 0,450 \cdot 0,125 = 0,1125$  mm<sup>2</sup>;

Površina trupa mahokrilca i krila:

$$A = (b_{\text{trupa}} \cdot l_{\text{trupa}}) + S = (0,100 \cdot 0,300) + 0,1125 = 0,1425 \text{ m}^2. \quad 3.1.$$

Za presjek krila uzet je aerodinamički oblik krila, NACA profil 2412. NACA profili osmišljeni za standardiziranje optimalnih oblika krila koji maksimiziraju uzgon i minimaliziraju otpor. Propisana zakrivljenost krila koristi se za bolje kontroliranje strujanja zraka, time se dobiva stabilniji let sa manje turbulencija. Let je odmah efikasniji jer je potrebna manja snaga za održavanje leta. Svaki pojedini NACA profil zadan je četveroznamenkastim nizom u nazivu od čega svaka znamenka na neki način definira profil. Međutim oni mogu biti definirani i u nekoliko desetaka točki koordinatnog sustava, označavajući jedinični oblik; prva točka nalazi se u ishodištu (0,0) dok zadnja ima koordinatu  $x=1$ . Nakon postavljanja jediničnog profila skaliramo ga na željenu veličinu, u našem slučaju 125 puta.



Slika 11. NACA aeroprofil 2412 [10]

Ostale vrijednosti korištene u daljnjem proračunu prikazane su u tablici 1:

Veličina	Oznaka	Iznos
Koeficijent otpora; maksimalni za profil NACA 2412	$C_d$	0,1
Koeficijent uzgona; maksimalni za profil NACA 2412	$C_l$	1,6
Gravitacijska konstanta	$g$	9,8067 m/s <sup>2</sup>
Gustoća zraka, pri sobnoj temperaturi	$\rho$	1,2041 kg/m <sup>3</sup>

Tablica 1. Vrijednosti korištene u proračunu

### 3.1.1. Snaga potrebna za uzlijetanje

Kako bi mahokrilac se podigao iz mirujućeg položaja potrebno je postići silu uzgona iznosom veću od njegove težine.

Težina mahokrilca:

$$F_G = m \cdot g = 1 \cdot 9,8067 = 9,8067 \text{ N} \quad 3.2.$$

Gdje je:

$F_G$  - sila težine;

$m$  – masa;

$g$  - gravitacijska konstanta.

Pretpostavljeno je da sila uzgona iznosom jednaka težini čime se dobiva brzina potrebna za podizanje.

Sila uzgona:

$$F_{UZ} = F_G = 9,8067 \text{ N}; \quad 3.3.$$

$$F_{UZ} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_l. \quad 3.4.$$

Gdje je:

$\rho$  - gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$v$  – brzina pokretanja;

$S$  - površina krila;

$C_l$  - koeficijent uzgona; maksimalni za ovaj profil.

Brzina pokretanja:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{UZ}}{\rho \cdot S \cdot C_l}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8067}{1,2041 \cdot 0,1125 \cdot 1,6}} \cong 9,5128 \text{ m/s} \quad 3.5.$$

Snaga potrebna za uzlijetanje savladava težinu i otpor zraka pri kretanju.

Snaga uzlijetanja:

$$P_{uzlijetanja} = F_G \cdot v + F_{\text{otpor, min}} \cdot v = F_G \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_d$$

$$P_{uzlijetanja} = 9,8067 \cdot 9,5128 + \frac{1}{2} \cdot 1,2041 \cdot 9,5128^3 \cdot 0,1425 \cdot 0,1 \cong 93,2892 + 7,3854 \cong 100,6746 \text{ W} \quad 3.6.$$

Gdje je:

$v$  - brzina leta;

$\rho$  - gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$A$  - površina trupa mahokrilca i krila;

$C_d$  - koeficijent otpora.

### 3.1.2. Snaga potrebna za održavanje minimalne brzine

Za održavanje trenutne brzine letenja svladava se samo otpor zraka.

Snaga održavanja stalne minimalne brzine:

$$P_{\text{održavanja,min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_d = \frac{1}{2} \cdot 1,2041 \cdot 9,5128^3 \cdot 0,1425 \cdot 0,1 \cong 7,3854 \text{ W.} \quad 3.7.$$

Gdje je:

$v$  - brzina leta;

$\rho$  - gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$A$  - površina trupa mahokrilca i krila;

$C_d$  - koeficijent otpora.

### 3.1.3. Snaga za ubrzavanje do 20 m/s

Snaga za ubrzavanje od 9,5128 m/s do 20 m/s ovisi o otporu i promjeni kinetičke energije.

Snaga ubrzavanja:

$$P_{\text{ubrzavanja,20}} = F_{\text{otpor,20}} \cdot v + \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_d + \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot 1,2041 \cdot 20^3 \cdot 0,1425 \cdot 0,1 + \frac{154,7533}{20} = 76,3714 \text{ W.} \quad 3.8.$$

Gdje je:

$F_{\text{otpor,20}}$  – sila otpora pri ubrzavanju do 20 m/s;

$v$  - brzina leta;

$\Delta E_k$  – promjena kinetičke energije;

$t$  – vrijeme ubrzavanja;

$\rho$  - gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$A$  - površina trupa mahokrilca i krila;

$C_d$  - koeficijent otpora.

Promjena kinetičke energije:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (20^2 - 9,5128^2) = 154,7533 \text{ J.} \quad 3.9.$$

Gdje je:

$m$  – masa mahokrilca;

$v_2$  – ciljane brzina;

$v_1$  – početna brzina.

Snaga ubrzanja(3.8.):

$$P_{\text{ubrzanja},20} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_d + \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot 1,2041 \cdot 20^3 \cdot 0,1425 \cdot 0,1 + \frac{154,7533}{20} = 76,3714 \text{ W.} \quad 3.10.$$

Snaga za održavanje brzine ovisi isključivo o sili otpora pri maksimalnoj, u ovom slučaju ciljanoj, brzini.

$$P_{\text{održavanja},20} = F_{\text{otpor},20} \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_d = \frac{1}{2} \cdot 1,2041 \cdot 20^3 \cdot 0,1425 \cdot 0,1 \cong 68,6337 \quad 3.11.$$

Gdje je:

$F_{\text{otpor},20}$  – sila otpora pri ubrzanju do 20 m/s;

$v$  - brzina leta;

$\rho$  - gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$A$  - površina trupa mahokrilca i krila;

$C_d$  - koeficijent otpora.

## Zaključak

Prema provedenim proračunima mahokrilcu najviše snage je potrebno kod uzlijetanja 100,67W. Potrebno je pronaći motor sa nešto većom snagom zbog gubitaka koji će se pojaviti u mehanizmu. Očekujemo gubitke do 20%.

$$P_{\text{motora}} \geq \frac{P_{\text{max}}}{\eta} = \frac{100,67}{0,8} = 125,84 \text{ W.} \quad 3.12.$$

Gdje je:

$P_{\text{motora}}$  – snaga motora;

$P_{\text{max}}$  – maksimalna potrebna snaga;

$\eta$  – stupanj korisnosti.

### 3.2. Odabir motora

Ograničenje mase kod odabira motora predstavlja najveći problem. Također bitan kriterij je frekvencija motora, ona direktno utječe na frekvenciju krila mahokrilca. Kako bi mehanizam bio što jednostavniji i što lakši ukupni prijenosni omjer unutar mehanizma bit će  $i=1$ .

komponente	masa [kg]
motor	0,2
trup	0,25
mehanizam krila	0,55

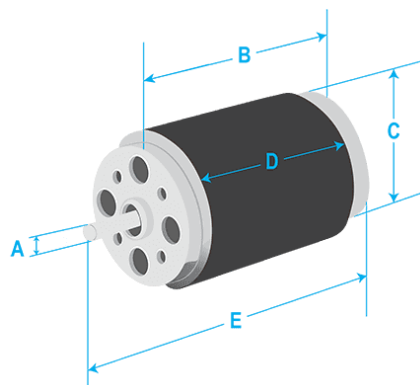
Tablica 2. Procijenjene vrijednosti masa komponenti

U masu motora ulazi masa baterije kao i masa reduktora ukoliko bi bio potreban, što je izvedivo zbog lakih materijala i različitih izvedbi reduktora. Kao najprikladniji izbor motora nameću se motori za dronove zbog sličnih karakteristika leta.

Odabran je motor Turnigy Multistar 4225-610Kv [11].

Snaga	$P=330W$
Konstanta brzine motora	$K_v=610 \text{ min}^{-1}/V$
Maksimalni napon	$U_{\max}=15V$
Radna struja	$I_w=16A$

Tablica 3. Specifikacije motora[11]



Slika 12. Veličine odabranog motora [11]

A (mm)	3
B (mm)	25
C (mm)	42
D (mm)	10
E (mm)	28
m (kg)	0,086

Tablica 4. Dimenzije motora[11]

S obzirom da je brzina okretanja motora zadana konstantom brzine motora  $K_v$  i naponom, potrebno je odrediti napon koji se javlja pri maksimalnoj potrebnoj snazi, snazi pri uzlijetanju mahokrilca.

Napon pri maksimalnoj snazi:

$$U = \frac{P}{I} = \frac{126}{16} = 7,875 \text{ V} \quad 3.13.$$

Gdje je:

$P$  – maksimalna snaga, snaga pri uzlijetanju;

$I$  – radna struja.

Brzina okretanja motora:

$$n_{\text{mot}} = U \cdot K_v = 7,875 \cdot 610 = 4803,75 \text{ min}^{-1} \quad 3.14.$$

Gdje je:

$U$  – napon;

$K_v$  – konstanta brzine motora.

Frekvencija motora:

$$f = \frac{n_{\text{mot}}}{60} = \frac{4803,75}{60} = 80,06 \text{ Hz.} \quad 3.15.$$

Gdje je:

$n_{\text{mot}}$  – brzina okretanja motora.

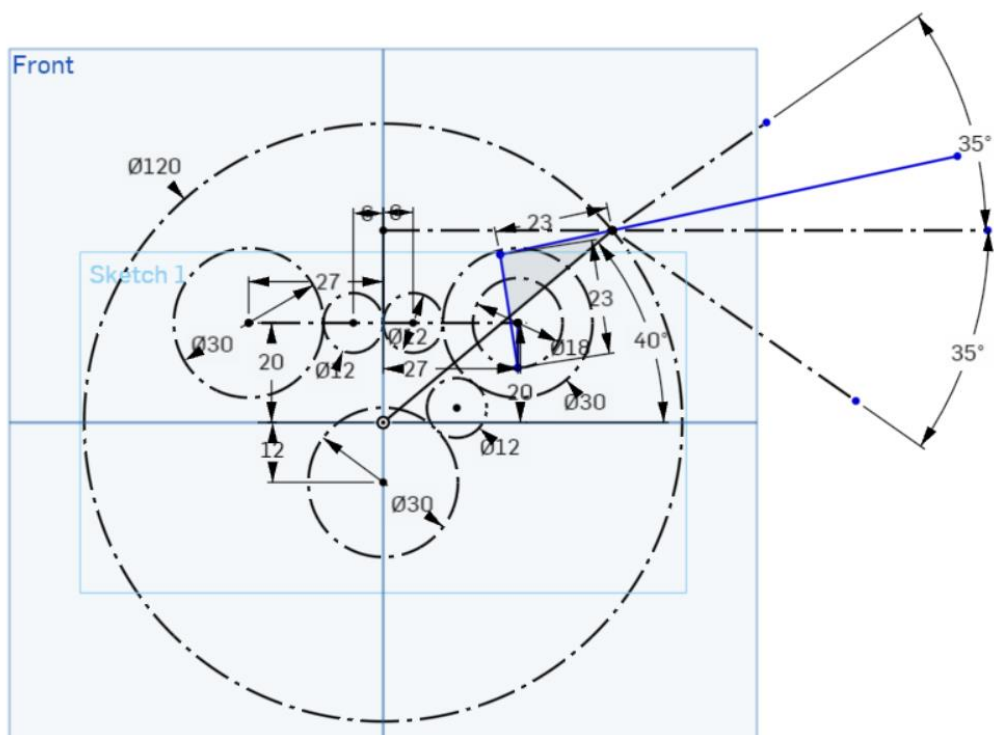
Ova frekvencija za mahokrilca bila bi prevelika stoga nam je potreban reduktor. S obzirom na masu motora od 86g, reduktor neće previše povećati masu ukoliko je kao i cijeli mehanizam izrađen od lakih materijala. Sa reduktorom 1:10 dolazimo do frekvencije od 8 Hz što je raspon prosječnih frekvencija mahokrilca, 5-10 Hz.[8]

### 3.3. Kinematska skica

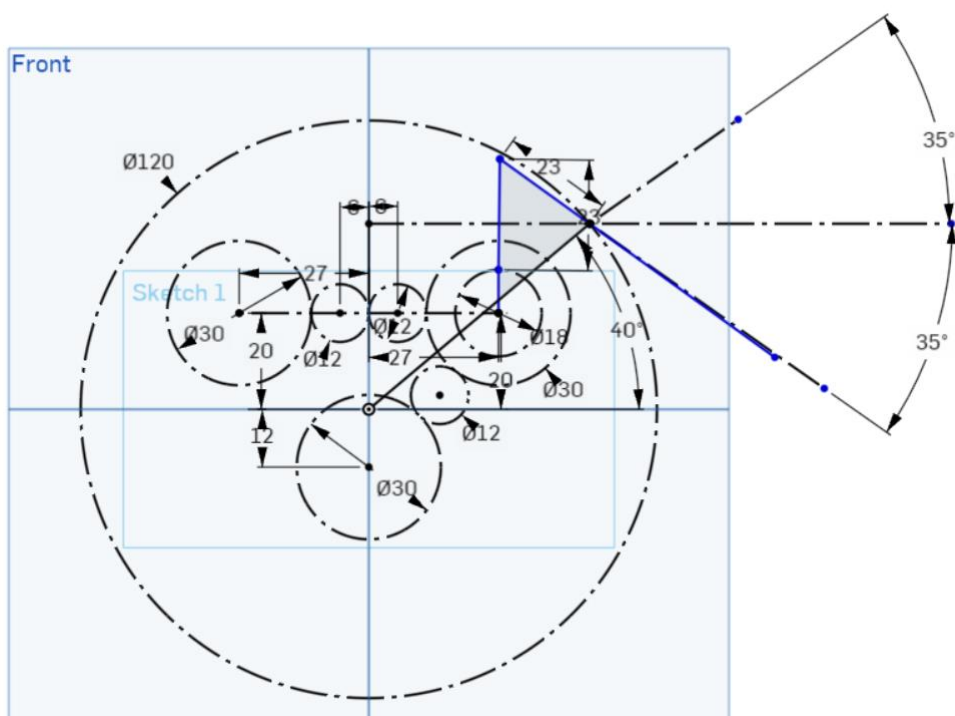
Koristeći se CAD online softverom Onshape izrađena je kinematska skica.

Ideja je da se vratilom koje je izrađeno zajedno sa zupčanicom dovodi okretni moment. Za postizanje željenog prijenosnog omjera,  $i=1$ , potrebno je izabrati pogonski i gonjeni zupčanik s jednakim brojem zubi. Pošto to nije moguće izvesti direktnim prijenosom bez narušavanja ravnoteže uveden je međuzupčanik. Međuzupčanik je uzet kao najmanji i najlakši mogući izveden,  $z_{MZ}=12$ . Ostale dimenzije odabrane su proizvoljno kako bi se održala kompaktnost mehanizma. Zahtijevani kut osciliranja krila je  $70^\circ$  te su prema tome izabrane duljine poluga.





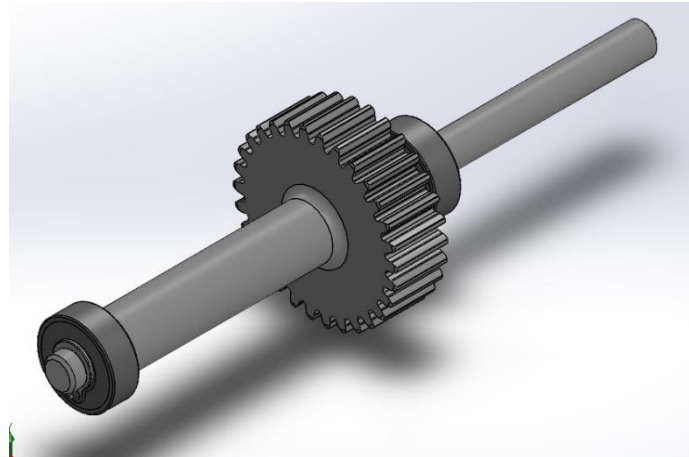
Slika 13. Pozicija mehanizma 1 [12]



Slika 14. Pozicija mehanizma 2 [12]

### 3.4. Ulazno vratilo mehanizma sa zupčanikom, $z_1$

Kao referenca pri izradi korišten je zupčanik GEABM1.0-30-10-A-15 dobavljača MiSUMi. Zupčanik prema podacima proizvođača ima broj zubi  $z_1=30$ , s provrtom  $\varnothing 15$ . Zbog specifičnosti mehanizma ovaj zupčanik izrađen je iz jednog dijela zajedno sa potrebnim vratilom promjera  $\varnothing 10\text{mm}/\varnothing 6\text{mm}$ . Slijede provjere čvrstoće zupčanika i vratila te ležajeva.



Slika 15. Model zupčanika  $z_1$  sa ležajevima i uskočnicima

Pošto je cilj relativno mala masa konstrukcije, materijal neće biti čelik. Odabrani materijal je poliamid 6. S obzirom na nedovoljno istraženo područje dozvoljene vrijednosti nisu specificirane točno po materijalima već su zadane za skupinu materijala. U dostupnoj literaturi [1] nema vrijednosti za traženu skupinu termoplasta stoga uzimamo najbližnju dostupnu, duromeri. Vrijednost koja se uzima određena je za cijelu grupu materijala duromera, prešana umjetna smola sa grubim slojevitim punilom, razlog tomu je manje dopuštene vrijednosti od druge vrste punjenja.

Veličine	Dopuštene vrijednosti
Dinamička izdržljivost za naprezanje u korijenu, (jednosmjerno opterećenje)	$\sigma_{FD} = 50 \text{ N/mm}^2$
Sigurnost protiv loma	$S_F = 1,2$
Dopušteno Hertzovo naprezanje	$\sigma_{HD} = 110 \text{ N/mm}^2$
Sigurnost protiv rupičavosti	$S_H = 1,2$
Dopušteno naprezanje materijala kod savijanja	$\sigma_{f,dop} = 100 \text{ N/mm}^2$ [6]
Potrebna sigurnost vratila	$S_{potrebno} = 1,5$ [5]

Tablica 5. Dopuštene vrijednosti odabranog materijala [1]

Moment koji zupčanik treba prenijeti proračunat je na temelju maksimalne snage potrebne mahokrillcu:

$$T_1 = \frac{P}{\omega} = \frac{125,84}{50,27} = 2,503 \text{ Nm}; \quad 3.16.$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2\pi \cdot 8 = 50,27 \text{ s}^{-1} \quad 3.17.$$

Gdje je:

$\omega$  – kutna brzina motora;

$f$  – frekvencija motora.

### 3.4.1. Kontrola na savijanje u korijenu zuba

Naprezanje u korijenu zuba:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon. \quad 3.18.$$

Gdje je:

$F_t$  – obodna sila;

$b$  – širina kontakta;

$m$  – modul;

$Y_F$  – faktor oblika zuba;

$Y_\varepsilon$  – faktor učestalosti opterećenja.

Obodna sila:

$$F_t = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 2503}{30} = 166,87 \text{ N}. \quad 3.19.$$

Gdje je:

$T_1$  – okretni moment na zupčaniku  $z_1$ ;

$d_{w1}$  – kinematski promjer.

Kinematski promjer:

$$d_{w1} = d_1 = z m = 30 \text{ mm}. \quad 3.20.$$

Gdje je:

$d_1$  – diobeni promjer;

$z$  – broj zubi;

$m$  – modul.

Faktor oblika: [4]

$$Y_F = f(z = 30, x = 0, \beta = 0) = 2,575 \quad 3.21.$$

Širina kontakta:

$$b = \lambda m = 25 \text{ mm}. \quad 3.22.$$

Gdje je:

$\lambda = 25$  – faktor širine odnosa zuba;

$m = 1 \text{ mm}$  – modul.

Faktor učestalosti opterećenja [4]

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_\alpha} = \frac{1}{1,49} = 0,67. \quad 3.23.$$

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_{k1} + \varepsilon_{k2} = 0,77 + 0,72 = 1,49; \quad 3.24.$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,49 > \varepsilon_{\min} = 1,25 \text{ (preporuka)} \quad 3.25.$$

$$\varepsilon_{k1} = f(\alpha = 20^\circ, z_1 = 30) \approx 0,77 \quad 3.26.$$

$$\varepsilon_{k2} = f(\alpha = 20^\circ, z_2 = 12) \approx 0,72 \quad 3.27.$$

Gdje je:

$\varepsilon_\alpha$  – stupanj prekrivanja;

$\varepsilon_{k1}$ ,  $\varepsilon_{k2}$  – značajka prekrivanja pojedinačnog zahvata. [4]

Naprezanje u korijenu zuba (3.18.):

$$\sigma_{Fz1} = \frac{166,87}{25} \cdot 2,575 \cdot 0,67 = 11,52 \text{ N/mm}^2 \quad 3.28.$$

Postignuta sigurnost na lom kod  $z_1$ :

$$S_{Fz1} = \frac{\sigma_{FD}}{\sigma_{Fz1}} = 4,34 > 1,2: \quad 3.29.$$

Gdje je:

$\sigma_{FD}$  – dopušteno naprezanje materijala u korijenu zuba;

$\sigma_{Fz1}$  – postojeće naprezanje u korijenu zuba.

Zupčanik zadovoljava.

### 3.4.2. Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka

Hertzovo kontaktno naprezanje za zupčanike od termoplasta:

$$\sigma_H = Z_M Z_H \sqrt{\frac{u+1}{u} \cdot \frac{F_t}{b d_1}}. \quad 3.30.$$

Gdje je:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{30}{12} = 2,5 \text{ – prijenosni omjer;}$$

$F_t$  – obodna sila;

$b$  – širina kontakta;

$d_1$  – diobeni promjer.

Faktor materijala:

$$Z_M = \sqrt{\frac{2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)\pi}} = 32,42 \sqrt{\text{N/mm}^2} \quad 3.31.$$

Gdje je:

$\mu_1 = \mu_2 = 0,415$  - Poissonovi brojevi za PA6[6];

$E_1 = E_2 = 2800 \text{ N/mm}^2$  - modul elastičnosti za PA6[6].

Faktor oblika zuba:

$$Z_H = \sqrt{\frac{1}{\tan \alpha_w \cdot \cos^2 \alpha}} = 1,76; \quad 3.32.$$

Gdje je:

$\alpha_w$  – pogonski kut zahvatne linije;

$\alpha$  – kut zahvatne linije.

Hertzovo kontaktno naprezanje (3.30.):

$$\sigma_{Hz1} = 32,42 \cdot 1,76 \cdot \sqrt{\frac{2,5+1}{2,5} \cdot \frac{166,87}{10 \cdot 30}} = 50,35 \text{ N/mm}^2. \quad 3.33.$$

Postignuta sigurnost od rupičavosti na  $z_1$ :

$$S_H = \frac{\sigma_{HD}}{\sigma_{Hz1}} = 2,18 > 1,2: \quad 3.34.$$

Gdje je:

$\sigma_{HD}$  – dopušteno Hertzovo naprezanje materijala;

$\sigma_{Hz1}$  – postojeće Hertzovo naprezanje.

Zupčanik zadovoljava.

### 3.4.3. Kontrola pojedinih presjeka vratila

Obodna sila na zupčaniku:

$$F_t = 166,87 \text{ N}. \quad 3.35.$$

Radijalna sila na zupčaniku:

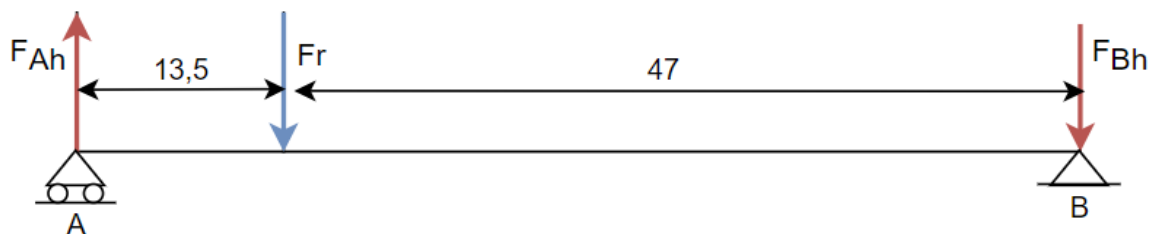
$$F_r = F_t \cdot \cos \alpha = 166,87 \cdot \tan 20^\circ = 60,74 \text{ N}. \quad 3.36.$$

Gdje je:

$F_t$  – obodna sila;

$\alpha$  – kut zahvatne linije.

Mase ovih dijelova mjere se u gramima stoga su njihove težine zanemarene; uračunate su u korisnost mehanizma.



Slika 16. Horizontalna ravnina  $z_1$

Suma horizontalnih sila oko točke ležaja B:

$$\Sigma M_{Bh} = 0; \quad 3.37.$$

$$47,5 \cdot F_r - 61,5 \cdot F_{Ah} = 0 \quad 3.38.$$

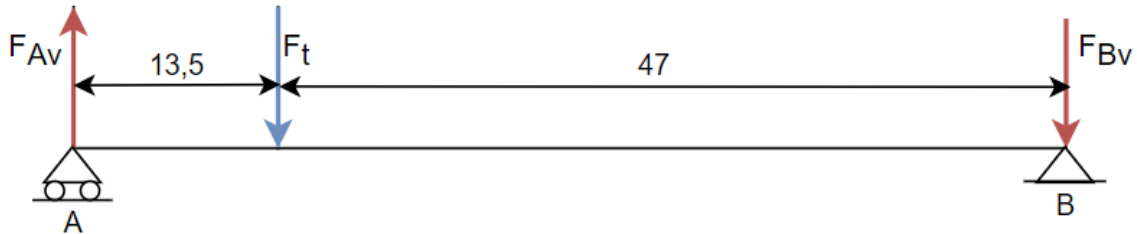
$$61,5 \cdot F_{Ah} = 47,5 \cdot 60,74. \quad 3.39.$$

$$F_{Ah} = 46,91 \text{ N} \quad 3.40.$$

Suma sila u horizontalnoj ravnini:

$$\Sigma Y_h = 0; \quad 3.41.$$

$$F_{Bh} = F_t - F_{Ah} = 13,83 \text{ N} \quad 3.42.$$



Slika 17. Vertikalna ravnina  $z_1$

Suma vertikalnih sila oko točke ležaja B:

$$\Sigma M_{Bv} = 0; \quad 3.43.$$

$$47,5 \cdot F_t - 61,5 \cdot F_{Av} = 0 \quad 3.44.$$

$$61,5 \cdot F_{Av} = 47,5 \cdot 166,87 \quad 3.45.$$

$$F_{Av} = 128,88 \text{ N} \quad 3.46.$$

Suma sila u vertikalnoj ravnini:

$$\Sigma Y_v = 0; \quad 3.47.$$

$$F_{Bv} = F_t - F_{Av} = 37,99 \text{ N} \quad 3.48.$$

Gdje su:

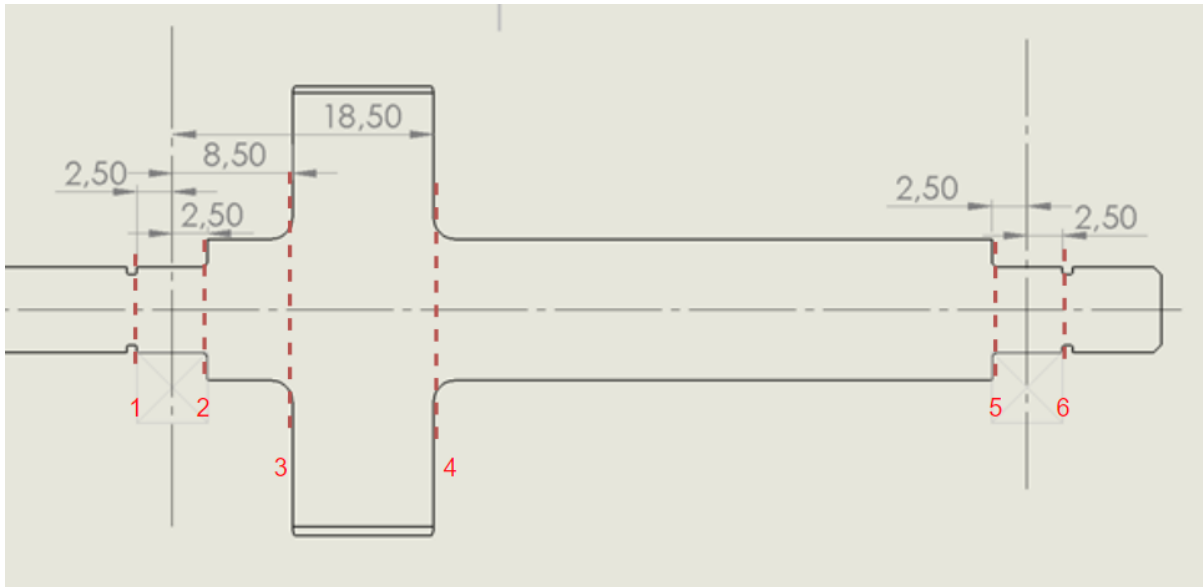
$F_{Ah}$ ,  $F_{Av}$  – horizontalna i vertikalna komponenta u ležajnom mjestu A;

$F_{Bh}$ ,  $F_{Bv}$  – horizontalna i vertikalna komponenta u ležajnom mjestu B;

Rezultantne radijalne sile u A i B osloncu:

$$F_A = \sqrt{F_{Ah}^2 + F_{Av}^2} = 137,15 \text{ N} \quad 3.49.$$

$$F_B = \sqrt{F_{Bh}^2 + F_{Bv}^2} = 40,43 \text{ N} \quad 3.50.$$



Slika 18. Kritični presjeci vratila zupčanika z1

**Presjek 1**

Moment u presjeku 1:

$$M_1 = 2,5 \cdot F_A = 2,5 \cdot 137,15 = 342,88 \text{ Nmm} \quad 3.51.$$

Gdje je:

 $F_A$  – radialna sila u osloncu A.

Reducirani moment u presjeku 1:

$$M_{red1} = M_1 \beta_{kf(1)} = 342,88 \cdot 1 = 342,88 \text{ Nmm} \quad 3.52.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{kf} = 1 + c_1(\beta_{kf2} - 1) \quad 3.53.$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = \frac{6}{5,7} = 1,05\right) = 0 \quad 3.54.$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = \frac{0,1}{5,7} = 0,02\right) = 1,95 \quad 3.55.$$

$$\beta_{kf(1)} = 1 \quad 3.56.$$

Gdje je:

 $c_1$  – faktor prijelaza, $\beta_{kf2}$  – faktor zareznog djelovanja kod savijanja;

Reducirano naprezanje u presjeku 1:

$$\sigma_{fred1} = \frac{M_{red1}}{W_1} = \frac{32 \cdot M_{red1}}{d_1^3 \cdot \pi} = \frac{32 \cdot 342,88}{5^3 \cdot \pi} = 27,94 \text{ N/mm}^2 \quad 3.57.$$

Gdje je:

 $d_1 = 5 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 1.

Postignuta sigurnost koja vrijedi za sve presjeke u ovome proračunu:

$$S_{\text{postignuto}} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fdop}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{fred}}} = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred}}} \geq S_{\text{potrebno}} = 1,5 \quad 3.58.$$

Gdje je:

$b_1 = f(d = 5) = 1$  – faktor veličine strojnog oblika;

$b_2 = f(R_{\text{max}} = 6,3, R_m) = 1$  - faktor kvalitete obrade površine;

$\varphi = 1$ , faktor udara.

Sigurnost u presjeku 1:

$$S_1 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred1}}} = \frac{100}{27,94} = 3,57 > 1,5 \quad 3.59.$$

Presjek zadovoljava.

### Presjek 2

Moment u presjeku 2:

$$M_2 = 2,5F_A = 2,5 \cdot 137,15 = 342,88 \text{ Nmm} \quad 3.60.$$

Gdje je:

$F_A$  – radijalna sila u osloncu A.

Reducirani moment u presjeku 2:

$$M_{\text{red2}} = M_2 \beta_{\text{kf}(2)} = 342,88 \cdot 1,45 = 497,18 \text{ Nmm} \quad 3.61.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1(\beta_{\text{kf2}} - 1) \quad 3.62.$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = \frac{10}{6} = 1,67\right) = 0,9 \quad 3.63.$$

$$\beta_{\text{kf2}} = f\left(\frac{\rho}{d} = \frac{0,5}{6} = 0,08\right) = 1,5 \quad 3.64.$$

$$\beta_{\text{kf}(2)} = 1,45 \quad 3.65.$$

Gdje je:

$c_1$  – faktor prijelaza,

$\beta_{\text{kf2}}$  – faktor zareznog djelovanja kod savijanja;

Reducirano naprezanje u presjeku 2:

$$\sigma_{\text{fred2}} = \frac{M_{\text{red2}}}{W_2} = \frac{32 M_{\text{red2}}}{d_2^3 \pi} = \frac{32 \cdot 497,18}{6^3 \pi} = 23,45 \text{ N/mm}^2 \quad 3.66.$$

Gdje je:

$d_2 = 6 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 2.

Sigurnost u presjeku 2:

$$S_2 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred2}}} = 4,26 > 1,5 \quad 3.67.$$

Presjek zadovoljava.



**Presjek 3**

Moment u presjeku 3:

$$M_3 = 8,5 F_A = 8,5 \cdot 137,15 = 1165,78 \text{ Nmm} \quad 3.68.$$

Gdje je:

$F_A$  – radijalna sila u osloncu A.

Reducirani moment u presjeku 3:

$$M_{\text{red3}} = M_3 \beta_{\text{kf}(3)} = 1,4 \cdot 1165,78 = 1632,09 \text{ Nmm} \quad 3.69.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) \quad 3.70.$$

$$c_1 = f \left( \frac{D}{d} = \frac{30}{10} = 3 \right) = 1 \quad 3.71.$$

$$\beta_{\text{kf2}} = f \left( \frac{\rho}{d} = \frac{1,5}{10} = 0,15 \right) = 1,4 \quad 3.72.$$

$$\beta_{\text{kf}(3)} = 1,4 \quad 3.73.$$

Gdje je:

$c_1$  – faktor prijelaza,

$\beta_{\text{kf2}}$  – faktor zareznog djelovanja kod savijanja;

Reducirano naprezanje u presjeku 3:

$$\sigma_{\text{fred3}} = \frac{M_{\text{red3}}}{W_3} = \frac{32 M_{\text{red3}}}{d_3^3 \pi} = \frac{32 \cdot 1632,09}{10^3 \pi} = 16,62 \text{ N/mm}^2 \quad 3.74.$$

Gdje je:

$d_3=10 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 3.

$$S_3 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred3}}} = 6,01 > 1,5 \quad 3.75.$$

Presjek zadovoljava.

**Presjek 4**

Moment u presjeku 4:

$$M_4 = \sqrt{M_{\text{h4}}^2 + M_{\text{v4}}^2} = 3246,36 \text{ Nmm} \quad 3.76.$$

Moment u horizontalnoj ravnini:

$$M_{\text{h4}} = 5 F_r - 39,5 F_{\text{Bh}} - 18,5 F_{\text{Ah}} = -1110,42 \text{ Nmm} \quad 3.77.$$

Moment u vertikalnoj ravnini:

$$M_{\text{v4}} = 5 F_t - 39,5 F_{\text{Bv}} - 18,5 F_{\text{Av}} = -3050,54 \text{ Nmm} \quad 3.78.$$

Gdje je:

$F_{\text{Ah}}, F_{\text{Av}}$  – horizontalna i vertikalna komponenta u ležajnom mjestu A;

$F_{\text{Bh}}, F_{\text{Bv}}$  – horizontalna i vertikalna komponenta u ležajnom mjestu B.

Reducirani moment u presjeku 3:

$$M_{\text{red4}} = M_4 \beta_{\text{kf}(4)} = 3246,36 \cdot 1,45 = 4707,22 \text{ Nmm} \quad 3.79.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}(4)} = \beta_{\text{kf}(3)} = 1,45 \quad 3.80.$$

Reducirano naprezanje u presjeku 4:

$$\sigma_{\text{fred4}} = \frac{M_{\text{red4}}}{W_4} = \frac{32 M_{\text{red4}}}{d_4^3 \pi} = \frac{32 \cdot 4707,22}{10^3 \pi} = 47,95 \text{ N/mm}^2 \quad 3.81.$$

Gdje je:

$d_4=10 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 4.

Sigurnost na presjeku 4:

$$S_4 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred4}}} = 2,08 > 1,5 \quad 3.82.$$

Presjek zadovoljava.

### **Presjek 5**

Moment u presjeku 5:

$$M_5 = 2,5 F_B = 2,5 \cdot 40,43 = 101,08 \text{ Nmm} \quad 3.83.$$

Reducirani moment u presjeku 5:

$$M_{\text{red5}} = M_5 \beta_{\text{kf}(5)} = 101,08 \cdot 1,45 = 146,57 \text{ Nmm} \quad 3.84.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}(5)} = \beta_{\text{kf}(2)} = 1,45 \quad 3.85.$$

Reducirano naprezanje u presjeku 5:

$$\sigma_{\text{fred5}} = \frac{M_{\text{red5}}}{W_5} = \frac{32 M_{\text{red5}}}{d_5^3 \pi} = \frac{32 \cdot 146,57}{6^3 \pi} = 6,91 \text{ N/mm}^2 \quad 3.86.$$

Gdje je:

$d_5=6 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 5.

Sigurnost u presjeku 5:

$$S_5 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred5}}} = 14,47 > 1,5 \quad 3.87.$$

Presjek zadovoljava.

### **Presjek 6**

Moment u presjeku 6:

$$M_6 = M_5 = 101,08 \text{ Nmm} \quad 3.88.$$

Reducirani moment u presjeku 6:

$$M_{\text{red6}} = M_6 \beta_{\text{kf}(6)} = 101,08 \cdot 1,38 = 139,49 \text{ Nmm} \quad 3.89.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{kf(6)} = \beta_{kf(1)} = 1,38 \quad 3.90.$$

Reducirano naprezanje u presjeku 6:

$$\sigma_{fred6} = \frac{M_{red6}}{W_6} = \frac{32 M_{red6}}{d_6^3 \pi} = \frac{32 \cdot 139,49}{5^3 \pi} = 11,37 \text{ N/mm}^2 \quad 3.91.$$

Gdje je:

$d_6=5$  mm – promjer na mjestu presjeka 6.

Sigurnost u presjeku 6:

$$S_6 = \frac{\sigma_{fdop}}{\sigma_{fred6}} = 8,79 > 1,5 \quad 3.92.$$

Presjek zadovoljava.

#### 3.4.4. Kontrola odabranih ležaja

Za provjeru uzimaju se nepogodniji uvjeti za opterećenje u ležaju, to je u ovom slučaju ležaj A.

$$P_r = F_r = F_A = 137,15 \text{ N} \quad 3.93.$$

Gdje je:

$P_r$  – ekvivalentno radijalno opterećenje;

$F_r$  - radijalna sila;

$F_A$  – sila u ležaju A.

Za očekivani vijek trajanja ležajeva uzimamo  $L_{10hmin} = 1000h$ .

Također, uzet je kuglični ležaj te je eksponent vijeka trajanja za ležajeve s teorijskim dodirom u točki  $\varepsilon=3$ .

Brzina vrtnje u okretajima u minuti:

$$n_m = \frac{n_{motora}}{10} = \frac{4803,75}{10} = 480,37 \text{ min}^{-1} \quad 3.94.$$

#### Kontrola dinamičke nosivosti ležaja

$$C_1 = P \cdot \left( \frac{60 \cdot n_m \cdot L_{10hmin}}{10^6} \right)^{1/\varepsilon} \quad 3.95.$$

Gdje je:

$P$  – ekvivalentno opterećenje ležaja;

$n_m$  – brzina vrtnje u minutama;

$L_{h10min}$  – očekivani vijek trajanja ležaja;

$\varepsilon$  - eksponent vijeka trajanja za ležajeve s teorijskim dodirrom u liniji

$C$  – dopuštena dinamička nosivost ležaja

$$C_1 = 137,15 \cdot \left( \frac{60 \cdot 480,37 \cdot 1000}{10^6} \right)^{1/3} = 420,51 \text{ N} < C \quad 3.96.$$

Prvotno su trebali biti korišteni plastični ležajevi, međutim vrijednosti njihovih dopuštenih dinamičkih opterećenja ne prelaze par desetaka N što vidno ne zadovoljava. Drugi izbor su čelični ležajevi odabrani prema dimenzijama mehanizma i potrebnim vrijednostima naprežanja.

Prema veličinama mehanizma biramo ležaj 619/6, proizvođača SKF, izrađene od čelika.

Unutarnji promjer	$d = 6 \text{ mm}$
Vanjski promjer	$D = 15 \text{ mm}$
Širina	$B = 5 \text{ mm}$
Dopušteno dinamičko opterećenje	$C_r = 0,884 \text{ kN}$
Dopušteno statičko opterećenje	$C_{0r} = 0,27 \text{ kN}$
Masa	$m = 0,0038 \text{ kg}$

Tablica 6. Karakteristike odabranog ležaja  $z_1$  [13]

3.97.

$$C_1 = 420,51 \text{ N} < C = 884 \text{ N}$$

Ležaj zadovoljava.

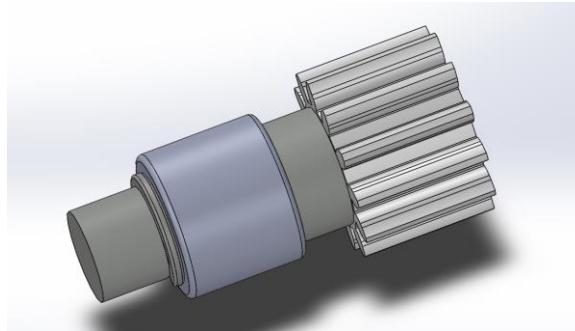
#### **Kontrola nazivnog vijeka trajanja**

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n_m} \cdot \left( \frac{C}{P} \right)^\varepsilon = 9290,57 \text{ h} > L_{10hmin} = 1000 \text{ h} \quad 3.98.$$

Ležaj zadovoljava.

### 3.5. Prvi međuzupčanik, zMZ

Zupčanik je izrađen također sa vratilom iz jednog dijela te od istog materijala kao i prethodni zupčanik. Za primjer uzet je zupčanik 29301200 proizvođača MÄDLER. U ovom slučaju izrađen je zajedno sa osovinom čineći naslon ležaju i zarez za uskočnik. Slijede provjere čvrstoće zupčanika i vratila te ležajeva. Odabran je isti materijal, poliamid 6, stoga se i dalje koriste vrijednosti iz tablice 5.



Slika 19. Model međuzupčanika sa ležajem i uskočnikom

#### 3.5.1. Kontrola na savijanje u korijenu zuba

Naprezanje u korijenu zuba:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \quad 3.99.$$

Gdje je:

$F_t$  – obodna sila;

$b$  – širina kontakta;

$m$  – modul;

$Y_F$  – faktor oblika zuba;

$Y_\varepsilon$  – faktor učestalosti opterećenja

Obodna sila na zupčaniku:

$$F_{t2} = F_{t1} = 166,87 \text{ N.} \quad 3.100.$$

Gdje je:

$F_{t1}$  – obodna sila na  $z_1$ ;

$F_{t2}$  – obodna sila na  $z_{MZ}$ .

Radijalna sila na zupčaniku:

$$F_r = F_t \cdot \cos \alpha = 166,87 \cdot \tan 20^\circ = 60,74 \text{ N.} \quad 3.101.$$

Gdje je:

$F_t$  – obodna sila;

$\alpha$  – kut zahvatne linije.

Kinematski promjer:

$$d_{wMZ} = d_{MZ} = z_{MZ}m = 12 \text{ mm.} \quad 3.102.$$

Gdje je:

$d_{MZ}$  – diobeni promjer;

$z$  – broj zubi;

$m$ - modul.

Faktor oblika: [4]

$$Y_F = f(z = 12, x = 0, \beta = 0) = 3,65 \quad 3.103.$$

Širina kontakta:

$$b = 25 \text{ mm.} \quad 3.104.$$

Faktori veličine strojnog dijela, kvalitete površinske obrade te faktor udara imaju iste vrijednosti kao na prošlom zupčaniku jer je zupčanik koji slijedi isti kao prethodni te se zbog toga ne mijenjaju: [4]

$b_1 = f(d = 5) = 1$  – faktor veličine strojnog oblika;

$b_2 = f(R_{\max} = 6,3, R_m) = 1$  - faktor kvalitete obrade površine;

$\varphi = 1$ , faktor udara.

Faktor učestalosti opterećenja: [4]

$$Y_e = 0,67 \quad 3.105.$$

Naprezanje u korijenu zuba(3.99.):

$$\sigma_{Fz_{MZ}} = \frac{166,87}{25} \cdot 3,65 \cdot 0,67 = 16,32 \text{ N/mm}^2 \quad 3.106.$$

Sigurnost od loma na  $Z_{MZ}$ :

$$S_{Fz_{MZ}} = \frac{\sigma_{FD}}{\sigma_{Fz_{MZ}}} = \frac{50}{24,32} = 2,05 > 1,65 \quad 3.107.$$

Gdje je:

$\sigma_{FD}$  – dopušteno naprezanje materijala u korijenu zuba;

$\sigma_F$  – postojeće naprezanje u korijenu zuba.

Zupčanik zadovoljava.

### 3.5.2. Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka

Hertzovo kontaktno naprezanje za zupčanike od termoplasta:

$$\sigma_H = Z_M \cdot Z_H \sqrt{\frac{u+1}{u} \frac{F_t}{bd_1}}. \quad 3.108.$$

Gdje je:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{30}{12} = 2,5 \text{ – prijenosni omjer;}$$

$F_t$  – obodna sila;

$b$  – širina kontakta;

$d_1$  – diobeni promjer;

Vrijednosti faktora materijala i faktora oblika zuba uzimaju se iz točke 3.4.2.:

$$Z_M = 32,42 \sqrt{N/mm^2};$$

$$Z_H = 1,76.$$

Hertzovo kontaktno naprezanje(3.108.):

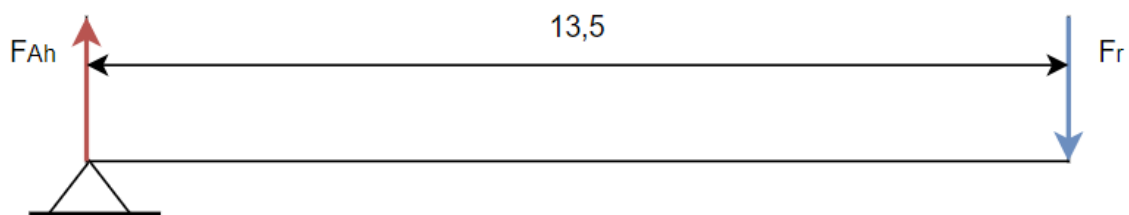
$$\sigma_{HzMZ} = 32,42 \cdot 1,76 \cdot \sqrt{\frac{2,5+1}{2,5} \frac{166,87}{10 \cdot 12}} = 79,61 \text{ N/mm}^2 \quad 3.109.$$

Postignuta sigurnost od rupičavosti na  $Z_{MZ}$ :

$$S_{HzMZ} = \frac{\sigma_{HD}}{\sigma_{HzMZ}} = 1,38 > 1,2: \quad 3.110.$$

Zupčanik zadovoljava.

### 3.5.3. Kontrola pojedinih presjeka vratila

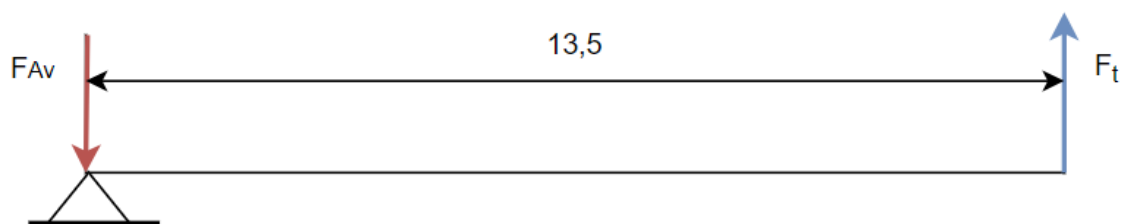


Slika 20. Horizontalna ravnina  $Z_{MZ}$

Suma sila u horizontalnoj ravnini:

$$\Sigma Y_h = 0; \quad 3.111.$$

$$F_{Ah} = F_r = 60,74 \text{ N} \quad 3.112.$$



Slika 21. Vertikalna ravnina zMZ

Suma sila u vertikalnoj ravnini:

$$\Sigma Y_v = 0; \quad 3.113.$$

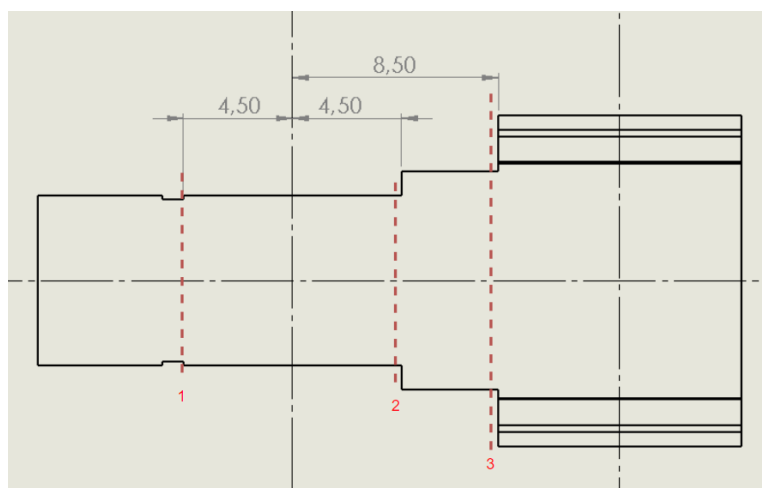
$$F_{Av} = F_t = 166,87 \text{ N} \quad 3.114.$$

Gdje su:

$F_{Ah}$ ,  $F_{Av}$  – horizontalna i vertikalna komponenta u ležajnom mjestu A;

Rezultantne radijalne sile u osloncu A:

$$F_A = \sqrt{F_{Ah}^2 + F_{Av}^2} = 177,58 \text{ N} \quad 3.115.$$



Slika 22. Kritični presjeci osovine zupčanika zMZ

### Presjek 1

Moment u presjeku 1:

$$M_1 = 4,5 \cdot F_A = 4,5 \cdot 137,15 = 799,11 \text{ Nmm} \quad 3.116.$$

Gdje je:

$F_A$  – radijalna sila u osloncu A.



Reducirani moment u presjeku 1:

$$M_{\text{red1}} = M_1 \beta_{\text{kf}(1)} = 799,11 \text{ Nmm} \quad 3.117.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1(\beta_{\text{kf2}} - 1) \quad 3.118.$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = \frac{7}{6,7} = 1,04\right) = 0 \quad 3.119.$$

$$\beta_{\text{kf}(1)} = 1 \quad 3.120.$$

Gdje je:

$c_1$  – faktor prijelaza.

Reducirano naprezanje u presjeku 1:

$$\sigma_{\text{fred1}} = \frac{M_{\text{red1}}}{W_1} = \frac{32 \cdot M_{\text{red1}}}{d_1^3 \cdot \pi} = \frac{32 \cdot 799,11}{6,7^3 \cdot \pi} = 27,06 \text{ N/mm}^2 \quad 3.121.$$

Gdje je:

$d_1 = 6,7 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 1.

Postignuta sigurnost koja vrijedi za sve presjeke u ovome proračunu:

$$S_{\text{postignuto}} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fdop}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{fred}}} = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred}}} \geq S_{\text{potrebno}} = 1,5 \quad 3.122.$$

Gdje je:

$b_1 = f(d = 5) = 1$  – faktor veličine strojnog oblika;

$b_2 = f(R_{\text{max}} = 6,3, R_m) = 1$  – faktor kvalitete površine obrade;

$\varphi = 1$ , faktor udara.

Sigurnost u presjeku 1:

$$S_1 = \frac{\sigma_{\text{fdop}}}{\sigma_{\text{fred1}}} = \frac{100}{27,06} = 3,69 > 1,5 \quad 3.123.$$

Presjek zadovoljava.

## Presjek 2

Moment u presjeku 2:

$$M_2 = M_1 = 799,11 \text{ Nmm} \quad 3.124.$$

Reducirani moment u presjeku 2:

$$M_{\text{red2}} = M_2 \beta_{\text{kf}(2)} = 799,11 \cdot 1,44 = 1150,72 \text{ Nmm} \quad 3.125.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1(\beta_{\text{kf2}} - 1) \quad 3.126.$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = \frac{10}{7} = 1,43\right) = 0,73 \quad 3.127.$$

$$\beta_{\text{kf2}} = f\left(\frac{\rho}{d} = \frac{0,5}{7} = 0,07\right) = 1,6 \quad 3.128.$$

$$\beta_{\text{kf}(2)} = 1,44 \quad 3.129.$$

Gdje je:

$c_1$  – faktor prijelaza,

$\beta_{kf2}$  – faktor zareznog djelovanja kod savijanja;

Reducirano naprezanje u presjeku 2:

$$\sigma_{fred2} = \frac{M_{red2}}{W_2} = \frac{32 M_{red2}}{d_2^3 \pi} = \frac{32 \cdot 1150,72}{7^3 \pi} = 34,17 \text{ N/mm}^2 \quad 3.130.$$

Gdje je:

$d_2 = 7 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 2.

Sigurnost u presjeku 2:

$$S_2 = \frac{\sigma_{fdop}}{\sigma_{fred2}} = 2,92 > 1,5 \quad 3.131.$$

Presjek zadovoljava.

### **Presjek 3**

Moment u presjeku 3:

$$M_3 = 8,5 F_A = 8,5 \cdot 177,58 = 1509,43 \text{ Nmm} \quad 3.132.$$

Gdje je:

$F_A$  – radijalna sila u osloncu A.

Reducirani moment u presjeku 3:

$$M_{red3} = M_3 \beta_{kf(3)} = 1,6 \cdot 1509,43 = 2415,09 \text{ Nmm} \quad 3.133.$$

Faktor zareznog djelovanja: [1]

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf2} - 1) \quad 3.134.$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = \frac{15}{10} = 3\right) = 1 \quad 3.135.$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = \frac{0,5}{10} = 0,05\right) = 1,75 \quad 3.136.$$

$$\beta_{kf(3)} = 1,6 \quad 3.137.$$

Gdje je:

$c_1$  – faktor prijelaza,

$\beta_{kf2}$  – faktor zareznog djelovanja kod savijanja;

Reducirano naprezanje u presjeku 3:

$$\sigma_{fred3} = \frac{M_{red3}}{W_3} = \frac{32 M_{red3}}{d_3^3 \pi} = \frac{32 \cdot 2415,09}{10^3 \pi} = 16,62 \text{ N/mm}^2 \quad 3.138.$$

Gdje je:

$d_3 = 10 \text{ mm}$  – promjer na mjestu presjeka 3.

$$S_3 = \frac{\sigma_{fdop}}{\sigma_{fred3}} = 4,06 > 1,5 \quad 3.139.$$

Presjek zadovoljava.

### 3.5.4. Kontrola odabranih ležaja

Opterećenje ležaja:

$$P_r = F_r = F_{Ah} = 177,58 \text{ N} \quad 3.140.$$

Gdje je:

$P_r$  – ekvivalentno radijalno opterećenje;

$F_r$  - radijalna sila;

$F_A$  – sila u ležaju A.

Za očekivani vijek trajanja ležajeva uzimamo  $L_{10hmin} = 1000h$ .

Također, uzet je igličasti ležaj te je eksponent vijeka trajanja za ležajeve s teorijskim dodirom u liniji  $\varepsilon = 10/3$ .

Brzina vrtnje u okretajima u minuti:

$$n_m = \frac{n_{motora}}{10} = \frac{4803,75}{10} = 480,37 \text{ min}^{-1} \quad 3.141.$$

Prema veličinama mehanizma biramo ležaj HK0709, proizvođača SKF.

Unutarnji promjer	$d = 7 \text{ mm}$
Vanjski promjer	$D = 11 \text{ mm}$
Širina	$B = 9 \text{ mm}$
Dopušteno dinamičko opterećenje	$C_r = 3030 \text{ N}$
Dopušteno statičko opterećenje	$C_{0r} = 3050 \text{ N}$
Masa	$m = 0,0025 \text{ kg}$

Tablica 7. Karakteristike odabranog ležaja ZMZ [13]

#### Kontrola dinamičke nosivosti ležaja

$$C_1 = P \cdot \left( \frac{60 \cdot n_m \cdot L_{10hmin}}{10^6} \right)^{1/\varepsilon} = 177,58 \cdot \left( \frac{60 \cdot 480,37 \cdot 1000}{10^6} \right)^{3/10} = 486,76 \text{ N} < C = 3030 \text{ N} \quad 3.142.$$

Gdje je:

$P$  – ekvivalentno opterećenje ležaja;

$n_m$  – brzina vrtnje u minutama;

$L_{h10min}$  – očekivani vijek trajanja ležaja;

$\varepsilon$  - eksponent vijeka trajanja za ležajeve s teorijskim dodirom u liniji;

$C$  – dopuštena dinamička nosivost ležaja.

Ležaj zadovoljava.

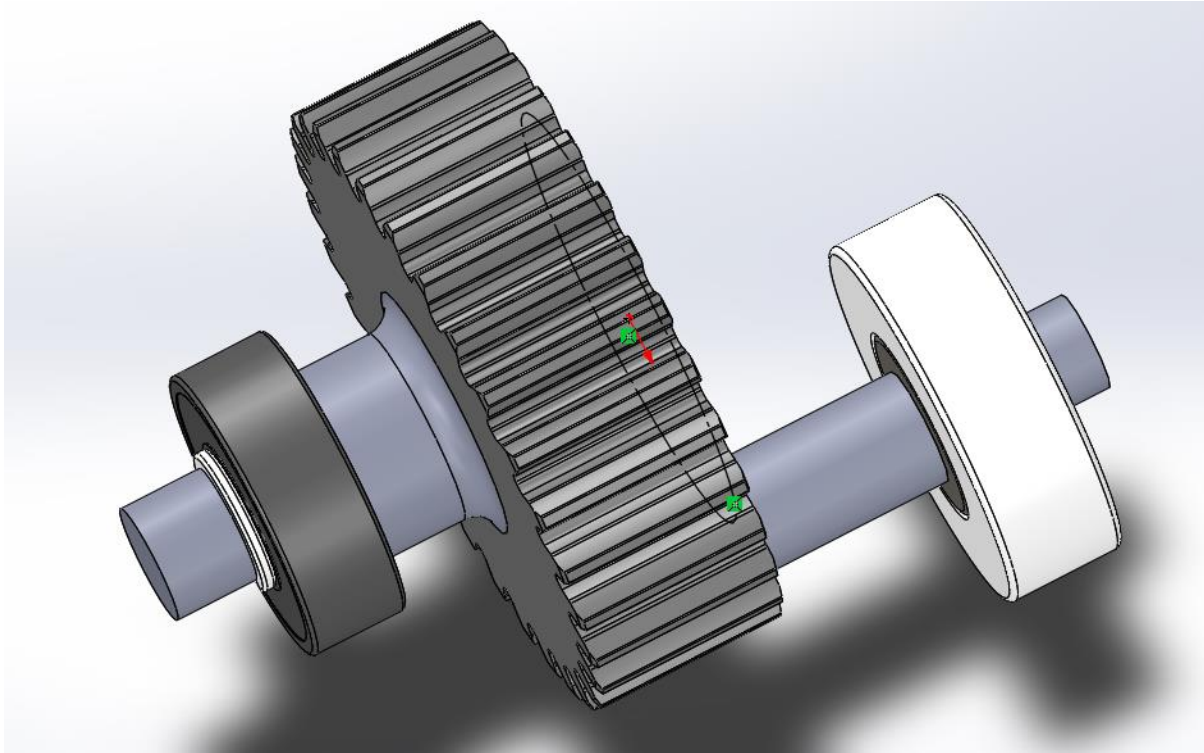
**Kontrola nazivnog vijeka trajanja**

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \left( \frac{C}{P} \right)^\varepsilon = 15394h > L_{10hmin} = 1000h \quad 3.143.$$

Ležaj zadovoljava.

### 3.6. Zupčanik krila, $z_2$

Naredni zupčanik mehanizma također je kao i ulazni zupčanik rađen po primjeru GEABM1.0-30-10-A-15 dobavljača MiSUMi izrađen s vratilom i uležišten konzolno u jednom ležaju. Odabrani su isti materijali zupčanika, vratila te isti ležaj.



Slika 23. Model zupčanika krila  $z_2$  sa ležajevima i uskočnicima

#### 3.6.1. Kontrola na savijanje u korijenu zuba

Koristeći isti zupčanik iznos obodne sile ostaje gotovo isti, ako zanemarimo gubitke, kontrola čvrstoće u točki 3.4.1. nam govori da će i ovaj zupčanik u korijenu zuba zadovoljiti.

#### 3.6.2. Kontrola pojedinih presjeka vratila

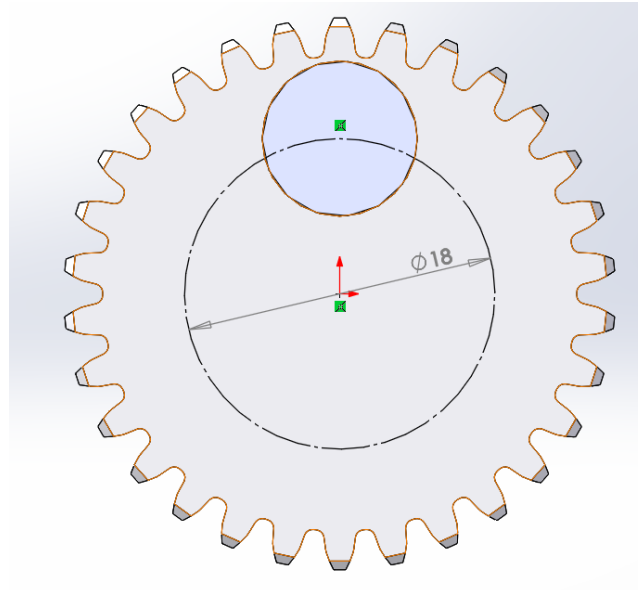
Obodna i radijalna sila na zupčaniku su jednake silama na međuzupčaniku kao i način uležištenja i razmak između zupčanika i ležaja stoga ovu osovinu nije potrebno proračunavati jer je zadovoljeno prema poglavlju 3.5.3. Prethodno smo na presjecima dobili vrlo povoljne faktore sigurnosti, čak i dvostuko veće od potrebnih. Pošto ova osovina ima i veći minimalan promjer i ležaj sa manjom širinom, osovina nije kritičan element.

#### 3.6.3. Kontrola odabranih ležaja

Odabrani ležaj po točki 3.4.3 zadovoljava.

#### 3.6.4. Osovina poluge

Osovina koja se nalazi na stranici zupčanika pokreće poluge koje su zaslužne za zamah krila. Obodna sila kojom se stvara okretni moment se prikazuje kao radijalna sila u ležaju poluge.



Slika 24. Osovina zupčanika koja pokreće krila

Promjer obodne kružnice:

$$d' = 18\text{mm.} \quad 3.144.$$

Nova obodna sila:

$$F'_t = \frac{2 \cdot T_1}{d'} = \frac{2 \cdot 2503}{18} = 278,11 \text{ N.} \quad 3.145.$$

Prema veličinama mehanizma odabran ležaj 629, proizvođača SKF.

Unutarnji promjer	$d = 7 \text{ mm}$
Vanjski promjer	$D = 22 \text{ mm}$
Širina	$B = 7 \text{ mm}$
Dopušteno dinamičko opterećenje	$C_r = 3450 \text{ N}$
Dopušteno statičko opterećenje	$C_{0r} = 1370 \text{ N}$
Masa	$m = 0,0118 \text{ kg}$

Tablica 8. Karakteristike odabranog ležaja poluge [13]

### Kontrola dinamičke nosivosti ležaja

$$F_r = F'_t = 278,11 \text{ N} \quad 3.146.$$

$$P = F_r = 278,11 \text{ N} \quad 3.147.$$

$$C_1 = P \left( \frac{60 \cdot n_m \cdot L_{10hmin}}{10^6} \right)^{1/\epsilon} = 278,11 \cdot \left( \frac{60 \cdot 480,37 \cdot 1000}{10^6} \right)^{1/3} = 852,69 \text{ N} \quad 3.148.$$

$$C_1 < C_r \quad 3.149.$$

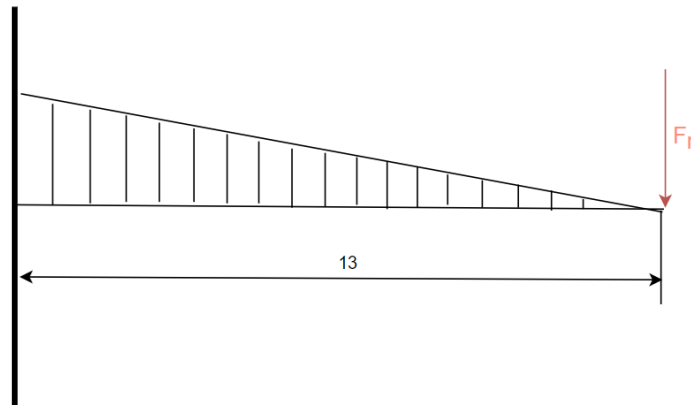
Ležaj zadovoljava.

**Kontrola nazivnog vijeka trajanja**

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \left( \frac{C}{P} \right)^\varepsilon = 2298h > L_{10hmin} = 1000h \quad 3.150.$$

Ležaj zadovoljava.

Osovina najveće naprezanje ima prijelazu zupčanika gdje u trenutku pokretanja treba podnijeti cijelu silu.



Slika 25. Moment savijanja osovine

Moment savijanja osovine:

$$M = 13 \cdot F_r = 3615,44 \text{ Nmm} \quad 3.151.$$

Naprezanje:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{32 \cdot M}{d_k^3 \cdot \pi} = 50,52 \text{ N/mm}^2 \quad 3.153.$$

Gdje je:

$d_k = 9 \text{ mm}$  – promjer na prijelazu.

Postignuta sigurnost:

$$S = \frac{\sigma_{fdop}}{\sigma_f} = 1,97 > 1,5 \quad 3.154.$$

Gdje je:

$\sigma_{fdop} = 100 \text{ N/mm}^2$ , dopušteno naprezanje materijala pri savijanju.

Osovina zadovoljava.

### 3.7. Poluga između $z_2$ i krila

U ovu polugu stavljeni su ležajevi koje smo kontrolirali u prethodnoj točki. Njihove radijalne sile se međusobno poništavaju te ta sila neće biti veća od prethodno proračunate.

Isto vrijedi za osovinu kojom je povezana ova poluga sa polugom krila. Ova osovina nije kritična komponenta te nije potrebno kontrolirati čvrstoću.

### 3.8. Osovina krila

Osovina preko koje se krilo naginje kritična je komponenta koja trpi moment savijanja nastao silom otpora zraka na površini krila. Dok mehanizam spušta krilo ta sila mu se odupire, ona se na posljertku poništi ali bitno je proračunati da li osovina zadovoljava takvo savijanje.

Sila je dobivena po 3. Newtonovom zakonu, akcija-reakcija. Zrak koji krilo pomakne u jednom zamahu svojom masom radi silu na površinu krila.

Sila na krilo:

$$F = m \cdot a \quad 3.155.$$

Gdje je:

$m$  – masa istisnutog zraka;

$a$  – ubrzanje krila.

Masa zraka:

$$m = \rho_{zraka} \cdot V \quad 3.156.$$

Gdje je:

$\rho_{zraka}$  – gustoća zraka na sobnoj temperaturi;

$V$  – volumen istisnutog zraka.

Volumen istisnutog zraka:

$$V = \frac{\alpha}{360^\circ} r^2 \cdot \pi \cdot b = \frac{70^\circ}{360^\circ} 0,390^2 \pi \cdot 0,125 = 0,011614 \text{ m}^3 \quad 3.157.$$

Gdje je:

$\alpha = 70^\circ$  - kut raspona krila;

$r = l_{\max} - l_{\min} = 0,454 - 0,064 = 0,390 \text{ m}$  - duljina profila krila;

$b = 0,125 \text{ m}$  - širina profila krila.

Masa zraka(3.156.):

$$m = 0,011614 \cdot 1,2041 = 0,014 \text{ kg} \quad 3.158.$$

Ubrzanje krila:

$$a = \omega^2 \cdot y = 50,27^2 \cdot 0,29 = 732,85 \text{ m/s}^2 \quad 3.159.$$

Gdje je kutna brzina krila;

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 8 = 50,27 \text{ s}^{-1} \quad 3.160.$$



te maksimalni pomak krila:

$$y = l_{max} \sin \beta = 0,454 \sin 40^\circ = 0,29 \text{ m.} \quad 3.161.$$

Sila na krilo:

$$F = 0,014 \cdot 732,85 = 10,26 \text{ N} \quad 3.162.$$

Moment savijanja

$$M = Fl = 10,26 \cdot 0,282 = 2,893 \text{ Nm} = 2893 \text{ Nmm} \quad 3.163.$$

Gdje je:

$l = \frac{r}{2} + l_{min} + l_p = \frac{0,390}{2} + 0,064 + 0,023 = 0,282 \text{ m}$  - udaljenost sredine površine krila od početka poluge krila;

$l_p = 0,023 \text{ m}$  – duljina poluge krila do osovine krila.

-

Sila koja uzrokuje direktno uzrokuje savijanje na osovini:

$$F' = \frac{M}{l_p} = \frac{2893}{23} = 125,78 \text{ N.} \quad 3.164.$$

Naprezanje pri savijanju:

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot M}{d^3 \pi} = \frac{32 \cdot 2893}{7^3 \pi} = 85,91 \text{ N/mm}^2 \quad 3.165.$$

Gdje je:

$M$  – moment savijanja osovine;

$d = 7 \text{ mm}$  – promjer osovine krila.

Sigurnost osovine:

$$S = \frac{\sigma_{fdop}}{\sigma_f} = 3,49 > 1,5 \quad 3.166.$$

Gdje je:

$\sigma_{fdop} = 300 \text{ N/mm}^2$  - vrijednost dopuštenog savijanja za materijal osovine S235JR[2].

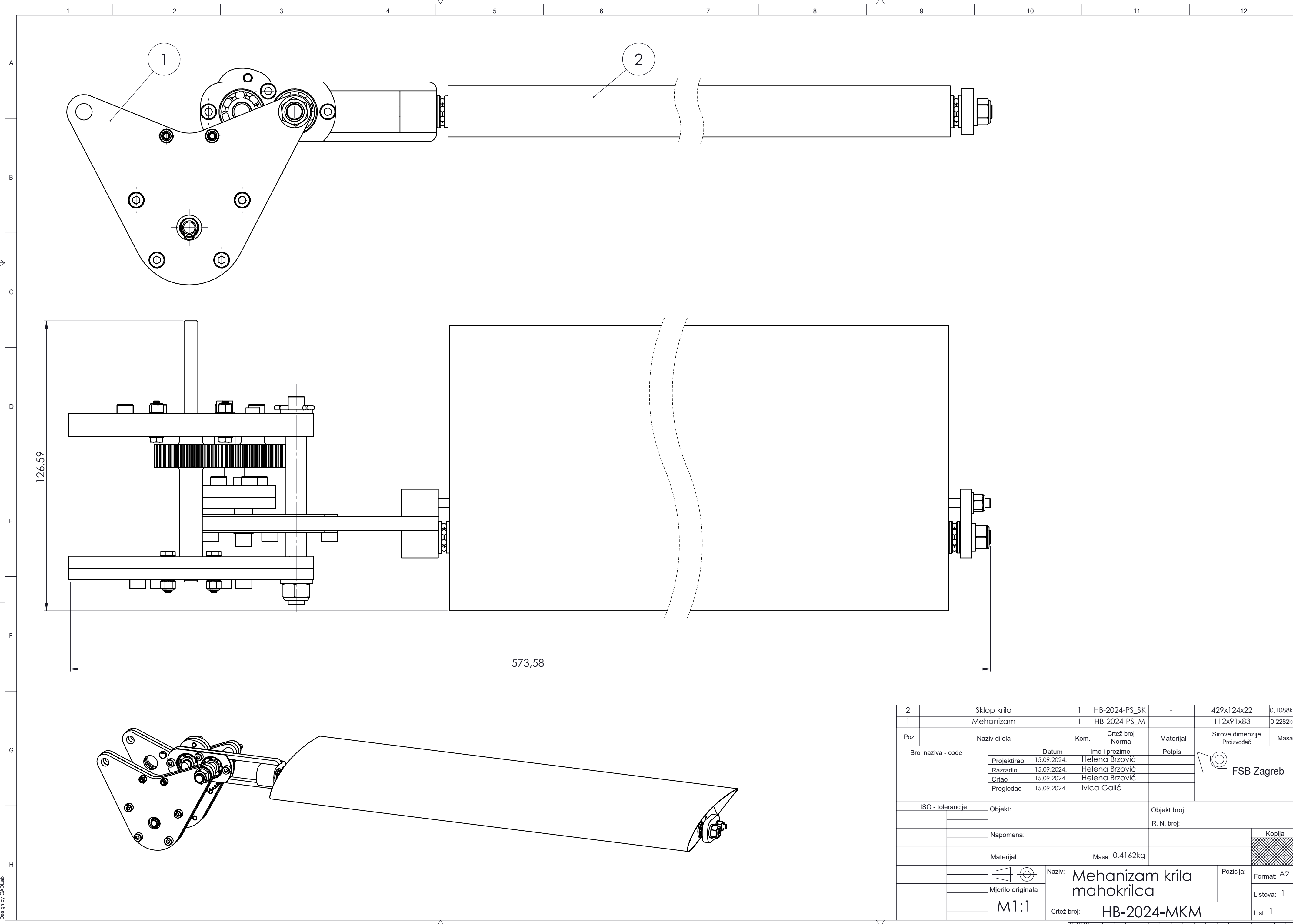
Osovina zadovoljava s velikim faktorom sigurnosti, tu je ostavljen prostor za sve ostale uvjete koje nisu uzeti u obzir prema ovom proračunu.

#### 4. ZAKLJUČAK

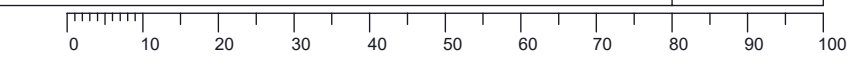
Ograničenje mase navodi na maksimalno smanjene veličine komponenti. Osim toga za izradu odabrani su laki materijali kako bi se dobila što lakša konstrukcija. Kompromisom čvrstoće i gustoće odabire se materijal poliamid 6 koji odlično zadovoljava potrebne zadaće, kako u kućištu tako i u vratilu. Problem se nalazi u ležajevima. S obzirom na većinski plastični mehanizam očekivani su plastični ležajevi, međutim njihova svojstva u takvoj primjeni nisu dovoljno dobra za ovakav tip mehanizma. Zbog velikog reduciranja veličine dijelova, do razine da se u kućištu ležajevi vanjskim prstenovima skoro dodiruju, javljaju se prekomjerna opterećenja za ovaj tip materijala i mehanizma. Problem koji prati već spomenuti je velik broj komponenti malenih dimenzija a samim time i težina sastavljanja. Otežano je zadovoljiti moguće tolerancije položaja kao i intuitivnost sastavljanja. Pri tome svemu optimiziran je problem aerodinamike koji bi se u daljnjem razvoju morao bolje proučiti simulacijom i testiranjem.

## LITERATURA

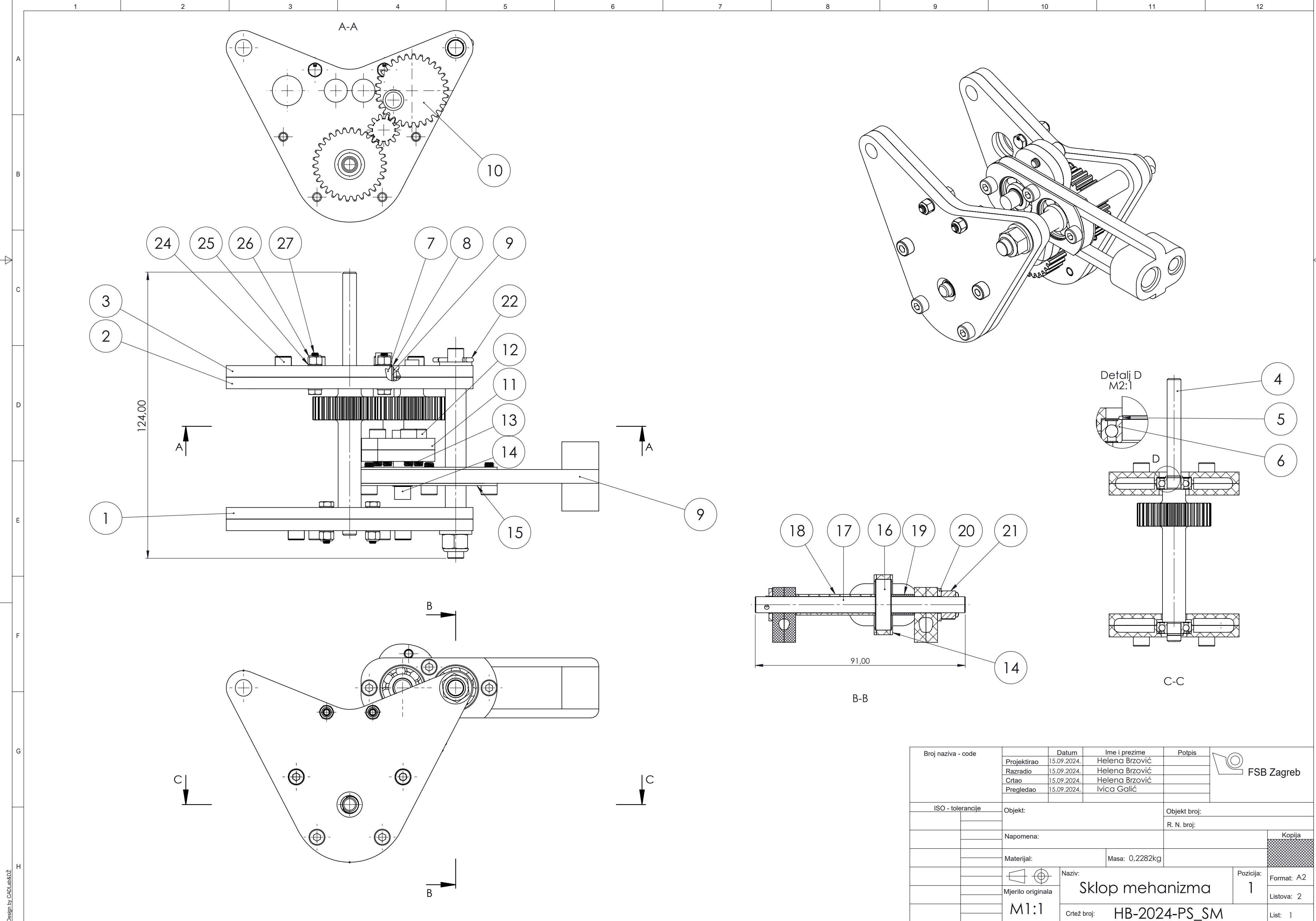
- [1] Chronister N., The Ornithopter Design Manual, the Ornithopter Zone, 2008.
- [2] Decker, K. H., Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [3] Oberšmit, E., Ozubljenja i zupčanici, SNL Zagreb 1982.
- [4] Opalić, M., Rakamarić, P., Reduktor, Zagreb 2001.
- [5] Horvat Z., Vratilo, Zagreb
- [6] <https://www.ensingerplastics.com/en>
- [7] <https://hr.wikipedia.org/wiki>
- [8] <https://www.ornithopter.org/>
- [9] <https://ansp.org/research/systematics-evolution/ornithology/>
- [10] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2412-il>
- [11] [https://hobbyking.com/en\\_us](https://hobbyking.com/en_us)
- [12] <https://www.onshape.com/en/>
- [13] <https://www.skf.com/au/products/bearings>



2	Sklop krila	1	HB-2024-PS_SK	-	429x124x22	0,1088kg
1	Mehanizam	1	HB-2024-PS_M	-	112x91x83	0,2282kg
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		15.09.2024.	Helena Brzović			
Razradio		15.09.2024.	Helena Brzović			
Crtao		15.09.2024.	Helena Brzović			
Pregledao		15.09.2024.	Ivica Galić			
ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:			
				R. N. broj:		
Napomena:						Kopija
Materijal:		Masa: 0,4162kg				
		Naziv: Mehanizam krila mahokrilca			Pozicija: Format: A2	
Mjerilo originala					Listova: 1	
M1:1		Crtež broj: HB-2024-MKM			List: 1	

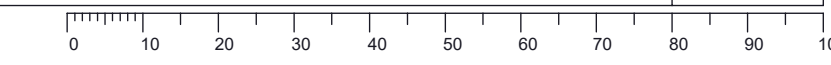


Design by CADLab


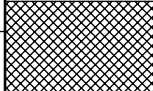
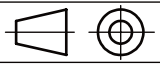


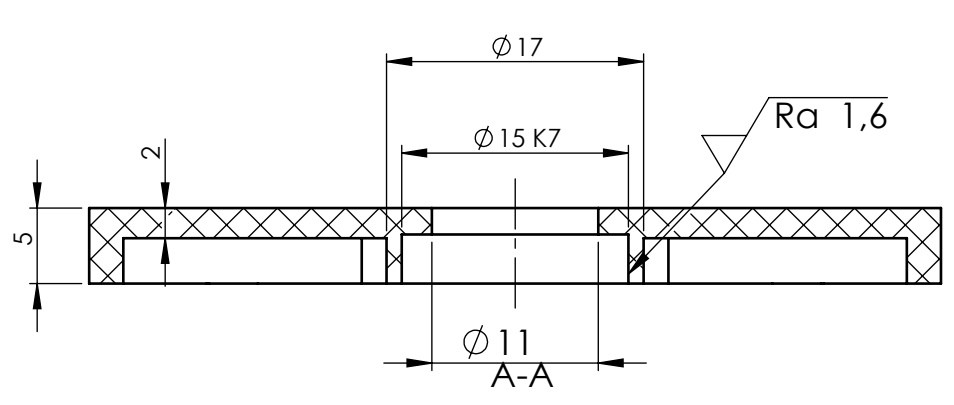
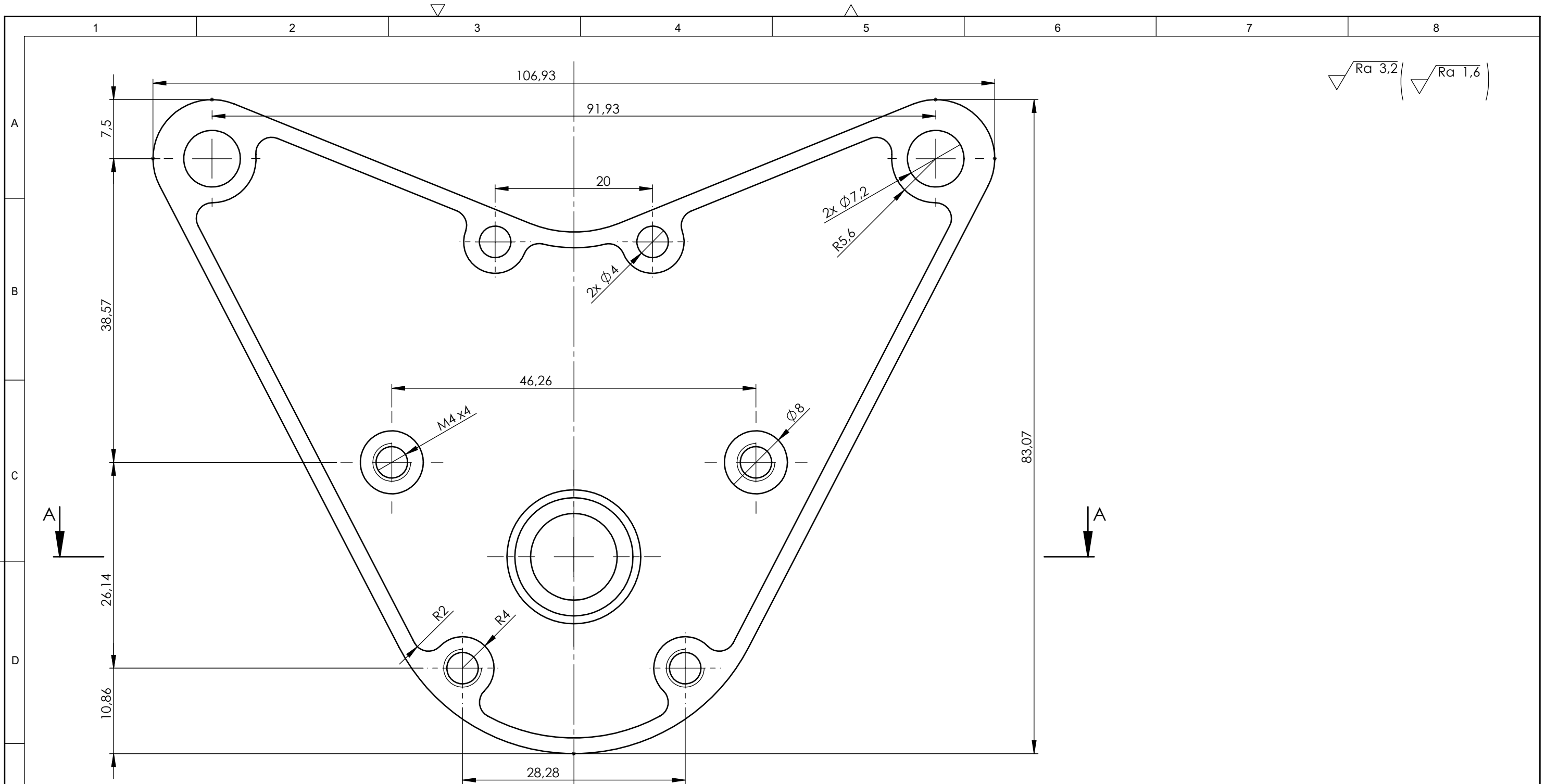
Design by CADLab&DZ

Broj naziva - code	Projektirao	15.09.2024.	Ime i prezime	Helena Brzović	Potpis	
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović			
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović			
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić			
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:		
	Napomena:			R. N. broj:		
	Materijal:			Masa: 0,2282kg	Kopija	
	Naziv:			Pozicija:		
	Mjerilo originala			1		
	M1:1			Format: A2		
	Crtež broj: HB-2024-PS_SM			Listova: 2		
				List: 1		

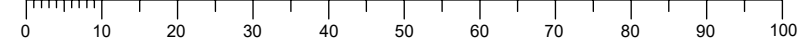


27	Vijak M3	4	Din 933	S235JR	5,5x18	0,0011kg
26	Matica M4	4	DIN 985	S235JR	5,5x4	0,0006kg
25	Podloške M4	16	DIN 433	PEEK	Ø 6x0,6	0,0001kg
24	Plastični vijci	8	DIN 912	PEEK	Ø 7x14	0,0003kg
23	Poluga krila	1	HB-2024-PK	PA6	25x61x5	0,0227kg
22	Pin osovine krila	1	DIN 94	S235JR	3,6x 2x 18,5	0,0004kg
21	Matica M7	1	DIN 985	S235JR	11x7,5	0,0041kg
20	Podloška M7	1	DIN 125	PEEK	Ø 14x1,8	0,0002kg
19	Distancer Ø7 kraći	1	HB-2024-D7K	PEEK	Ø 9x4,5	0,0002kg
17	Osovina krila	1	HB-2024-OK	S235JR	Ø 9x91	0,0271kg
16	Ležaj HK0709	4	SKF	-	Ø 22x7	0,0118kg
15	Poklopac ležaja krila	2	HB-2024-PLK	PA6	26x59x1	0,0008kg
14	Osovina poluga	1	HB-2024-OP	PA6	Ø 9x30	0,0014kg
13	Distancer Ø7 osovine poluga	1	HB-2024-D7P	PA6	Ø 9x34,5	0,0001kg
12	Vijci poluga	8	DIN 912	PEEK	Ø 7x12	0,0016kg
11	Poluga	2	HB-2024-P	PA6	61x25x5	0,0029kg
10	Zupčanik z2	1	HB-2024-Z2	PA6	Ø 32x44	0,0097kg
9	Ležaj 2	1	HK0709 SKF	-	Ø 11x9	0,0025kg
8	Uskočnik Ø7	1	DIN 417	PEEK	Ø 8x0,8	0,0001kg
7	Međuzupčanik	1	HB-2024-MZ	PA6	Ø 15x29	0,0021kg
6	Ležaj 1	3	619/6 SKF	-	Ø 15x 5	0,0038kg
5	Uskočnik Ø6	1	-	PEEK	Ø 8,6	0,0001kg
4	Zupčanik z1	1	HB-2024-Z1	PA6	Ø 32x115,5	0,0140kg
3	Stražnja ploča 2	1	HB-2024-SP2	PA6	107x83x 5	0,0160kg
2	Stražnja ploča 1	1	HB-2024-SP1	PA6	107x83x5	0,0160kg
1	Prednja ploča	2	HB-2024-PP	PA6	107x83x5	0,0143kg
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Dimenzije	Masa

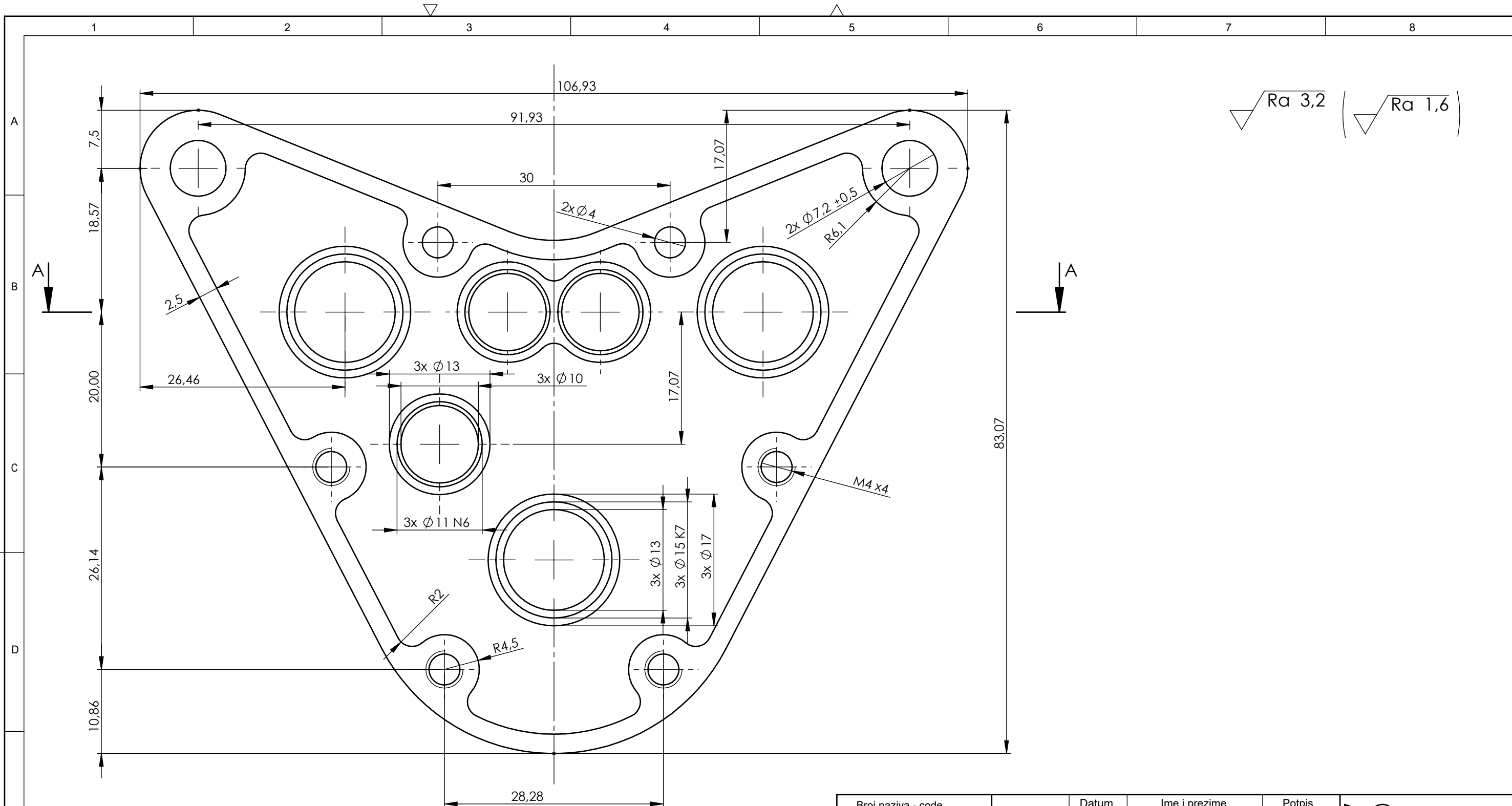
	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić	
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
				
Materijal:		Masa: 0,2282kg		
	Naziv:			Pozicija:
	Sklop mehanizma			1
	Mjerilo originala			Format: A2
M1:1			Listova: 2	
Crtež broj: HB-2024-PS_SM			List: 2	



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
Ø 15 K7	0,006 -0,012			R. N. broj:	
		Napomena:			Kopija
		Materijal: PA6	Masa: 0,0143kg		
			Naziv: Prednja ploča		Pozicija: 1
			M2:1		Format: A3
		Crtež broj: HB-2024-PP			Listova: 1
					List: 1



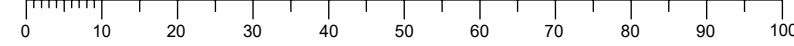
Design by CADLab



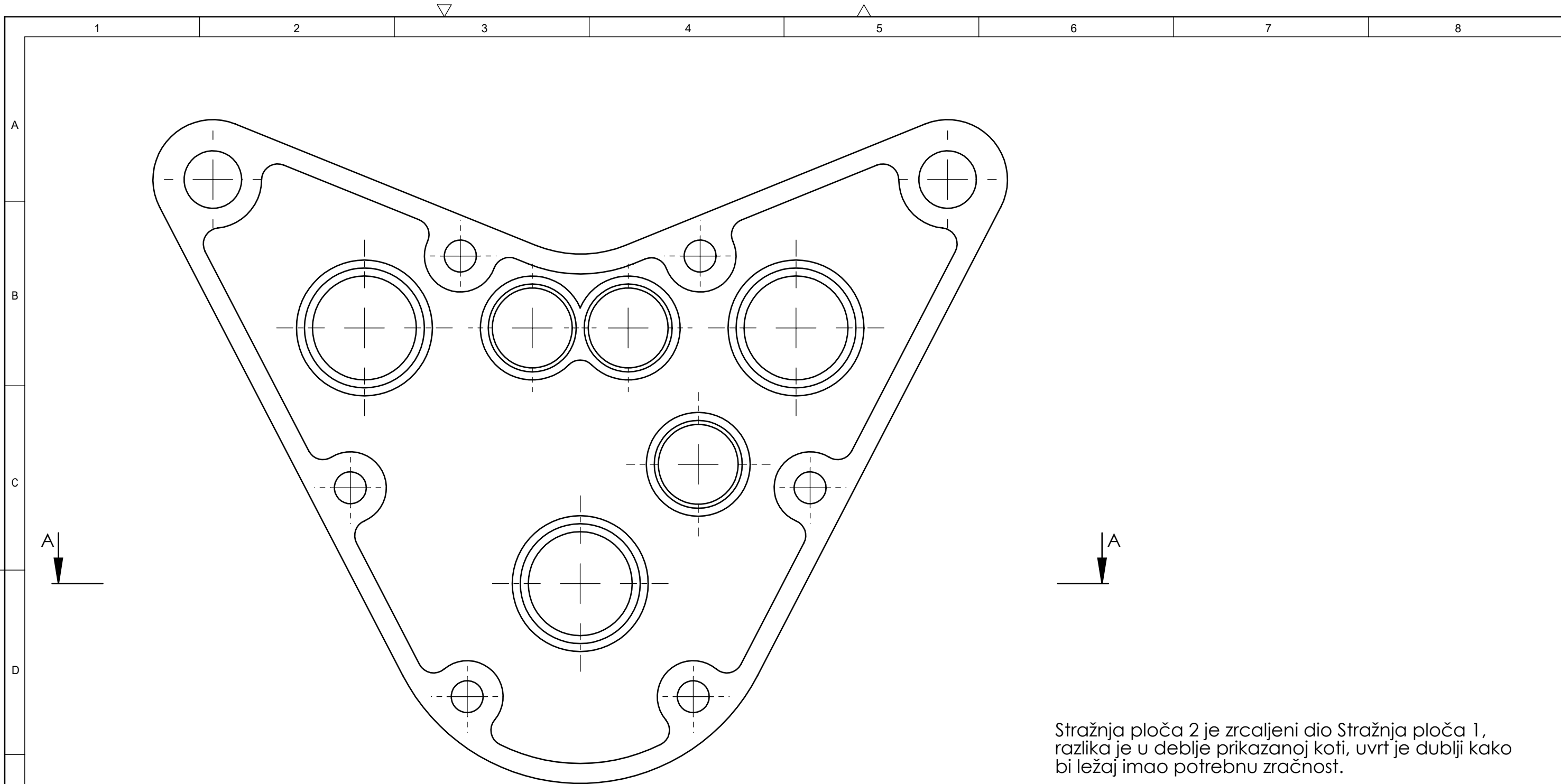
√ Ra 3,2 ( √ Ra 1,6 )

Broj naziva - code	Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović	Potpis	
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
Ø 11N6	-0,009 -0,020			R. N. broj:	
Ø 15K7	0,006 -0,012	Napomena:			
		Materijal: PA6	Masa: 0,0160kg		
		Mjerilo originala	Naziv: Stražnja ploča 1	Pozicija: 2	Kopija
		M2:1	Crtež broj: HB-2024-SP1		Format: A3
					Listova: 1
					List: 1

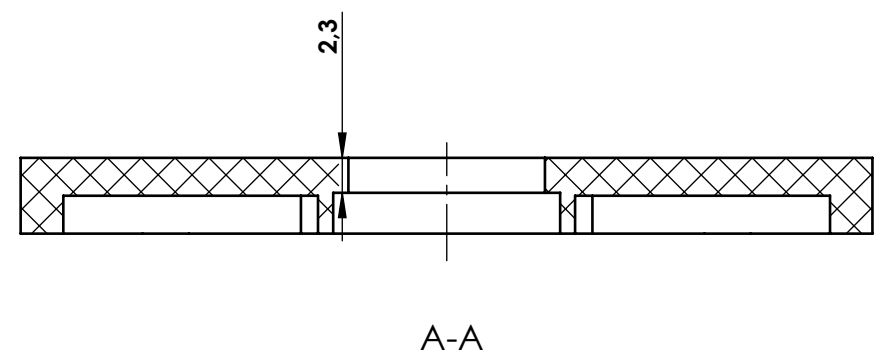
Design by CADLab





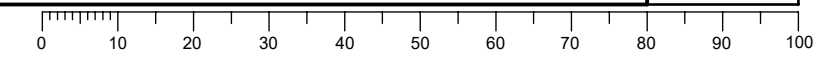


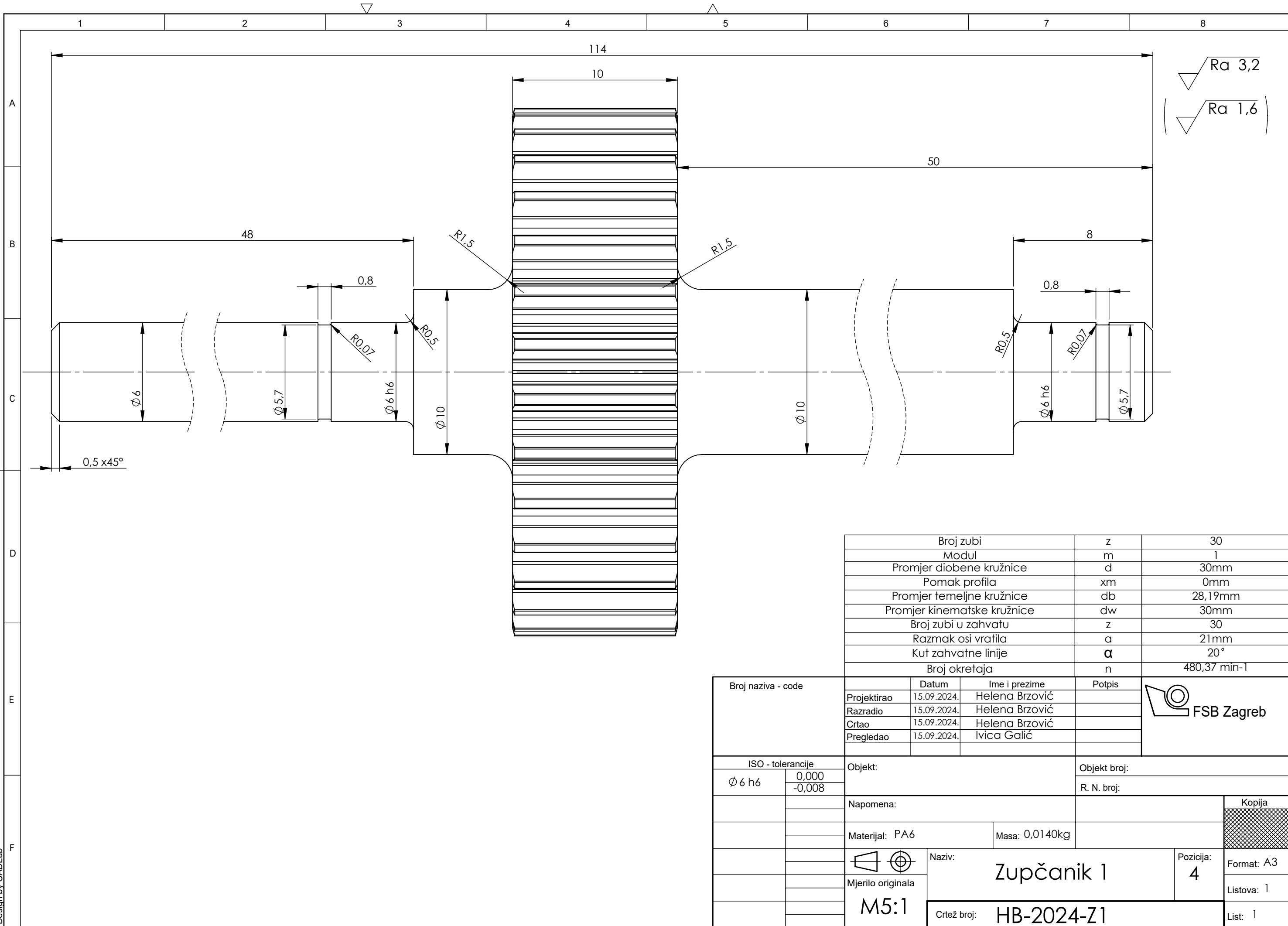
Stražnja ploča 2 je zrcaljeni dio Stražnja ploča 1, razlika je u deblje prikazanoj koti, uvrst je dublji kako bi ležaj imao potrebnu zračnost.



	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: PA6		Masa: 0,0160kg		
	Naziv: <b>Stražnja ploča 2</b>		Pozicija: <b>3</b>	
Mjerilo originala			Format: A3	
<b>M2:1</b>			Listova: 1	
Crtež broj: <b>HB-2024-SP2</b>			List: 1	

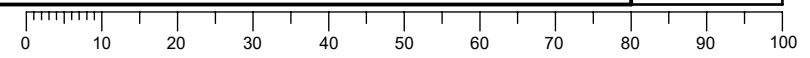
Design by CADLab





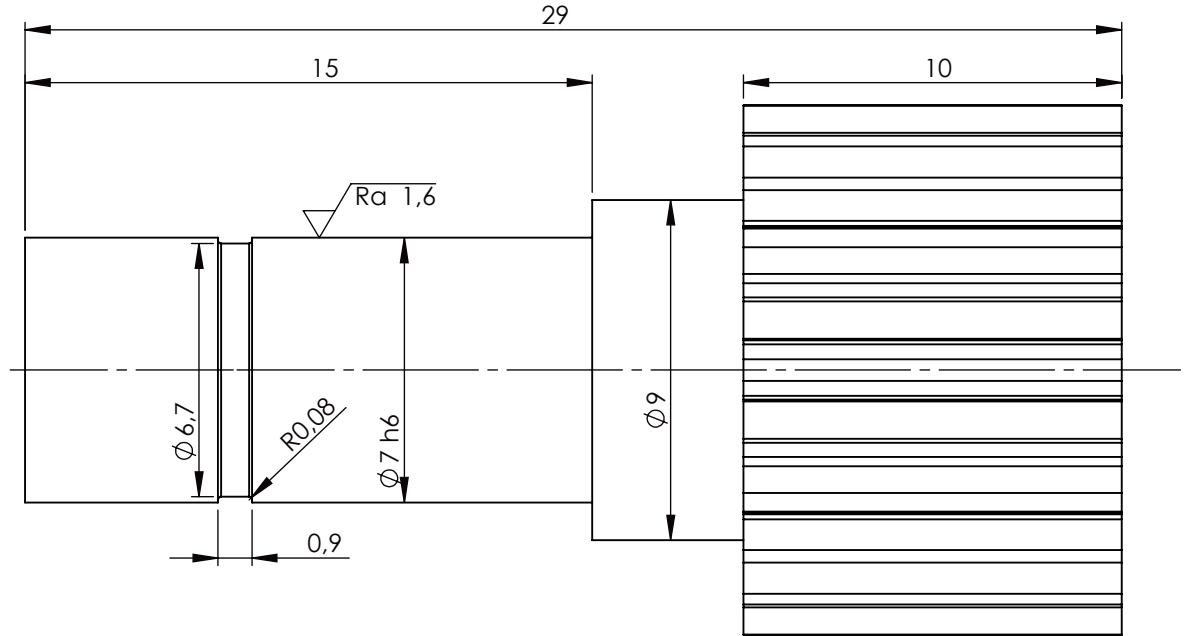
Broj zubi	z	30
Modul	m	1
Promjer diobene kružnice	d	30mm
Pomak profila	xm	0mm
Promjer temeljne kružnice	db	28,19mm
Promjer kinematske kružnice	dw	30mm
Broj zubi u zahvatu	z	30
Razmak osi vratila	a	21mm
Kut zahvatne linije	$\alpha$	20°
Broj okretaja	n	480,37 min <sup>-1</sup>

Broj naziva - code	Datum	15.09.2024.	Ime i prezime	Helena Brzović	Potpis	
	Projektirao	15.09.2024.	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Crtao	15.09.2024.	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić	
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
$\phi 6 h6$	0,000 -0,008			R. N. broj:		
Napomena:						Kopija
Materijal: PA6			Masa: 0,0140kg			
Mjerilo originala M5:1				Naziv: Zupčanik 1		
				Pozicija: 4		Listova: 1
				Crtež broj: HB-2024-Z1		List: 1



Design by CADLab

√ Ra 3,2 ( √ Ra 1,6 )



Broj zubi	z	12
Modul	m	1
Promjer diobene kružnice	d	12mm
Pomak profila	xm	0mm
Promjer temeljne kružnice	db	11,28mm
Promjer kinematske kružnice	dw	12mm
Broj zubi u zahvatu	z	30
Razmak osi vratila	a	21mm
Kut zahvatne linije	$\alpha$	20°
Broj okretaja	n	192,15min-1

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić	

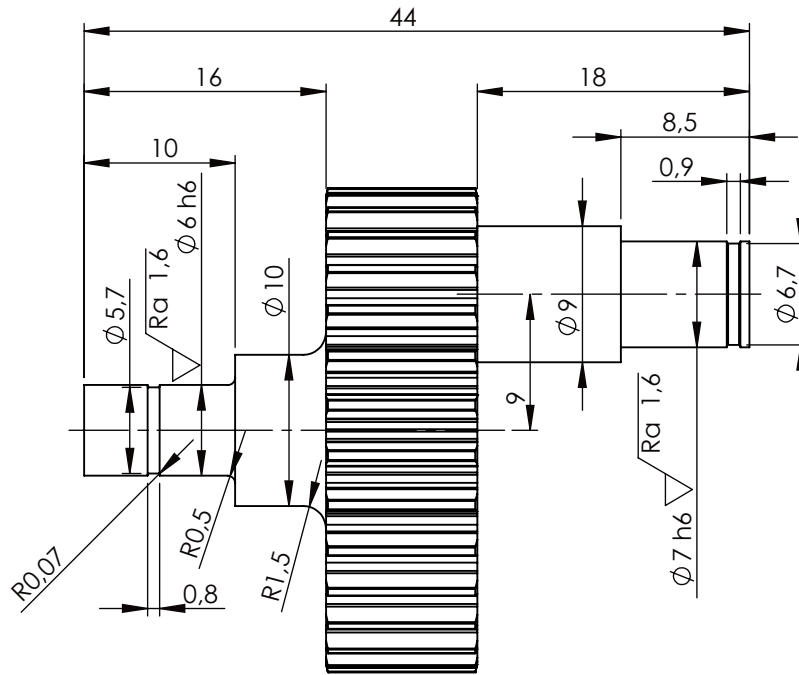
ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:
$\phi 7 h6$	0,000 -0,009	R. N. broj:

Napomena:	Kopija
Materijal: PA6	Masa: 0,0021kg

 Mjerilo originala M5:1	Naziv:	Pozicija:	Format: A4
	Međuzupčanik		7
	Crtež broj:	HB-2024-MZ	Listova: 1
			List: 1

Design by CADLab

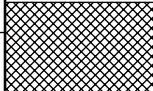
$\sqrt{Ra\ 3,2}$  (  $\sqrt{Ra\ 1,6}$  )

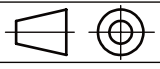


Broj zubi	z	30
Modul	m	1
Promjer diobene kružnice	d	30mm
Pomak profila	xm	0mm
Promjer temeljne kružnice	db	28,19mm
Promjer kinematske kružnice	dw	30mm
Broj zubi u zahvatu	z	30
Razmak osi vratila	a	21mm
Kut zahvatne linije	$\alpha$	20°
Broj okretaja	n	480,37 min-1

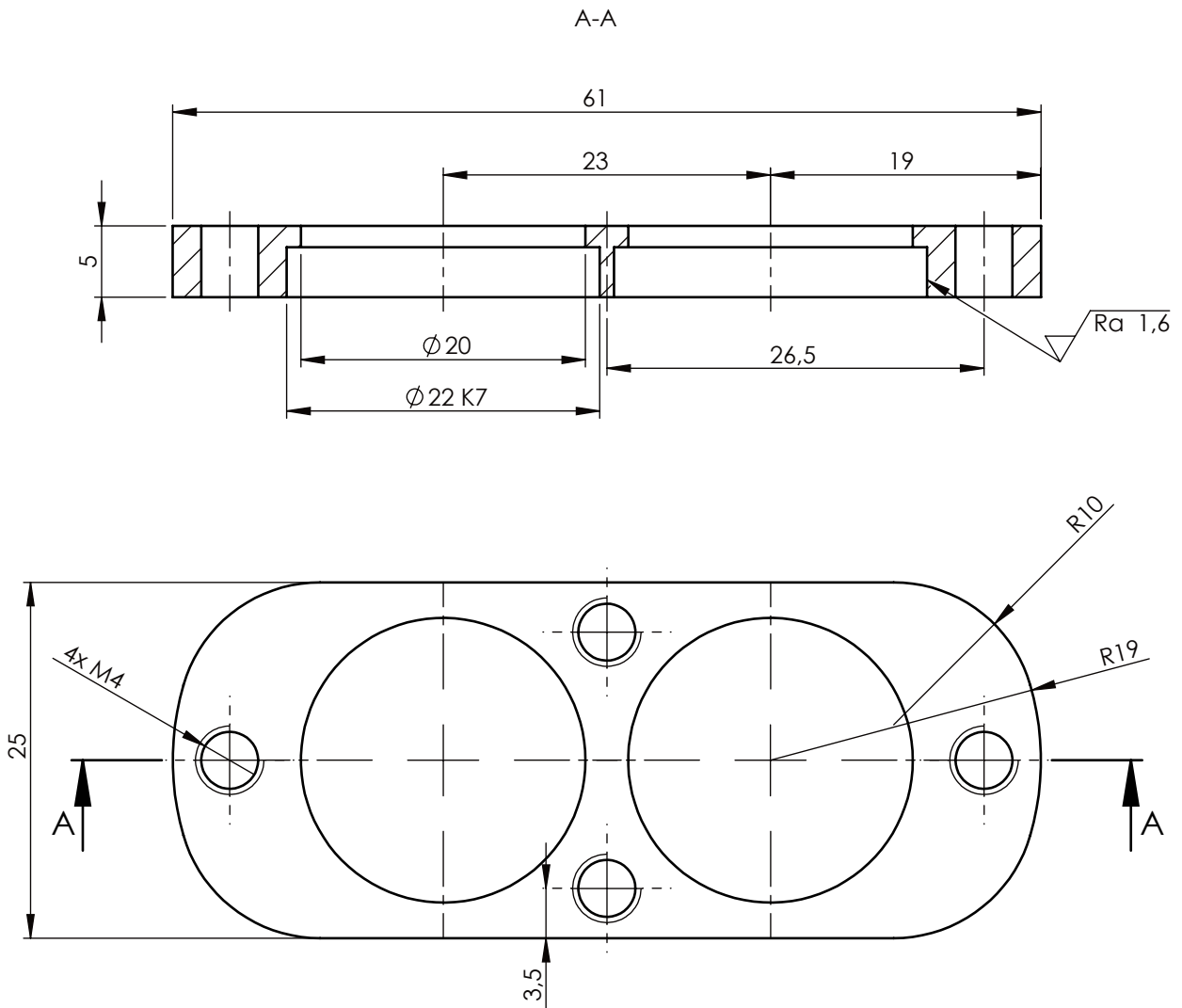
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović	
	Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić	

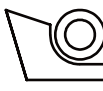
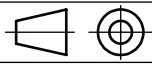
ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:	
$\phi\ 6h6$	0,000 -0,008		R. N. broj:	

$\phi\ 7h6$	0,000 -0,009	Napomena:	
		Materijal: PA6	

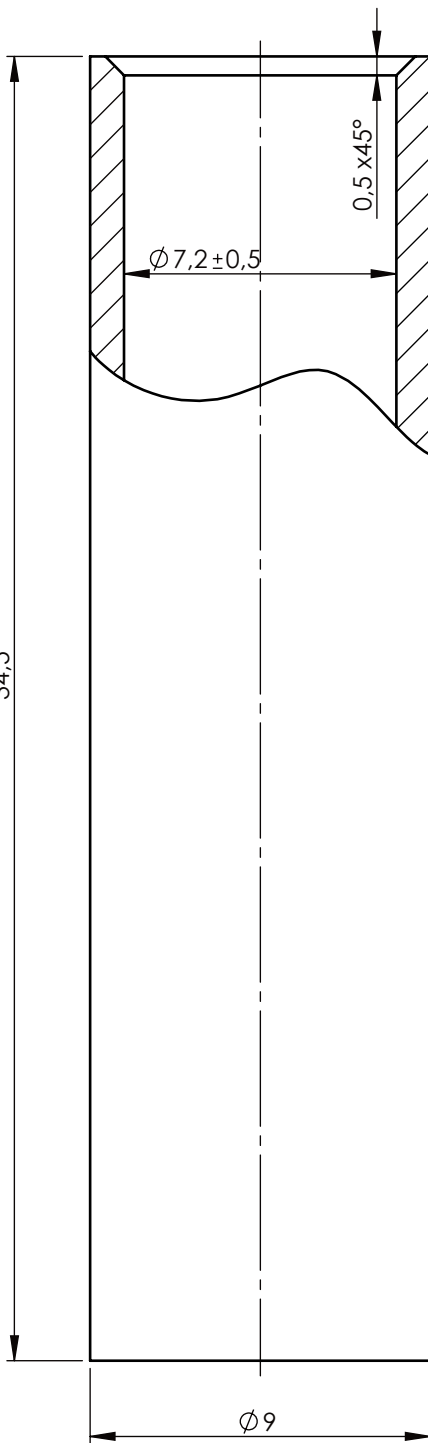
 Mjerilo originala M2:1	Naziv:	Zupčanik 2	Pozicija:	10	Format: A4
	Crtež broj:		HB-2024-Z2		Listova: 1
					List: 1

√ Ra 3,2 | √ Ra 1,6



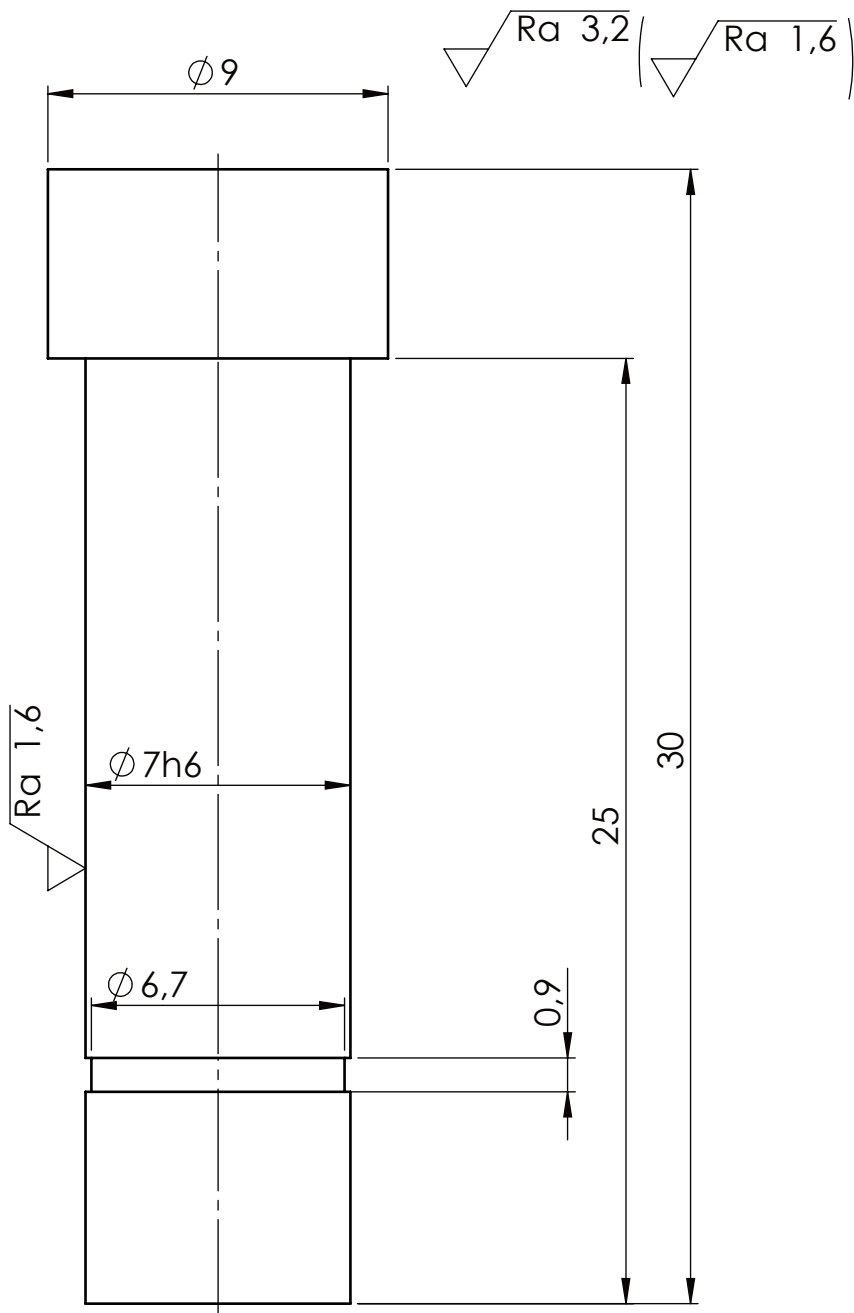
Broj naziva - code		Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
		Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
		Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
		Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
Ø 22 K7	0,006 -0,015				R. N. broj:	
		Napomena:			Kopija	
		Materijal: PA6			Masa: 0,0029kg	
		 Naziv:			Pozicija:	
		Mjerilo originala			11	
		M2:1			Format: A4	
		Crtež broj: HB-2024-P			Listova:	
					List:	


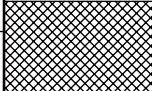
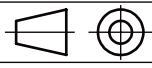
34,5



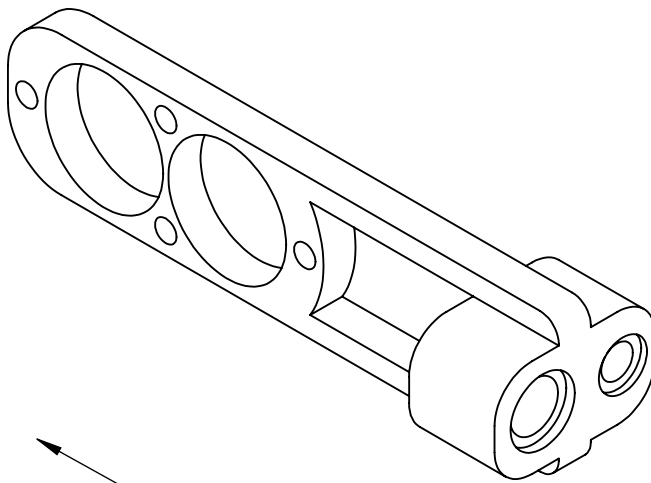
Ra 3,2

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: PA6			Masa: 0,001kg	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Distantni prsten $\phi 7$ duži		13	Listova: 1
M5:1	Crtež broj: HB-2024-D7D			List: 1



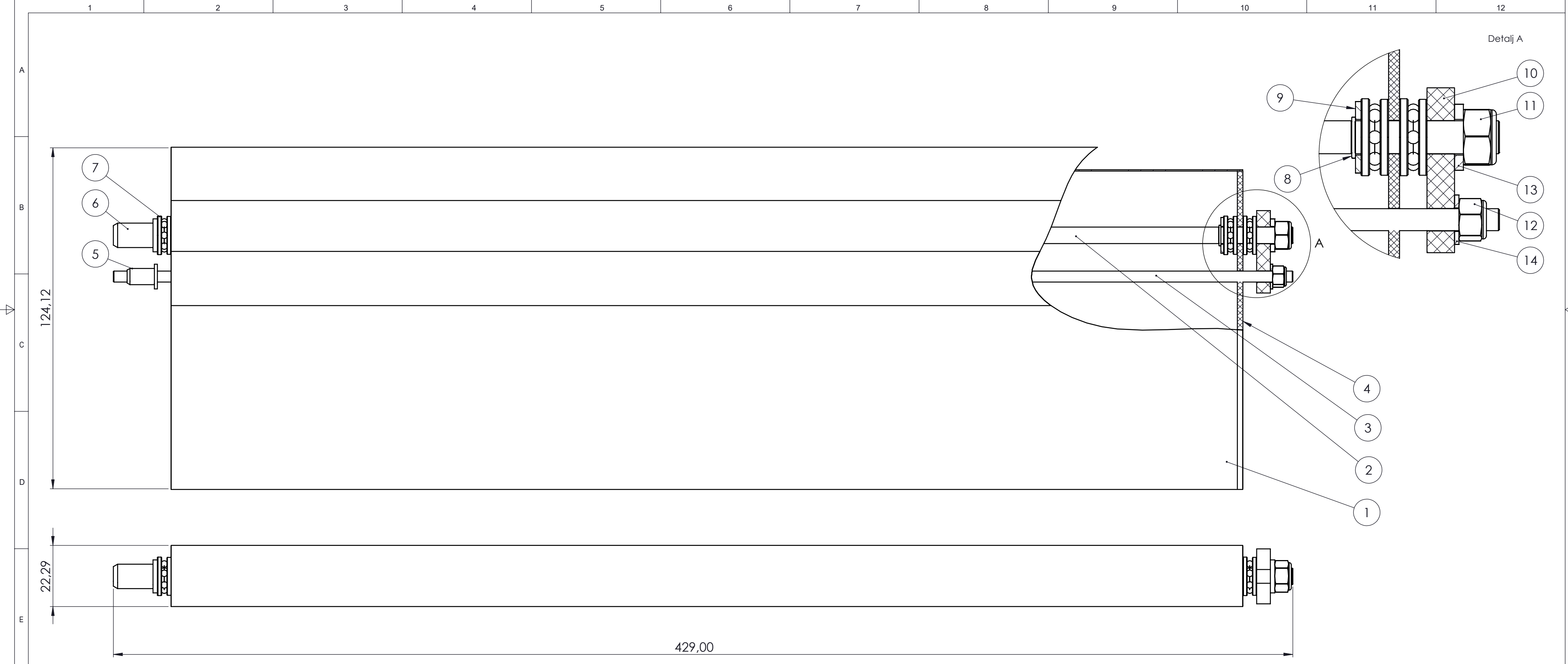
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović		
		Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
		Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
		Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
$\phi 7\ h6$	0,000 -0,009			R. N. broj:		
		Napomena:			Kopija	
		Materijal: PA6	Masa: 0,0014kg			
			Naziv:		Pozicija:	
		Mjerilo originala	Osovina poluga		14	
		M5:1	Crtež broj: HB-2024-OP		Format: A4	
					Listova: 1	
					List: 1	

Design by CADLab



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena: Komponenta je 3D printana.				Kopija
				
Materijal: Zoltek Panex 33		Masa: 0,0227kg		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Poluga krila		23	Listova: 1
M1:1	Crtež broj: HB-2024-PK			List: 1

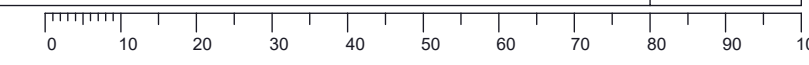


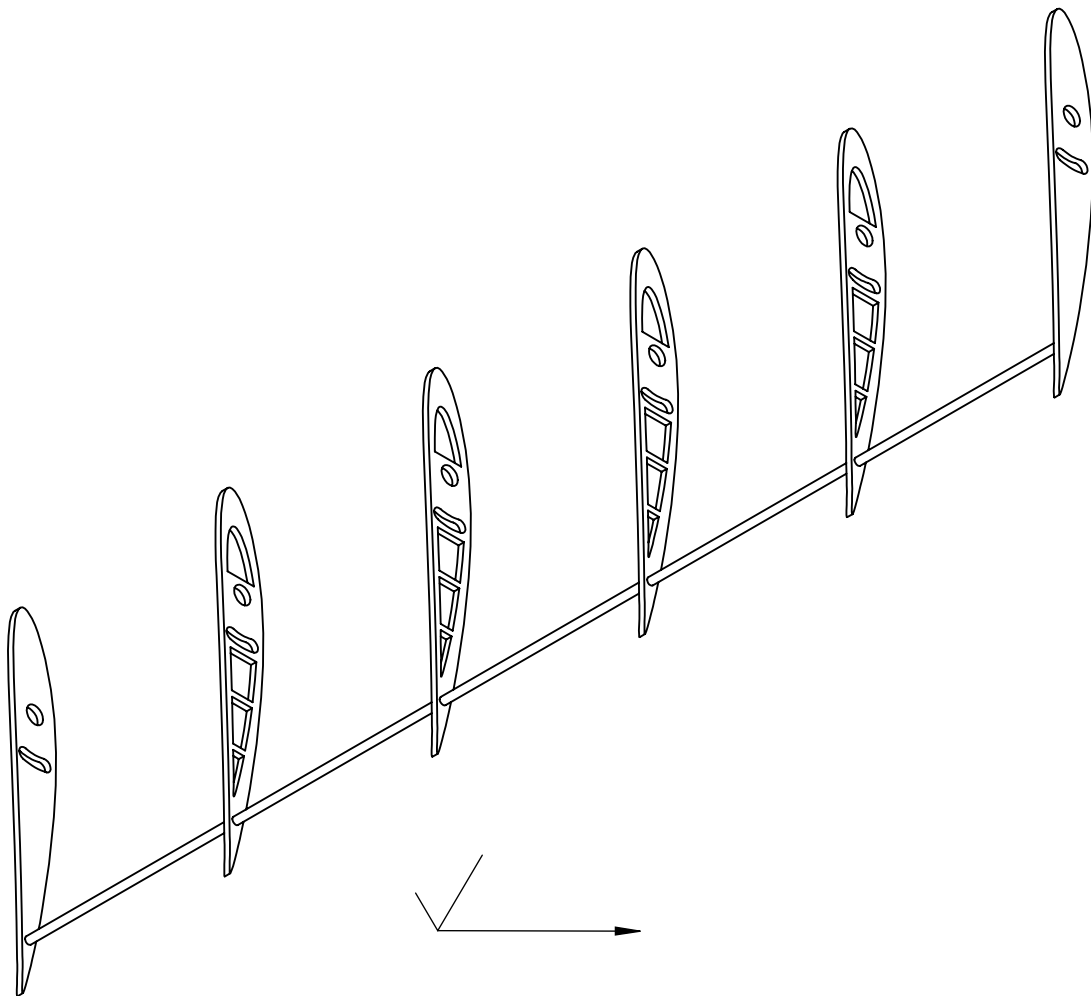


Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Dimenzije	Masa
14	Podloška M4	1	DIN 433	S235JR	Ø 9x 0,8	0,0001kg
13	Podloška M6	1	DIN 433	S235JR	Ø 12x 1,6	0,0002kg
12	Matica M4	1	DIN 985	S235JR	8x 7x 5	0,0013kg
11	Matica M6	1	DIN 985	S235JR	11,5x10x6	0,0028kg
10	Pločica	1	HB-2024-P	PA6	30x 20x 5	0,0026kg
9	Podloška široka M6	1	DIN 125	PEEK	Ø 13x1,1	0,0009kg
8	Uskočnik Ø 6	1	DIN471	S235JR	Ø 7/0,7	0,0002kg
7	Aksijalni ležaj	3	BA6 SKF	PA6	Ø 14x5	0,0006kg
6	Umetak manji	1	69135_040_030	S235JR	Ø 9x 10	0,0018kg
5	Umetak veći	1	69135_060_030	S235JR	Ø 12x 16	0,0054kg
4	Aeroprofil krila	1	HB-2024-APK	Hexcel AS4C	390x 125x 15	0,0242kg
3	Šipka	1	HB-2024-S	Al	Ø 4x 423	0,0144kg
2	Cjevčica	1	HB-2024-C	Al	Ø 6x 423	0,0242kg
1	Platno	1	HB-2024-PK	Poliester	390x280x0,23	0,0289kg

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Dimenzije	Masa
Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis
Projektirao		15.09.2024.	Helena Brzović		[Signature]	
Razradio		15.09.2024.	Helena Brzović		[Signature]	
Crtao		15.09.2024.	Helena Brzović		[Signature]	
Pregledao		15.09.2024.	Ivica Galić		[Signature]	
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
				R. N. broj:		
Napomena:						Kopija
Materijal:		Masa: 0,1088kg				
Mjerilo originala		Naziv:		Pozicija:		Format: A2
M1:1		Sklop krila		2		Listova: 1
		Crtež broj: HB-2024-PS_SK		List: 1		

Design by CADLab&DZ





	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Razradio	15.09.2024.	Helena Brzović		
Crtao	15.09.2024.	Helena Brzović		
Pregledao	15.09.2024.	Ivica Galić		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena: Komponenta je 3D printana.				Kopija
Materijal: Hexcel AS4C		Masa: 0,0242kg		
		Naziv:	Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala		<b>Aeroprofil krila</b>		<b>4</b>
<b>M1:2</b>		Crtež broj:	<b>HB-2024-APK</b>	Listova: 1
				List: 1