

Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi

Zubčić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:770533>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Zubčić

Zagreb, veljača 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Završni rad
Primjena bespilotnih letjelica u
poljoprivredi

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Filip Zubčić

Zagreb, veljača 2025.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Luliću na pruženoj pomoći, na ukazanom vremenu i stručnom vođenju kroz izradu rada.

Filip Zubčić



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Zubčić** JMBAG: **0035235191**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of unmanned aerial vehicles in agriculture**

Opis zadatka:

Korištenje besposadnih (bespilotnih) letjelica (dronova) u poljoprivredi je još uvijek je u ranoj fazi razvoja, ali se u tom području očekuje intenzivan razvoj kako letjelica tako i njihove opreme. S opravdanjem se može očekivati da će takav razvoj u relativno kratkom vremenu ponuditi upotrebljive letjelice za relativno jeftine i učinkovite usluge u širokom spektru primjena u poljoprivredi kao što su praćenje rasta i stanja usjeva, precizno navodnjavanje, gnojidbu i detekciju nametnika.

Završnim radom treba istražiti trenutačne trendove, prednosti i izazove primjene dronova u poljoprivredi, s naglaskom na njihov utjecaj na učinkovitost i održivost suvremene poljoprivredne proizvodnje.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Proučiti dostupnu literaturu (znanstvene članke, tehničke izvještaje i studije slučaja) o različitim vrstama bespilotnih letjelica koje se koriste u poljoprivredi.
- Izraditi pregled primjera uporabe bespilotnih letjelica u poljoprivredi, uključujući njihove specifične funkcije i koristi.
- Izraditi pregled vrsta bespilotnih letjelica (klasifikaciju) s primarnom namjenom uporabe u poljoprivredi, uključujući njihove karakteristike i prednosti.
- Za odabrane modele izraditi pregled ključnih značajki kao što su geometrijske mjere, masa letjelice, vrsta pogona, vrijeme leta i nosivosti mjerne/radne opreme odnosno korisnog tereta.
- Proučiti i ocijeniti utjecaj različitih konfiguracija letjelica (heli, quad, fixed wing) na nosivost, dolet i trajnost leta.
- Za odabrani primjer bespilotne letjelice usporediti energetske potrebe različitih sustava pogona (MSUI, hibridni, električni).
- Izraditi proračun elemenata pogonskog sustava te prikazati rezultate proračuna odgovarajućim dijagramima.

Pri izradi rada potrebno je pridržavati se standardnih pravila za izradu završnog rada. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.

2. rok: 10. i 11. 7. 2025.

3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

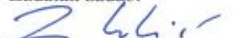
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.

2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.

3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

Sadržaj.....	II
Popis slika	III
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
Popis kratica	VI
Sažetak	VII
Summary	VIII
1 Uvod	1
1.1 Precizna poljoprivreda	1
1.2 Vrste kamera u preciznoj poljoprivredi.....	2
1.2.1 Multispektralne kamere	2
1.2.2 Termalne kamere	3
1.2.3 Hiperspektralne kamere	3
1.3 Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi	3
1.3.1 Praćenje stanja i rasta usjeva	3
1.3.2 Precizno navodnjavanje	4
1.3.3 Praćenje stoke.....	4
1.3.4 Prskanje pesticidima i gnojidba usjeva	5
1.3.5 Mapiranje i slikanje	5
2 vrste bespilotnih letjelica	6
2.1 Klasifikacija bespilotnih letjelica	6
2.1.1 Multi – rotor	6
2.1.2 Bespilotne letjelice s nepokretnim krilima.....	7
2.1.3 Single – rotor.....	7
2.1.4 Hibridni	8
2.2 Podjela bespilotnih letjelica prema vrsti pogona	10
2.2.1 Električni dronovi – baterijsko napajanje	11
2.2.2 Dronovi pogonjeni s motorom na unutarnje izgaranje	11
2.2.3 Hibridni dronovi	12
2.2.4 Električni dronovi – solarno napajanje	14
3 Proračun leta bespilotne letjelice	16
3.1 Metodologija proračuna	16
3.1.1 Vertikalno letenje i lebdenje	16
3.1.2 Horizontalno letenje.....	18
3.2 Osnovni principi leta drona DJI AGRAS T25	20
3.2.1 Lebdenje.....	20
3.2.2 Vertikalno letenje	20
3.2.3 Horizontalno letenje.....	21
3.2.4 Prikaz snage ovisno o masi	22
4 Zaključak	26
5 Literatura	27

POPIS SLIKA

Slika 1. Snimanje divljih svinja[7]	5
Slika 2. Multi-rotor dron pri prskanju[12]	6
Slika 3. Letjelica s nepokretnim krilima tijekom mapiranja [14].....	7
Slika 4. Letjelica s jednim glavnim rotorom prilikom prskanja [15]	8
Slika 5. Hibridni, vertikalno polijetanje, [16]	9
Slika 6. Hibridni, horizontalno polijetanje[16]	9
Slika 7. Električni dron [19]	11
Slika 9. Hibridni dron [22]	13
Slika 10. Dron na solarno napajanje [23]	14
Slika 11. Sile tijekom vertikalnog leta[24].....	17
Slika 12. Brzine zraka pri prolasku kroz rotor, [24].....	18
Slika 13. Sile pri horizontalnom letu [26]	19
Slika 14. Prikaz praznjena spremnika pri horizontalno letenje	23
Slika 15. Prikaz ovisnosti snage o masu u vremenu	24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled značajki dronova prema tipu krila odnosno načinu pogona/leta	10
Tablica 2. Prikaz karakteristika tipa hibridnih konstrukcija dronova	13
Tablica 3. Prikaz karakteristika dronova na različiti pogon	15
Tablica 4. Prikaz rezultata	24

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_p	N	Potisak
G	N	Težina
n	-	Broj propelera
ρ	kg/m ³	Gustoća zraka
A_p	m ²	Površina presjeka zraka koji rotor zahvaća
A	m ²	Površina drona
v_r	m/s	Brzina zraka pri ulasku u rotor
v_s	m/s	Brzina zraka ispod rotora
m	kg	masa
g	m/s ²	Gravitacijsko ubrzanje
P	W	Snaga
C_d	-	Koeficijent otpora
α	rad	Kut nagiba drona
v	m/s	Brzina gibanja drona
F_{vp}	N	Vertikalna komponenta sile potiska
F_{hp}	N	Horizontalna komponenta sile potiska
E	Wh	Energija
t	Min	Vrijeme
m_s	kg/min	Masa u vremenu
m_0	kg	Početna masa
s	m	Put

POPIS KRATICA

UAV	Unmanned Aerial Vehicels (hrv. Bespilotna letjelice)
GIS	Geografski informacijski sustav
GPS	Globalni pozicijski sustav
NDVI	Normalized Diffrence Vegetation Indeks (hrv. Vegetacijski indeks)

SAŽETAK

Upotreba bespilotnih letjelica (dronova) u poljoprivredi predstavlja inovativan pristup koji omogućuje efikasnije upravljanje poljoprivrednim procesima. Cilj ovog rada je analizirati trenutne trendove, prednosti i izazove primjene dronova u poljoprivredi, s naglaskom na njihov utjecaj na učinkovitost i održivost suvremene poljoprivredne proizvodnje.

U radu će se analizirati dostupna literatura o različitim vrstama bespilotnih letjelica koje se koriste u poljoprivredi, njihova funkcionalnost te specifične prednosti i ograničenja. Također će biti izrađena klasifikacija bespilotnih letjelica prema njihovoj namjeni i tehničkim karakteristikama. Posebna pažnja bit će posvećena analizi ključnih značajki odabranih modela letjelica, uključujući njihovu geometriju, vrstu pogona, nosivost te operativne performanse.

Dodatno, usporedit će se različite konfiguracije letjelica (heli, quad, fixed wing) s obzirom na nosivost, dolet i primjenu u poljoprivredi. Također će biti provedena analiza energetske potreba različitih sustava pogona (MSUI, hibridni, električni) te izrađen proračun elemenata pogonskog sustava.

Ključne riječi: dron, poljoprivreda, primjena, konfiguracije, pogon

SUMMARY

The use of unmanned aerial vehicles (drones) in agriculture represents an innovative approach that enables more efficient management of agricultural processes. The aim of this paper is to analyze the current trends, advantages and challenges of using drones in agriculture, with an emphasis on their impact on the efficiency and sustainability of modern agricultural production.

The paper will present an overview of the available literature on different types of drones used in agriculture, their functionality and specific advantages and limitations. A classification of unmanned aerial vehicles will also be developed according to their purposes and technical characteristics. Special attention will be paid to the analysis of the key features of the selected aircraft models, including their geometry, propulsion type, payload and operational performance.

Additionally, different aircraft configurations (heli, quad, fixed wing) will be compared with regard to payload, range and application in agriculture. An analysis of the energy needs of different drive systems (MSUI, hybrid, electric) will also be performed and a calculation of the elements of the drive system will be made.

Keywords: drone, agriculture, application, configurations, drive

1 UVOD

Razvoj tehnologije posljednjih desetljeća značajno je utjecao na poljoprivrednu industriju, omogućujući optimizaciju proizvodnje, smanjenje troškova i povećanje održivosti. Precizna poljoprivreda je suvremeni pristup upravljanju poljoprivrednom proizvodnjom kako bi se maksimizirala učinkovitost i održivost. Ovaj koncept temelji se na prikupljanju i analizi podataka o stanju tla, usjeva i okoliša. Prilikom snimanja poljoprivrednih površina najčešće se koriste bespilotne letjelice. Razvoj bespilotnih letjelica (engl. UAVs – Unmanned Aerial Vehicels), odnosno dronova značajno raste u nekomercijalne i komercijalne svrhe. Dronovi su službeno u komercijalnoj uporabi prisutni od 1980. godine, a u posljednjih godina sve češće se koriste u različitim granama gospodarstva. [1]

Dronovi značajno utječu na poljoprivredu, njihova primjena znatno može smanjiti upotrebu kemijskih sredstava i povećati uspješnost proizvodnje. Imaju širok spektar primjene u poljoprivredi koji omogućuje precizno snimanje poljoprivrednih površina iz zraka, prikupljanje podataka čijom obradom može se pratiti rast/napredovanje usjeva, mapiranje površina, detekcija površina na kojima je došlo do velike količine vode, detekcija korova i mnogih drugih. Osim prikupljanje informacija primjenjuju se i za prskanje usjeva za što se koriste veći tj. teretni dronovi. Prilikom svih navedenih radnji za prikupljanje podataka koriste različite kamere i senzore na različitom tipu bespilotne letjelice. Najčešća podjela dronova je prema njihovoj konstrukciji i vrsti pogona.

1.1 Precizna poljoprivreda

Precizna poljoprivreda je napredan pristup obavljanja poljoprivrednih radova koji koristi modernu tehnologiju čime se dobiva visoka produktivnost, smanjen broj operacija te relativno lakši pristup. Razvoj precizne poljoprivrede započeo je uvođenjem geografskog informacijskog sustava (GIS-a) i globalnog pozicijskog sustava (GPS-a) u poljoprivrednoj mehanizaciji, a glavni cilj je dati na raspolaganje što veći broj preciznih informacija poljoprivredniku prilikom donošenja odluka. [2]

GIS je tehnološki sustav koji omogućava prikupljanje, pohranu, analizu, upravljanje i vizualizaciju prostornih podataka. GIS kombinira kartografiju, analizu prostornih podataka i računalnu tehnologiju kako bi omogućio bolje razumijevanje prostornih odnosa i donošenje odluka u raznim područjima. Novo razvijeni tehnološki sustavi omogućuju precizno praćenje prostorne promjenjivosti karakteristika zemljiša, što znači da više ne možemo tretirati tlo kao homogenu površinu na temelju prosječnih faktora, kao što se to radi u tradicionalnom ratarstvu.

Ciljevi primjene precizne poljoprivrede su:

- smanjenje negativnog utjecaja na okoliš (prekomjerno korištenje kemijskih sredstava),
- ušteda repromaterijala, odnosno radnih sredstva
- ostvarenje većih prinosa (veća dobit),
- poboljšavanje kvalitete proizvoda,
- smanjenje obima rada ljudi,
- ušteda u radnom vremenu,
- dokumentiranje procesa proizvodnje,
- stvaranje kvalitetnog radnog kadra,
- smanjenje preklapanja,
- praćenje stanja i razvoja usjeva.

Ostvarenje ciljeva precizne poljoprivrede omogućeno je stvaranje kvalitetnih strategija gospodarenja, primjenom novih tehnologija te stvaranjem obučenih radnih kadrova koji mogu izvesti kvalitetno prikupljanje informacija, provedbu analize, donijeti zaključak o uzročno posljedičnim vezama te primijeniti znanje u praksi. [3]

1.2 Vrste kamera u preciznoj poljoprivredi

Razvoj tehnologija omogućio je primjenu kamera i senzora na dronovima, čime se znatno poboljšava praćenje stanja usjeva, analiza tla, praćenje stoke, precizno navodnjavanje, mapiranje te slikanje. Oni omogućuju brzo, precizno i detaljno prikupljanje podataka. U preciznoj poljoprivredi najčešće se koriste multispektralne, termalne i hiperspektralne kamere.

1.2.1 Multispektralne kamere

Multispektralna kamera je vrsta kamere koja ima sposobnost snimanja različitih spektara ili slika izvan raspona vidljivog ljudskom oku. To je zato što mogu otkriti zračenje u različitim valnim duljinama ili spektralnim pojasima, poput bliskog infracrvenog (NIR), srednjeg infracrvenog (MIR) ili termalnog infracrvenog (TIR). Omogućuju detekciju stresa biljaka, količinu vode i vlage i određivanje potrebe za gnojivom. [4]

Na temelju snimki kamere mogu se izračunati vegetacijski indeksi. Vegetacijski indeks je podatak koji se računa iz različitih kanala multispektralnih snimki na temelju apsorpcije i refleksije svjetlosti, primjerice – upijanje svjetlosti prilikom fotosinteze. [5]

1.2.2 Termalne kamere

Termalne kamere postale su nezaobilazan alat u preciznoj poljoprivredi, jer senzori koji primaju infracrveno zračenje koje emitiraju svi objekti s temperaturom iznad apsolutne nule. U poljoprivredi se koriste za dobivanje uvid u toplinski stres, prebrojavanje krupne divljači, učinkovitost korištenja voda te metabolizam biljaka. [6]

Termalne kamere omogućuju detekciju životinja gdje ih je teško uočiti pomoću klasičnih kamera. One bilježe toplinsko zračenje koje životinje emitiraju pružajući mogućnost identifikaciju životinja na temelju razlika u temperaturi između njih i okoliša. Najbolja visina za snimanje je 100 metara, jer omogućuje dobru preglednost i preciznu detekciju životinja. [7]

1.2.3 Hiperspektralne kamere

Hiperspektralne kamere čine naprednu tehnologiju u istraživanjima poljoprivrede, omogućujući izuzetno detaljnu analizu biljaka i tla. Za razliku od multispektralnih kamera koje snimaju u nekoliko širokih spektralnih pojaseva, hiperspektralne kamere generiraju bilježe uske spektralne pojaseve. Jedna od najčešćih primjena hiperspektralnih kamera je procjena razine nutritivnih vrijednosti u usjevima. [8]

1.3 Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi

Bespilotne letjelice (dronovi) predstavljaju naprednu tehnologiju koja pronalazi sve širu primjenu u modernoj poljoprivredi. Njihova najveća prednost je mogućnost da ponude brze i precizne usluge u usporedbi s tradicionalnim metodama upravljanja poljoprivrednom površinom, jer omogućuju detaljno mapiranje terena, praćenje zdravlja usjeva u realnom vremenu, pravovremenu detekciju bolesti i štetnika, optimizaciju korištenja resursa poput vode, gnojiva i pesticida, te praćenje stoke što rezultira povećanjem prinosa i smanjenjem troškova proizvodnje. [1]

1.3.1 Praćenje stanja i rasta usjeva

Praćenje rasta usjeva ključno je za preciznu poljoprivredu, a dronovi omogućuju brz i točan pregled velikih površina, prikupljajući visoko rezolucijske slike i multispektralne podatke koji pomažu u analizi stanja biljaka. Multispektralne kamere prilikom snimanja usjeva mogu detektirati nevidljivi stres, kao što su manjak potrebnih nutritivnih vrijednosti ili rane pojave štetočina, puno prije nego što postanu vidljivi golom oku. Rano otkrivanje problema omogućuje ranu intervenciju i veću mogućnosti oporavljanja usjeva što je velika prednost jer tako je moguće izbjeći nepotrebno nanošenje sredstva na cijeloj površini, već je moguće primijeniti sredstvo na mjesto pogođeno bolešću. S takvom primjenom se ostvaruje financijske uštede. Za

nadzor zdravlja biljaka najčešće se koristi vegetacijski indeks biljke (NDVI, eng. Normalized Difference Vegetation Indeks). [1]

Korištenjem senzora visoke rezolucije prikupljaju se podaci koji omogućuju:

- Analizu zdravlja biljaka
- Praćenje brzine rasta
- Optimizaciju uzgojnih praksi
- Nedostatka hranjivih tvari

1.3.2 Precizno navodnjavanje

Dronovi opremljeni termalnim, multispektralnim i hiperspektralnim kamerama prikladni su za korištenje prilikom utvrđivanja na kojem se dijelu površine pojavljuje nedostatak vlage i veće količine vode. Time se postiže lakše navodnjavanje uz smanjenje potrošnje vode i povećanje energetske učinkovitosti. Poljoprivrednici u sušnim regijama mogu koristiti dronove za preciznu distribuciju vode i spriječiti gubitke uslijed isparavanja, zahvaljujući sustavima koji omogućuju ciljano navodnjavanje na temelju podataka o vlažnosti tla i potrebama biljaka.

1.3.3 Praćenje stoke

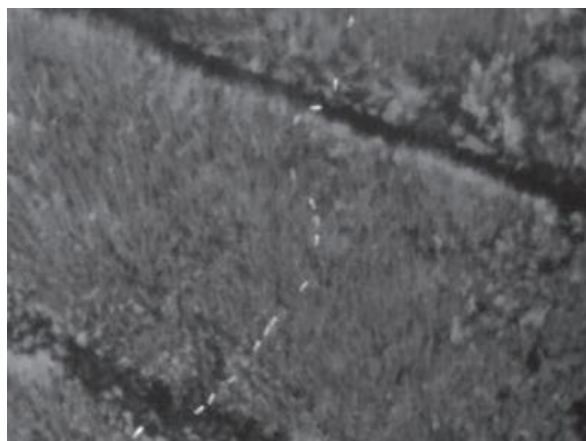
Osim praćenja usjeva, dronovi su korisni i u stočarstvu, opremljeni termalnim kamerama mogu se koristiti za brojanje i praćenje divljači, što može biti primjenjivo i za stoku. Omogućuju precizan pregled terena iz zraka, posebno u teško dostupnim područjima. Te brže pronalaženje izgubljene stoke na velikim farmama ili nepreglednim terenima.

Metode prebrojavanja – Testirane su dvije metode:

- Apsolutno prebrojavanje – Direktno brojanje svih životinja na poznatoj površini, što daje preciznije rezultate, ali je primjenjivo na manje površine.
- Prebrojavanje na transektima – Snimanje po unaprijed određenim pravcima (transektima), korisno za veće površine, ali s većom mogućnošću pogreške.

Dronovi s termalnim kamerama su korisna tehnologija za nadzor stoke i divljači, ali je njihova preciznost ovisna o metodi snimanja i vanjskim uvjetima. Primjer snimanja divljih svinja metodom apsolutnog brojanja na plohi poznate površine prikazano je na slici 1.

Za manje površine bolja je metoda apsolutnog prebrojavanja, dok je za veće površine potrebno optimizirati metode kako bi se smanjile greške u procjeni broja životinja. [7]



Slika 1. Snimanje divljih svinja[7]

1.3.4 Prskanje pesticidima i gnojidba usjeva

Prednosti upotrebe dronova pri prskanju je mogućnost raspršivanja kemijskih sredstva u teško dostupnim područjima, minimalno potrošeno vrijeme i smanjenje utrošene količine kemijskih sredstava. Pri upotrebi dronova vodi se računa o zaštiti prirode i posebno se smanjuje mogućnost zagađenja podzemnih voda, njihova oprema je izrazito precizna za prskanje i gnojidbu, procjenjuje se da je točnost od 90 % do 95 %. Velika preciznost pospješuje bolje upijanje usjeva. Primjenom dronova smanjuje se korištenje pesticida za 40 %.

Procjenjuje se da primjenom dronova za gnojidbu da se 30 % gnojiva manje koristi dok se zadržava isti rast i razvoj.[9]

1.3.5 Mapiranje i slikanje

Mapiranje dronom nudi preciznost upravljanja usjevima. Dronovi imaju sposobnost izrade karata rezolucije do 0.5 cm/pikselu. Visoka rezolucija omogućuje detaljnu analizu varijabilnosti unutar polja, što je ključno za upravljanje usjevima. Jedna od najčešćih primjena mapiranja je mapiranje korova. Korovi su izrazito nepoželjni i stvaraju nekoliko problema usjevu. Prskanjem herbicida uništava se korov, u tradicionalnoj poljoprivredi cijela poljoprivredna površina bi se jednako prskala, što u većini slučajeva negdje je premalo, a negdje previše, a negdje nije ni potrebno. Kako bi se to izbjeglo i što učinkovitije bi se iskoristilo prskanje, potrebna je izrazito precizna mapa korova za precizno prskanje.[9]

2 VRSTE BESPILOTNIH LETJELICA

Bespilotne letjelice se u velikoj mjeri razlikuju svojim konfiguracijama ovisno o njihovim misijama. Različite klasifikacije bespilotnih letjelica (UAV) predložene su prema različitim parametrima, uključujući njihovu veličinu, težinu, domet i izdržljivost, maksimalnu visinu, tip motora i konfiguraciju. Ove klasifikacije služe kako bi se olakšao odabir odgovarajućih parametara za UAV-ove. [10]

Međutim, mogu se svrstati u najosnovnije podjele: horizontalno polijetanje i slijetanje (eng. HTOL), vertikalno polijetanje i slijetanje (eng. VTOL) i hibridne bespilotne letjelice.

2.1 Klasifikacija bespilotnih letjelica

2.1.1 Multi – rotor

Multi-rotor je dron s dva ili više rotora s rotirajućim lopaticama fiksnog nagiba za stvaranje uzgona za vertikalno polijetanje i slijetanje. Jednostavni su za upravljanje, imaju visoku mogućnost manevriranja, može uzlijetati i slijetati vertikalno bez piste, Rotori proizvode silu potiska koja treba biti veća od težine drona kako bi uzletio. Proizvodnja i održavanje multi-rotora je jeftinije od ostalih dronova.

Dizajnirani su za stabilan let i precizno lebdenje pri malim brzinama, ali imaju kratko vrijeme letenja i ne mogu raditi u teškim uvjetima. Idealni su za vizualne inspekcije, toplinska izvješća, 3D skeniranja i za nošenje lakših tereta, poput tekućih pesticida ili sjemena. Dron s više rotora često se koristi za precizno prskanje poljoprivrednih kultura određenim pesticidima (Slika 2.) [11]



Slika 2. Multi-rotor dron pri prskanju[12]

2.1.2 Беспilotne letjelice s nepokretnim krilima

Dronovi s nepokretnim krilom (engl. *fixed-wing drone*) sastoji se od krutih krila s aeroprofilom koji izgleda i funkcionira poput aviona, za polijetanje i slijetanje potrebna im je pista (horizontalno polijetanje i slijetanje). Ovom tipu drona treba energija samo za kretanje naprijed, a ne za zadržavanje u mjestu, što ih čini energetski učinkovitima. Njihovi pogonski sustavi mogu biti u stražnjem dijelu trupa ili u prednjem dijelu. Namijenjeni su za prelaženje velikih udaljenosti tj. velikih poljoprivrednih površina u jednom letu. Dronovi s nepokretnim krilima (Slika 3.) pogodni su za mapiranje, razna istraživanja, inspekcije, sigurnost, NDVI analizu (vegetacijski indeks). [11]

Negativne strane ovakve konstrukcije su smanjena točnost provedbe predviđenog plana leta zbog veće brzine leta te potreba za uređenim uzletno sletnim stazama u blizini objekta. [13]



Slika 3. Letjelica s nepokretnim krilima tijekom mapiranja [14]

2.1.3 Single – rotor

Single-Rotor dron s jednim rotorom tj. jedan veliki rotor i manji repni rotor za stabilnost, slično klasičnom helikopteru (vertikalno polijetanje i slijetanje). Single-Rotor dronovi su izrazito jaki i izdržljivi, imaju puno veću učinkovitost u donosu na multi-rotor, što se povećava ako je dron na plinski pogon za još dulju izdržljivost. Idealni su za prenošenje teških tereta, prskanje poljoprivrednih površina (slika 4.), lebdenja s velikom izdržljivošću ili brzi let naprijed.

Negativna strana ovakvog tipa drona je da su kompleksni i skupi, zahtijevaju puno održavanja zbog njihove kompleksnosti, duge i teške lopatice velikog rotora mogu biti jako opasne. Koriste se za prenošenje teških tereta, laserska skeniranja i nadgledanja. [11]



Slika 4. Letjelica s jednim glavnim rotorom prilikom prskanja [15]

2.1.4 Hibridni

Hibridni tipovi dronova spajaju prednosti dizajna s fiksnim krilima i rotora. Ovaj tip drona ima rotore pričvršćene na nepokretnom krilu, što mu omogućuje da polijeće i slijeće poput multi-rotora, ali lete poput drona s nepokretnim krilima (slike 5. i 6.)

Ova kategorija je na tržištu samo nekoliko godina, ali kako tehnologija napreduje, ova bi opcija mogla biti puno popularnija u nadolazećim godinama.

Jednostavni su za upravljanje, autopilot može obaviti sav težak posao održavanja drona stabilnim, ostavljajući ljudskom pilotu samo navođenje drona po nebu. Koriste se za mapiranje, fotografiranje i skeniranje.[11]



Slika 5. Hibridni, vertikalno polijetanje, [16]



Slika 6. Hibridni, horizontalno polijetanje[16]

Tablica 1. Pregled značajki dronova prema tipu krila odnosno načinu pogona/leta

Tip krila bespilotne letjelice	Prednosti	Nedostaci	Primjena
Multi-rotor	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilan let • Jednostavan za upravljanje 	<ul style="list-style-type: none"> • Kratak period letenja 	<ul style="list-style-type: none"> • Skeniranje • Prskanje usjeva
Fixed-wing	<ul style="list-style-type: none"> • Dugotrajan let • Prelaženje velikih udaljenosti • Brzo letenje 	<ul style="list-style-type: none"> • Smanjena točnost • Teže pilotiranje • Potrebne uzletno/sletno staze 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspekcija • Mapiranje
Single-rotor	<ul style="list-style-type: none"> • Velika snaga i izdržljivost • Velika učinkovitost • Velika nosivost 	<ul style="list-style-type: none"> • Opasni • Kompleksnost • Skupi 	<ul style="list-style-type: none"> • Prenosanje tereta • Skeniranje • Inspekcija • Prskanje usjeva
Hibridni	<ul style="list-style-type: none"> • Jednostavni za upravljanje • Dugotrajan let 	<ul style="list-style-type: none"> • Još u razvoju 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapiranje • Skeniranje • Fotografiranje

2.2 Podjela bespilotnih letjelica prema vrsti pogona

Svi dronovi bez obzira na njihovu primjenu ili veličinu, moraju se suočiti s istim problemom, a to je prevladavanje ograničene izdržljivosti leta. Pronalazak izvora energije koji dugo traje, izvor koji je dostupan i nije izrazito skup, koji ima dobar omjer energije i težine, koji ne zagađuje okoliš i ne stvara zvukove i vibracije je izrazito teško pronaći.

2.2.1 Električni dronovi – baterijsko napajanje

U usporedbi s pogonskim sustavima koji koriste fosilna goriva, električni sustavi pokazuju velik potencijal za širu primjenu. Električni pogonski sustavi za dronove koriste električnu energiju kao izvor snage, čime se smanjuje potrošnja goriva i emisija zagađujućih tvari. U pravilu se sastoji od izvora energije, elektromotora i odgovarajućeg upravljačkog sustava. Primjer električnog drona je prikazan na slici 7. [17]

Manji dronovi koriste litij-ionske (Li-Ion) i litij-polimerske (Li-Po) baterije kao izvor energije za let. Iako ove baterije imaju određena ograničenja, vrlo su dostupne i jednostavne za upotrebu. Zahtijevaju minimalan trud pri skladištenju i transportu te se mogu puniti gotovo bilo gdje. Njihova jednostavna struktura olakšava održavanje i popravke, što ih čini praktičnim izborom za različite primjene. Električni dronovi se koriste za razne upotrebe poput: mapiranja, skeniranja (slika 7.), snimanja, slikanja i prskanja

Negativna strana dronova pogonjenih baterijama je ograničeno vrijeme u zraku, to je problem ako dron treba proći veliku površinu da odradi posao. [18]



Slika 7. Električni dron [19]

2.2.2 Dronovi pogonjeni s motorom na unutarnje izgaranje

Potražnja za dronovima s dužim vremenom leta sve je veća. Dronovi s motorima na unutarnje izgaranje imaju veći domet i mogu nositi veći teret u usporedbi s električnim dronovima. Dizajnirani su kako bi nadoknadili nedostatke električnih dronova, omogućujući znatno dulje vrijeme leta [20].

Na slici 4 prikazan je primjer drona s dvotaktnim motorom na unutarnje izgaranje. Ovi dronovi općenito se sastoje od sustava za gorivo, motora, mehaničkog prijenosa i propelera. Zahvaljujući rezervoaru goriva, mogu letjeti satima bez potrebe za punjenjem baterija. Tijekom leta, smanjenje težine zbog potrošnje goriva dodatno produžava trajanje leta.

Teža struktura omogućava dronovima da ostanu stabilni prilikom vjetrovitih uvjeta, brži su od većine električnih dronova i punjenje rezervoara traje nekoliko sekundi. [18]

Negativna strana je njihova veličina, nisu laki za transport i nisu okretni u uskim prostorima. Stvaraju puno više buke, potencijalno su opasni zbog mogućnosti zapaljenja rezervoara i znatno skuplji i kompleksniji. Koriste se od prskanja usjeva do praćenja stanja usjeva. [21]

2.2.3 Hibridni dronovi

Hibridni se odnosi na pogon koji kombinira električne motore i motore s unutarnjim izgaranjem. Sa sve većim iscrpljivanjem naftnih resursa i sve više zagađivanja okoliša koji uzrokuju ozbiljne klimatske promjene, tradicionalni motor s unutarnjim izgaranjem ne zadovoljava energetske potrebe i potrebe zaštite okoliša.

Oni su obično učinkovitiji u potrošnji goriva, a gorivo se može uštedjeti tijekom kraćih putovanja koja ostaju unutar kapaciteta baterije. Primjer hibridnog drona je prikazan na slici 9.

Hibridne konstrukcije dijele se na paralelne, serijske, serijski-paralelne i komplekse na temelju toga pruža li motor izravno potisak. U poljoprivrednim dronovima najčešće se koriste serijske, a povremeno i paralelne.

Paralelna hibridna konstrukcija sastoji se od motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora/generatora za zajednički pogon propelera putem mehaničkog prijenosnog sustava. Višak energije motora pretvara se u električnu energiju i pohranjuje se, dok se u slučaju manjka snage energija iz spremnika koristi za pokretanje elektromotora. To poboljšava učinkovitost, smanjuje potrošnju goriva i produljuje doseg.

Najvažnije svojstvo serijske hibridne konstrukcije sustava je to što motor ne pruža izravno snagu potrebnu za dron, već pokreće generator koji generira električnu energiju. Ta energija pokreće električni motor koji pokreće propeler. Ovaj sustav omogućuje veći doseg i smanjenje potrošnje i raspored s distribuiranim pogonom omogućuje fleksibilnost dizajna drona. [17]

Tablica 2. Prikaz karakteristika tipa hibridnih konstrukcija dronova

Tip konstrukcije	Svojstvo	Prednosti	Nedostaci
Serijska	Pogonski sustav pokreće samo električni motori	<ul style="list-style-type: none">• Jednostavna konstrukcija• Lako za održavanje• Jeftinija	<ul style="list-style-type: none">• Velika emisija• Loša učinkovitost• Ima samo električni mod
Paralela	Pogonski sustav sastoji se od motora i električnog motora koji zajedno rade i postižu potisak	<ul style="list-style-type: none">• Velika pouzdanost• Odlične performanse pri većim brzinama• Ima dva moda	<ul style="list-style-type: none">• Velika emisija• Loša učinkovitost• Mala izdržljivost



Slika 8. Hibridni dron [22]

2.2.4 Električni dronovi – solarno napajanje

Fotonaponske solarne ćelije koriste sunčevu svjetlost za proizvodnju električne energije, pružajući čist, ekološki prihvatljiv i ne zagađujući izvor energije. Pogonski sustavi solarnih dronova sastoje se od solarnih panela, litij-ionskih baterija, električnih motora, propelera i kontrolera. Primjer električnog drona na solarno napajanje prikazan je na slici 10.

Zbog niske učinkovitosti pretvorbe i male energetske gustoće solarnih ćelija, njihova primjena često zahtijeva veliku površinu za postavljanje. To se obično postiže povećanjem raspona krila, na koja se postavljaju solarni paneli. Tijekom dana, solarne ćelije proizvode električnu energiju, dok se višak pohranjuje u litij-ionske baterije kako bi dron mogao nastaviti letjeti i noću.

Solarni dronovi posebno su prikladni za letove na velikim visinama i dugog trajanja, što ih čini izuzetno korisnima u područjima kao što su komunikacija, navigacija, nadzor, meteorologija i poljoprivreda.[17]

Omogućuje poljoprivrednicima da automatski pregledaju svoje poljoprivrednu površinu kako bi pratili svoje resurse. Prikuplja podatke iz zraka na tisućama hektara, te podatke analizira zahvaljujući AI kako bi poljoprivrednicima pružili uvide za donošenje kritičnih odluka (identifikacija vegetacije, informacije o navodnjavanju, brojanje životinja).



Slika 9. Dron na solarno napajanje [23]

Tablica 3. Prikaz karakteristika dronova na različiti pogon

Tip pogona	Prednosti	Nedostaci
Električni dronovi – baterijsko napajanje	<ul style="list-style-type: none"> • Dostupnost • Jednostavnost • Energetski učinkoviti 	<ul style="list-style-type: none"> • Ograničeno vrijeme u zrak
Električni dronovi – solarno napajanje	<ul style="list-style-type: none"> • Dugotrajan let • Let na velikim visinama • Manje zagađenje okoliša 	<ul style="list-style-type: none"> • Niska učinkovitost
Dronovi pogonjeni s motorom na unutarnje izgaranje	<ul style="list-style-type: none"> • Veći domet • Veća nosivost • Veća stabilnost • Veća brzina 	<ul style="list-style-type: none"> • Teži transport • Stvaranje veće buke • Skuplji i kompleksniji
Hibridni	<ul style="list-style-type: none"> • Manja potrošnja goriva • Manje zagađenje okoliša • Veći domet 	<ul style="list-style-type: none"> • Kompleksniji i skuplji

3 PRORAČUN LETA BESPILOTNE LETJELICE

Let drona temelji se na osnovnim zakonima fizike, uključujući Newtonove zakone gibanja, zakon očuvanja momenta, rad, energiju i snagu. Dron može izvoditi tri osnovne radnje: lebdenje (eng. hovering), uspinjanje (eng. climbing) i horizontalno gibanje (eng. forward motion).

Za precizno razumijevanje rada drona, važno je razmotriti sile koje na njega djeluju, potisak koji generiraju propelere, otpor zraka i gravitaciju. Korištenjem osnovnih fizikalnih principa, mogu se izračunati potrebna snaga i potrošnja energije za svaki tip leta.[24]

3.1 Metodologija proračuna

3.1.1 Vertikalno letenje i lebdenje

Bespilotna letjelica tj. njezini motori i propeleri moraju stvoriti dovoljno velik potisak kako bih uspjela uzletjeti. Pri projektiranju dronova zahtijeva se potisak barem 1.5 do 2 puta veći od njihove ukupne težine. Čime se osigurava zadovoljavajuća nosivost i mogućnost manevriranja. Primjerice, za dron mase 2 kg predviđa se najmanje 3 kg potiska.

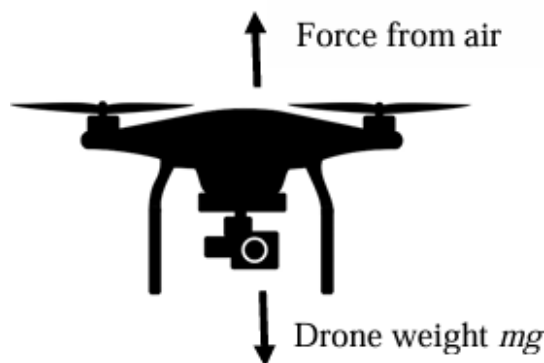
Potisak (F_p) je sila koju stvaraju motori i propeleri drona kako bi se suprotstavili težini drona (sili uslijed gravitacije). Potisak ovisi o pogonskom sustavu drona, propelerima i motorima. Težina drona (G) ovisi o ukupnoj masi drona (masa okvira, baterije, motora, tereta). Primjer sila je prikazan na slici 11. [25]

Omjer potiska i težine (TWR) je omjer ukupnog potiska i ukupne težine drona.

$$TWR = \frac{\text{Potisak}}{\text{Težina}} = \frac{F_p}{G}. \quad (1)$$

Gdje je:

- $TWR > 1$: dron može uzletjeti
- $TWR = 1$: dron lebdi
- $TWR < 1$: dron ne može uzletjeti nit lebdi



Slika 10. Sile tijekom vertikalnog leta[24]

Tlak zraka na rotoru niži je od tlaka mirujućeg zraka, što uzrokuje strujanje zraka prema rotoru, ali bez značajne kompresije. Rotor potom povećava tlak zraka iznad okolnog tlaka, a zrak se zatim kreće niz tlačni gradijent dok ne dostigne okolni tlak, pritom postižući brzinu v_s , odnosno brzinu strujanja. Rotor je jedino mjesto u tom sustavu gdje je površina precizno poznata.

Gledajući potisak iz perspektive strujanja, zrak započinje u mirovanju i postupno postiže brzinu v_s , zahvaljujući radu rotora, tako stvarajući silu potiska. Prikaz prolaska zraka kroz rotor prikazan je na slici 12.

$$F_p = n \cdot \rho \cdot A \cdot v_r \cdot v_s, \quad (2)$$

gdje je:

- n – broj propelera (rotora), -
- ρ – gustoća zraka, kg/m^3 (približno $1,225 \text{ kg/m}^3$ na razini mora)
- A – površina presjeka zraka koji rotor zahvaća, m^2
- v_r – brzina zraka pri ulazu u rotor, m/s
- v_s – brzina zraka ispod rotora, m/s .

$$G = m \cdot g, \quad (3)$$

gdje je:

- m – masa letjelice, kg
- g – gravitacijsko ubrzanje, m/s^2 .

Dron lebdi kada se uzgon koji stvaraju propelere potpuno izjednači s njegovom težinom. Omjer potiska i težine mora biti jednak 1. To znači da propeleri moraju gurati zrak prema dolje kako bi se ostvarila jednaka suprotna sila prema gore, prema Newtonovom trećem zakonu.

Jednadžba za ravnotežu sila pri lebdenju:

$$n \cdot \rho \cdot A \cdot v_r \cdot v_s = m \cdot g, \quad (4)$$

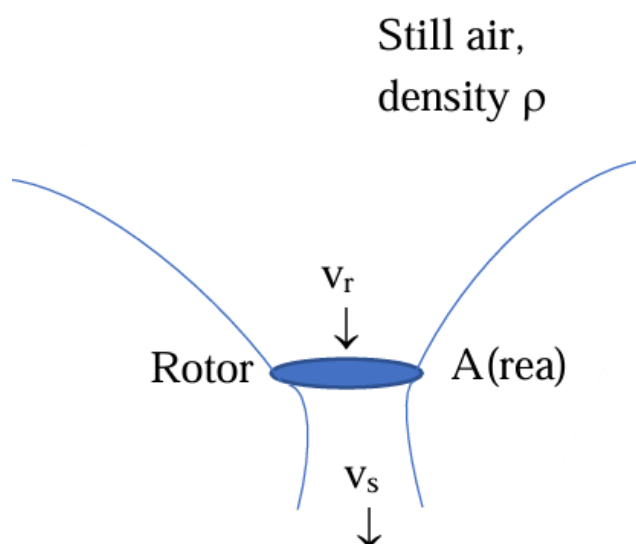
$$v_r = \frac{(v_s + v)}{2}. \quad (5)$$

Snaga potrebna za lebdenje:

$$P = \sqrt{\frac{(m \cdot g)^2}{2 \cdot n \cdot \rho \cdot A}}. \quad (6)$$

Snaga potrebna za vertikalno letenje:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot v_s + \frac{3}{2} \cdot m \cdot g \cdot v. \quad (7)$$



Slika 11. Brzine zraka pri prolasku kroz rotor, [24]

3.1.2 Horizontalno letenje

Horizontalno gibanje drona predstavlja složeniji izazov u usporedbi s lebdenjem ili vertikalnim uspinjanjem zbog više faktora, uključujući aerodinamički otpor, nagib drona i promjene u potisku propelera. Dron se pomiče naprijed tako što se nagnje prema naprijed pod određenim kutom α . Time se generira horizontalna komponenta potiska koja omogućava kretanje prema naprijed. Nagib drona također uzrokuje smanjenje vertikalne komponente potiska, što znači da se propeleri moraju brže okretati kako bi održali visinu. Kako bi dron krenuo prema naprijed stražnji motori povećaju okretaje dok prednji smanje, što veća sila u stražnjem dijelu drona znači da će se nagnuti prema naprijed. Primjer sila je prikazan na slici 13.

Veza između nagiba i horizontalne brzine:

$$\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_p \cdot v^2 = m \cdot g \cdot \tan \alpha, \quad (8)$$

gdje je:

- C_d - koeficijenti otpora. -
- α - kut nagiba drona, rad
- v – brzina gibanja, m/s.

Vertikalna komponenta sile potiska:

$$F_{vp} = F \cdot \cos \alpha. \quad (9)$$

Horizontalna komponenta sile potiska:

$$F_{hp} = F \cdot \sin \alpha. \quad (10)$$



Slika 12. Sile pri horizontalnom letu [26]

Potrebna snaga za horizontalno gibanje:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \frac{(v_s + v \cdot \sin \alpha)}{\cos \alpha}, \quad (11)$$

$$v_s^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot n \cdot A_p \cdot \cos \alpha} + v^2 (\sin \alpha)^2. \quad (12)$$

3.2 Osnovni principi leta drona DJI AGRAS T25

DJI AGRAS T25 je napredni poljoprivredni dron dizajniran za efikasno prskanje i raspršivanje na poljoprivrednim površinama. Razumijevanje njegovih letnih karakteristika, uključujući lebdenje, uspinjanje i horizontalno gibanje, ključno je za optimalnu upotrebu. Ovaj dron je uzet kao primjer. [27]

- Masa drona:
 - S baterijom: 32 kg
 - Maksimalna uzletna masa za prskanje: 52 kg
- Broj rotora: 4
- Baterija
 - Kapaciteta: 15,5 Ah
 - Napona: 52,2 V
- Površina propelera rotora, za promjer od 1,27 m, $A_p \approx 1,27 \text{ m}^2$.
- Maksimalna vertikalna brzina leta, $v_v = 3 \text{ m/s}$.
- Maksimalna horizontalna brzina leta, $v_h = 10 \text{ m/s}$.
- Širina i visina: 2585×780 mm

3.2.1 Lebdenje

Lebdenje drona sa punim spremnikom za prskanje.

Uvrštavanjem podataka u formulu (1) slijedi:

$$F_p = 52 \cdot 9,81 \approx 510 \text{ N.} \quad (13)$$

Motori moraju proizvesti potisak od približno 510 N kako bi dron lebdio.

Minimalna snaga potrebna za lebdenje:

$$P = \sqrt{\frac{(52 \cdot 9,81)^3}{2 \cdot 4 \cdot 1,225 \cdot 1,27}} \approx 3266 \text{ W.} \quad (14)$$

3.2.2 Vertikalno letenje

Dron mora generirati dodatni potisak kako bi nadvladao svoju težinu i postigao željenu brzinu uspinjanja.

Uvrštavanje formule (5) u (4) slijedi:

$$\frac{1}{2} \cdot n \cdot \rho \cdot A_P \cdot (v_s + v) \cdot (v_s - v) = m \cdot g, \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 1,225 \cdot 1,27 \cdot (v_s + 3) \cdot (v_s - 3) = 52 \cdot 9,81, \quad (16)$$

$$v_s \approx 13 \frac{m}{s}, \quad (17)$$

Uvrštavanje brzine v_s u formulu (7) slijedi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 52 \cdot 9,81 \cdot 13 + \frac{3}{2} \cdot 52 \cdot 9,81 \cdot 3 \approx 5611 \text{ W}. \quad (18)$$

Potrebno je 5611W kako bi dron letio vertikalnom brzinom od 3 m/s.

3.2.3 Horizontalno letenje

Dron se kreće brzinom od 10 m/s tako što se nagnje prema naprijed pod kutom od 20 stupnjeva. Nagib inače nije konstantan pri letenju on ovisi o puno drugih stvar poput brzini drona, brzini vjetra, smjeru puhanja vjetra, visini i težini drona. U ovom primjeru nagib je uzet kao konstantan kut zbog jednostavnijeg prikaza leta.

Uvrštavanje kuta u formulu (9) i (10) određuju se vertikalna i horizontalna komponenta sile potiska.

$$F_{vp} = F \cdot \cos 20^\circ \approx 0,94 F, \quad (19)$$

$$0,94 F = m \cdot g, \quad (20)$$

$$F \approx 542 \text{ N}, \quad (21)$$

$$F_{vp} \approx 510 \text{ N}, \quad (22)$$

$$F_{hp} = F \cdot \sin 20^\circ = 0,34 F, \quad (23)$$

$$F_{hp} = 186 \text{ N}, \quad (24)$$

$$v_s^2 = \frac{2 \cdot 52 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 4 \cdot 1,27 \cdot \cos 20^\circ} + 10^2 \cdot (\sin 20^\circ)^2, \quad (25)$$

$$v_s \approx 13,6 \frac{m}{s}, \quad (26)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 52 \cdot 9,81 \cdot \frac{(13,6 + 10 \cdot \sin 20^\circ)}{\cos 20^\circ} \approx 4620 \text{ W.} \quad (27)$$

Pomoću snage i kapaciteta baterije može se izračunati vrijeme trajanja leta.

Formula za energiju baterije u *Wh*:

$$E = V \cdot C, \quad (28)$$

$$E = 52,22 \cdot 15,5 \approx 810 \text{ Wh.} \quad (29)$$

Formula za vrijeme leta:

$$t = \frac{E}{P}, \quad (30)$$

$$t = \frac{810}{5150} \approx 0,18, \quad (31)$$

$$t = 0,18 \cdot 60 \approx 11 \text{ min.} \quad (32)$$

Pri nagibu od 20 stupnjeva i maksimalnoj brzini, dron zahtijeva 4620 W snage za održavanje horizontalnog leta. U tim uvjetima, približno vrijeme leta iznosi 11 minuta.

Međutim, u stvarnim situacijama, vrijeme leta obično je duže. Tijekom misije, dron rijetko leti konstantnom brzinom, a njegova masa se smanjuje kako troši teret koji nosi – primjerice, pri prskanju. Zbog toga se s vremenom smanjuje i potrebna snaga za let, što omogućuje duže trajanje leta. U prosjeku trajanje leta je između 10 – 25 minuta.

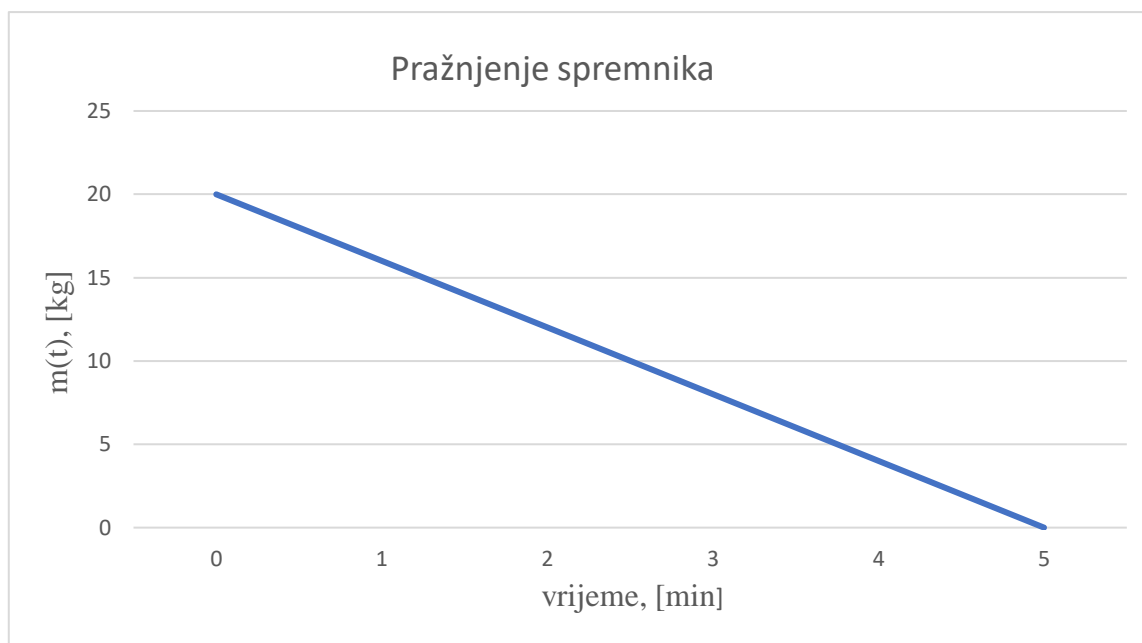
3.2.4 Prikaz snage ovisno o masi

Za prskanje maksimalan teret koji ovaj dron može podignut je 20 kg. Tijekom prskanja dron koristi posebne mlaznice koje su u mogućnosti ispustiti 16 L/min. U ovom primjeru mlaznice ispuštaju 4 L/min, tj. 4 kg/min. Na slici 14 prikazano je mijenjanje mase o vremenu.

$$m(t) = m_0 - m_s(t). \quad (33)$$

Gdje je:

- $m_s(t)$ – masa u kg/min
- m_0 – početna masa
- $m_s(t)$ - masa ovisna o vremenu



Slika 13. Prikaz pražnjenja spremnika pri horizontalno letenje

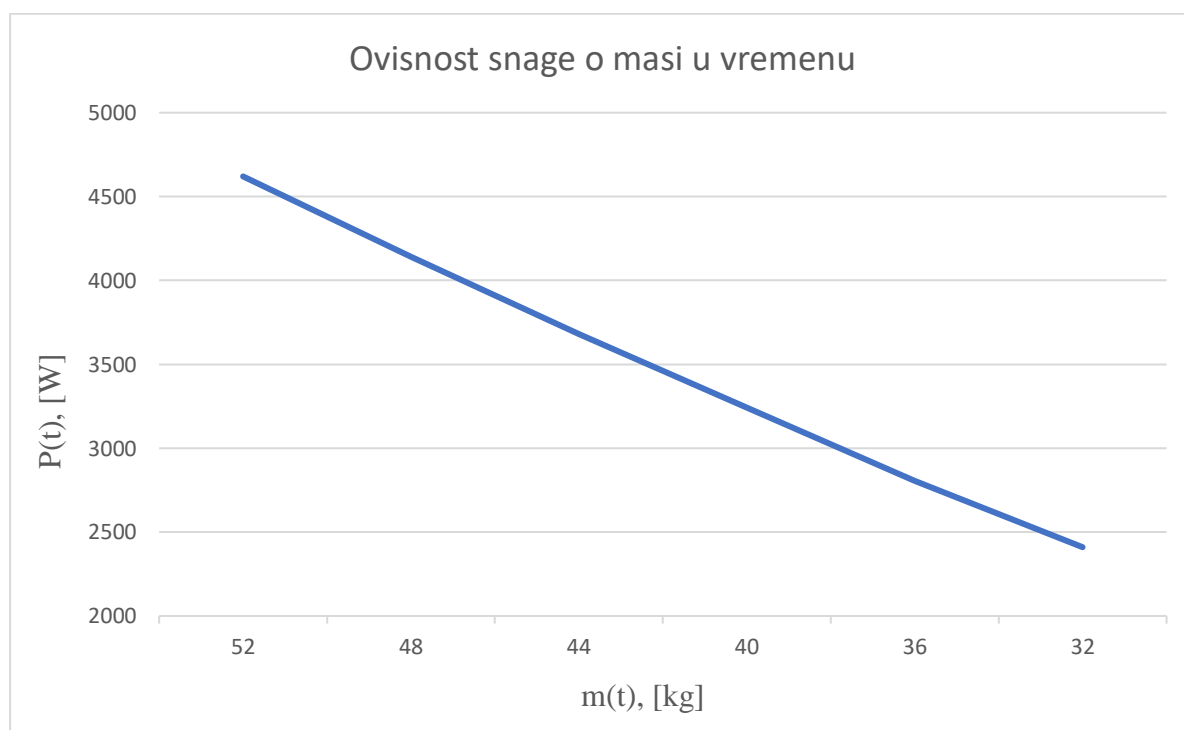
Koristeći formule prikazati će se snaga ovisna o masi.

$$P = \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot g \cdot \frac{(v_s + v \cdot \sin \alpha)}{\cos \alpha}, \quad (34)$$

$$v_s^2 = \frac{2 \cdot m(t) \cdot g}{\rho \cdot n \cdot A_p \cdot \cos \alpha} + v^2 (\sin \alpha)^2. \quad (35)$$

Tablica 4. Prikaz rezultata

Vrijeme [min]	0	1	2	3	4	5
Masa [kg]	52	48	44	40	36	32
v_s – brzina zraka ispod rotora [m/s]	13,6	13,1	12,6	12,1	11,5	11
Snaga [W]	4620	4140	3680	3240	2805	2410



Slika 14. Prikaz ovisnosti snage o masu u vremenu

Dron je nakon 5 minuta potrošio sve što je imao u spremniku. Na slici 15 pokazano je kako se snaga mijenja ovisno o gubitku mase. Prosječna potrebna snaga za ovakav tip misije je 3400 W. Nakon tih 5 minuta dron će se vratiti od kud je krenuo da se spremnik napuni još jednom.

$$v = \frac{s}{t}, \quad (36)$$

$$s = v \cdot t = 10 \cdot (5 \cdot 60) = 3000 \text{ m.} \quad (37)$$

U tih 5 minuta pražnjenja spremnika dron će preletjeti 3000 m, isti taj put mora prijeći kako bih se vratio od kud je krenuo. Pri vraćanju na početnu točku dronu je potrebno 2410 W. Prosjek radijusa prskanja dron je 5 metara, pretpostavljajući najjednostavnije jednoliko pravocrtno gibanje tj. gibanje uz konstantnu brzinu od 10 m/s.

Energija potrebna za prskanje i vraćanje:

$$E_1 = P_p \cdot t = 3400 \cdot \frac{1}{12} \approx 280 \text{ Wh,} \quad (38)$$

$$E_2 = P_v \cdot t = 2410 \cdot \frac{1}{12} \approx 200 \text{ Wh.} \quad (39)$$

Dron ima dovoljno energije u bateriji da prijeđe još određeni dio.

Energija potrebna za prskanje i vraćanje:

$$E_3 = P_p \cdot t = 3400 \cdot \frac{1}{18} \approx 190 \text{ Wh,} \quad (40)$$

$$E_2 = P_v \cdot t = 2410 \cdot \frac{1}{18} \approx 130 \text{ Wh.} \quad (41)$$

Ukupna potrošena energija tijekom ovog leta:

$$E_{uk} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 800 \text{ Wh.} \quad (42)$$

Ukupna energija baterije je:

$$E_{bat} = 810 \text{ Wh.} \quad (43)$$

Tijekom ove misije dron je ispuštao 32 L pesticida, obradio je 25000 m² i letio je 16 minuta.

Ovakva pretpostavka misije je idealna, u stvarnosti ima izrazito puno varijabli koje utječu na misiju drona, variranje brzine leta, smetnje vjetrova, vanjska temperatura, putanja kretanja i mnogih drugih.

4 ZAKLJUČAK

Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi donosi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode upravljanja poljoprivrednim površinama. Kroz pregled različitih vrsta dronova, njihovih pogonskih sustava i specifičnih primjena, pokazano je da ovi su oni omogućuju povećanje efikasnosti, smanjenje troškova i optimizaciju korištenja resursa kao što su voda, gnojiva i pesticidi. Dronovi omogućuju precizno mapiranje terena, praćenje zdravlja usjeva u stvarnom vremenu te pravovremenu detekciju bolesti i štetnika, što rezultira povećanjem prinosa i održivošću poljoprivredne proizvodnje. Posebno su korisni u stočarstvu, gdje omogućuju nadzor i prebrojavanje stoke u teško dostupnim područjima.

Analizom različitih vrsta dronova, od multi-rotora do hibridnih letjelica, zaključeno je da odabir optimalnog tipa ovisi o specifičnim potrebama poljoprivrednika poput veličini poljoprivredne površine i novčane mogućnosti. Također, razmatranje različitih pogonskih sustava pokazalo je da se električni dronovi ističu ekološkom prihvatljivošću, dok dronovi pogonjeni motorom na unutarnje izgaranje modeli nude bolju autonomiju i nosivost, hibridni su još uvijek u razvoju što ih čini kompleksnijima i skupljima.

Proračun leta drona DJI AGRAS T25 demonstrirao je važnu energetska učinkovitost ovog tipa letjelice. Analiza potrošnje energije i trajanja leta pokazala je na važnost optimizacije težine i načina upravljanja kako bi se postigla maksimalna učinkovitost.

U budućnosti se očekuje daljnji razvoj tehnologije dronova u poljoprivredi, uključujući poboljšanja u autonomiji, umjetnoj inteligenciji za analizu podataka te integraciji s preciznim sustavima navodnjavanja i gnojidbe. Kontinuirani razvoj regulative i prilagodba zakonskih okvira također će igrati važnu ulogu u širenju upotrebe ovih tehnologija.

Konačno, rezultati ovog rada potvrđuju da bespilotne letjelice predstavljaju ključnu ulogu poljoprivredi, s velikim potencijalom za daljnje unaprjeđenje produktivnosti i lakše održivosti poljoprivrednih sustava.

5 LITERATURA

- [1] Ilić, Slaviša; Spalević, Žaklina; Ilić, Miloš. Dronovi u poljoprivredi – IT podrška, zakonske regulative i prednosti upotrebe. In: Singidunum University; 2019, pp. 394–400. doi: 10.15308/sinteza-2019-394-400.
- [2] Digital Agro - Precizna poljoprivreda. [Online]. Available at: <https://digitalagro.eu/revolucija-poljoprivrede-precizna-poljoprivreda/>. Accessed: February 17, 2025
- [3] Crneković, Milan; Juraj, Josip. AUTOMATSKO VOĐENJE TRAKTORA, STROJEVA I UREĐAJA U SUSTAVU GIS-PRECIZNA POLJOPRIVREDA. [Online]. Available at: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:484951>.
- [4] What is a multispectral camera and how does it work?. [Online]. Available at: <https://umilesgroup.com/en/what-is-a-multispectral-camera-and-how-does-it-work/>. Accessed: February 18, 2025
- [5] agroklub. Što su vegetacijski indeksi, koji su i čemu služe?. [Online]. Available at: <https://www.agroklub.com/poljoprivredne-vijesti/sto-su-vegetacijski-indeksi-koji-su-i-cemu-sluze/76027/>. Accessed: February 18, 2025
- [6] Darija LEMIĆ, Roman RADANOVIĆ, Matej OREŠKOVIĆ, Matej GENDA, Krešo KAPOR, Helena VIRIĆ GAŠPARIĆ. Glasilo biljne zaštite 4/2021. [Online]. Available at: <https://files.precisionag.com>.
- [7] Grubešić, Marijan; Pernar, Renata; Nosek, Helena; Tomljanović, Kristijan. Mogućnosti primjene lakih bespilotnih letjelica u prebrojavanju krupne divljači. Šumarski list. 2018;142(11–12), pp. 621–626. doi: 10.31298/sl.142.11-12.6.
- [8] Vojvodić, Milorad ;.; Skendžić, Sandra ;.; Lemić, Darija. Mogućnost uporabe multispektralnih kamera u poljoprivredi. [Online]. Available at: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:804618>.
- [9] Guebsi, Ridha; Mami, Sonia; Chokmani, Karem. Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges. Drones. 2024;8(11), doi: 10.3390/drones8110686.
- [10] Elmeseiry, Nourhan; Alshaer, Nancy; Ismail, Tawfik. A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (Uavs) with potential applications. Aerospace. 2021;8(12), doi: 10.3390/aerospace8120363.
- [11] AUAV. Drone Types: Multi-Rotor vs Fixed-Wing vs Single Rotor vs Hybrid VTOL. [Online]. Available at: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/#:~:text=A%20fixed-wing%20drone%20has,This%20makes%20them%20energy-efficient>. Accessed: February 16, 2025

- [12] Drone Ag. DJI Agras: Automated Crop Spraying Drone. [Online]. Available at: <https://droneag.farm/solutions/dji-agras-spraying-drone/>. Accessed: February 16, 2025
- [13] RAD Vedran Krevh Zagreb, Diplomski. PRIMJENA BESPILOTNIH LETJELICA U POLJOPRIVREDI.
- [14] Drone Watch EU. senseFly Launches eBee Ag Fixed-Wing Mapping Drone for Agriculture. [Online]. Available at: <https://www.dronewatch.eu/sensefly-launches-ebec-ag-fixed-wing-mapping-drone-for-agriculture/>. Accessed: February 16, 2025
- [15] Ohioline. Drones for Spraying Pesticides—Opportunities and Challenges. [Online]. Available at: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-540>. Accessed: February 16, 2025
- [16] Global Tech Insight To Drive Agribusiness. Applying Pix in Cotton with Quantix Mapper Drone and Pix4Dfields. in press [Online]. Available at: <https://www.globalagtechinitiative.com/in-field-technologies/drones-uavs/applying-pix-in-cotton-with-quantix-mapper-drone-and-pix4dfields/>. Accessed: February 16, 2025
- [17] Zhang, Bowen; Song, Zaixin; Zhao, Fei; Liu, Chunhua. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*. 2022;15(2), doi: 10.3390/en15020455.
- [18] Shearwater Aerospace. 6 Energy Sources Powering Today’s Commercial Drones. in press [Online]. Available at: <https://www.shearwater.ai/post/6-energy-sources>. Accessed: February 16, 2025
- [19] DRONEHRP. DJI Phantom 4 Multispectral. in press [Online]. Available at: <https://drone.hrpeurope.com/drone/dji-phantom-4-multispectral/>. Accessed: February 16, 2025
- [20] FLYABILITY. Gas Powered Drone: A Guide. in press [Online]. Available at: <https://www.flyability.com/blog/gas-powered-drone>. Accessed: February 16, 2025
- [21] JOUAV Unmanned Aircraft System. Gas Powered Drone: A Quick Start Guide. [Online]. Available at: <https://www.jouav.com/blog/gas-powered-drone.html>. Accessed: February 16, 2025
- [22] Harris Aerial. Carrier H6 Hybrid EFI. [Online]. Available at: <https://harrisaerial.com/carrier-drones/carrier-h6-hybrid/>. Accessed: February 16, 2025
- [23] Direct Industry. PV UAV SB4 PHOENIX Series. [Online]. Available at: <https://www.directindustry.com/prod/sunbirds/product-183566-1855951.html>. Accessed: February 16, 2025
- [24] Reid, John S. Drone flight-what does basic physics say?.
- [25] Shenzhen Grepow Battery Co., Ltd. How To Choose The Right Motors And Propeller For Different Drone Applications?. in press [Online]. Available at:

<https://www.grepow.com/blog/how-to-choose-right-motors-and-propeller-for-different-drone-applications.html>. Accessed: February 16, 2025

[26] STEM LEARNING: Advanced Air Mobility: The Science Behind Quadcopters Reader-Student Guide. [Online]. Available at: www.nasa.gov.

[27] DJI AGRICULTURE. DJI AGRAS T25. [Online]. Available at: <https://ag.dji.com/t25/specs>. Accessed: February 16, 2025