

Eksploatacijske i tehničke značajke mlaznih motora za bespilotne zrakoplove

Peraić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:806198>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Josip Peraić

EKSPLOATACIJSKE I TEHNIČKE ZNAČAJKE MLAZNIH MOTORA
ZA BESPILOTNE ZRAKOPLOVE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**Eksploatacijske i tehničke značajke mlaznih motora za
bespilotne zrakoplove**

**Operation and Technical Characteristics of Jet Engines for
Unmanned Aircraft**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Josip Peraić
JMBAG: 0135227489

Zagreb, kolovoz 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 28. kolovoza 2024.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Zrakoplovna prijevozna sredstva**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7567

Pristupnik: **Josip Peraić (0135227489)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Eksplatacije i tehničke značajke mlaznih motora za bespilotne zrakoplove**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati upotrebu i klasifikaciju bespilotnih zrakoplova, kao sustava koji se sve intenzivnije koriste u vojne i civilne svrhe. U uvodnom dijelu rada potrebno je prikazati vrste pogonskih sustava i njihov princip rada te zadatke i misije bespilotnih zrakoplova sa mlaznim pogonom. U nastavku rada potrebno je analizirati eksploatacijske i tehničke značajke mlaznih motora pogodnih za bespilotne zrakoplove i provesti proračun performansi mlaznih motora za izabranu misiju leta. Potrebno je definirati matematički model motora te analizirati performanse motora bespilotnog zrakoplova. Na kraju je potrebno zaključiti o prednostima i nedostacima upotrebe mlaznih motora za bespilotne zrakoplove.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Sažetak

U ovom diplomskom radu analizirana je upotreba i klasifikacija bespilotnih zrakoplova, kao sustava koja se sve intenzivnije koriste u vojne i civilne svrhe. Navedene su vrste pogonskih sustava i njihov princip rada te zadaci i misije bespilotnih zrakoplova sa mlaznim pogonom. Analizirane su eksploatacijske i tehničke značajke mlaznih motora za bespilotne zrakoplove i izračunate njihove performanse za izabranu misiju. Definiran je matematički model motora te su analizirane performanse motora bespilotnog zrakoplova.

Ključne riječi: bespilotni zrakoplov, mlazni motor, turbo-elisni motor, performanse motora

Summary

In this thesis, the use and classification of unmanned aerial vehicles is analyzed, as systems that are increasingly used for military and civilian purposes. The types of propulsion systems and their operating principles, as well as the tasks and missions of jet-powered unmanned aircraft are listed. The operational and technical features of jet engines for unmanned aircraft were analyzed and their performance was calculated for the chosen mission. A mathematical model of the engine was defined and the performance of the engine of the unmanned aerial vehicles was analyzed.

Key words: unmanned aerial vehicles, jet engine, turboprop engine, engine performance

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Korištenje i klasifikacija sustava bespilotnih zrakoplova	2
2.1. Povijesni razvoj bespilotnih zrakoplova.....	4
2.2. Terminologija bespilotnih sustava	8
2.3. Kategorizacija bespilotnih zrakoplova i sustava	10
2.3.1. Klasifikacije bespilotnih zrakoplova prema veličini	11
2.3.2. Klasifikacija bespilotnih zrakoplova prema dometu i izdržljivosti	12
2.4. Kategorije bespilotnih zrakoplova prema namjeni.....	16
2.4.1. Tehnološki inducirani za civilnu primjenu	16
2.4.2. Primjene inducirane aplikacije pomoću platformi	17
2.4.3. Primjene aplikacije inducirane uslugom.....	17
3. Pogonski sustavi bespilotnih zrakoplova.....	18
3.1 Pogonski sustavi na fosilna goriva	18
3.1.1. Klipni motori	19
3.1.2. Mlazni motori	21
3.1.3. Nabojno mlazni motori.....	23
3.2. Hibridni pogonski sustavi	24
3.3. Električni pogonski sustavi.....	25
4. Zadatci i misije bespilotnih zrakoplova s mlaznim pogonskim sustavom.....	27
4.1. Vojna namjena.....	27
4.2. Civilna namjena	28
5. Analiza eksploatacijskih i tehničkih značajki mlaznih motora za bespilotne zrakoplove	31
6. Određivanje performansi mlaznih motora za izabranu misiju bespilotnih zrakoplova ...	35
6.1 Matematički model	40
6.2 Analiza performansi u izvanprojektnim režimima rada	42
6.2.1 Utjecaj parametara eksploatacije na performanse motora pri krajnjem položaju poluge snage	42
6.2.2 Utjecaj parametara eksploatacije na performanse motora pri različitim položajima poluge snage u režimu krstarenja	45

Zaključak	48
Literatura	49
Popis slika.....	51
Popis tablica	51
Popis oznaka	52

1. Uvod

Bespilotni zrakoplov predstavlja tip letjelice kojom se može upravljati daljinskim upravljanjem ili autonomno, bez prisutnosti pilota u zrakoplovu. Bespilotni zrakoplovi se sastoje od tri glavne komponente: letjelica, upravljačka stanica i veza za prijenos podataka između upravljačke stanice i letjelice. Letjelice mogu biti različitih veličina i oblika, a upravljanje se vrši s pomoću daljinskog upravljača ili preko unaprijed programirane putanje leta. Takve letjelice obično su opremljene senzorima, kamerama i drugim uređajima koji omogućuju prikupljanje podataka iz zraka ili obavljanje određenih zadaća.

Bespilotni zrakoplovi se koriste u mnogim industrijama i sektorima zbog svoje sposobnosti za brzu i učinkovitu primjenu u situacijama kada ljudski piloti ne bi mogli obavljati iste zadatke. Također, bespilotni zrakoplovi se koriste u širokom spektru područja, uključujući vojne operacije, inspekciju infrastrukture, snimanje filmova i videa, dostavu i druge aplikacije.

U ovom diplomskom radu predstaviti će se uporaba i klasifikacija bespilotnih sustava, pogonskih sustava bespilotnih zrakoplova, kao i zadatci i misije bespilotnih zrakoplova s mlaznim pogonskim sustavima i izračun performansi bespilotnih zrakoplova s mlaznim motorom za izabranu misiju.

Na temelju svega navedenog, objekt rada su upravo bespilotni zrakoplovi, a cilj rada je sustavno prikazati značaj i upotrebu istih, njihov sastav i široku primjenu u različitim područjima. Kroz metode prikupljanja, analizu, obradu i interpretaciju dosadašnjih istraživanja iznosi se specifičnost i značaj bespilotnih zrakoplova.

Rad je strukturiran u šest poglavlja. Nakon uvoda, u drugom poglavlju opisan je povijesni razvoj bespilotnih zrakoplova te objašnjena terminologija. Nadalje, u istom poglavlju, kategorizirani su bespilotni zrakoplovi prema veličini, dometu i prema njihovoj namjeni. Pogonski sustavi bespilotnih zrakoplova opisani su u trećem poglavlju. U četvrtom poglavlju su objašnjeni zadaci i misije bespilotnih zrakoplova s mlaznim pogonskim sustavom u civilnoj i vojnoj namjeni. U petom poglavlju su analizirane eksploatacijske i tehničke značajke nekoliko mlaznih motora za bespilotne zrakoplove, te je turbo-elisni motor PT6A-135A izabran za proračun izvanprojektnih režima rada motora u šestom poglavlju. Također, u šestom poglavlju je dan matematički model korišten u proračunu te su prikazani dijagrami. Na kraju rada dana su zaključna razmišljanja o temi.

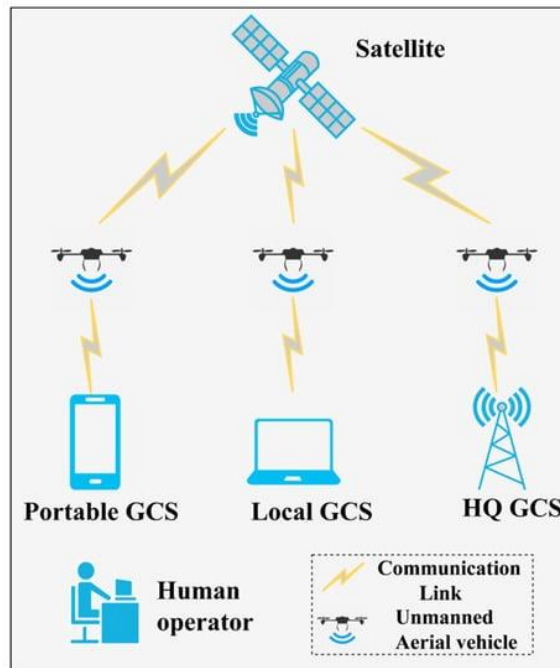
2. Korištenje i klasifikacija sustava bespilotnih zrakoplova

Bespilotni zrakoplovi su dio zračnih snaga skoro svake zemlje koja posjeduje ratno zrakoplovstvo. Prema zakonu Sjedinjenih Američkih Država bespilotni zrakoplov je definiran kao zrakoplov kojim se upravlja bez mogućnosti izravne ljudske intervencije iznutra ili na zrakoplovu [1]. Također, prema Zakonu o zračnom prometu Republike Hrvatske, bespilotni zrakoplov je zrakoplov namijenjen izvođenju leta bez pilota, a koji je daljinski upravljani ili programiran i autonoman [2].

Bespilotni zrakoplov je stoga svaka letjelica koja radi ili je projektirana da radi samostalno ili da se s njome upravlja na daljinu bez pilota u zrakoplovu [3]. Ovaj tip letjelice može se definirati i kao leteći robot kojim se može daljinski upravljati te koji može letjeti autonomno koristeći softverski kontrolirane planove leta u okviru svojih ugrađenih sustava, koji rade zajedno s ugrađenim sensorima i globalnim sustavom za pozicioniranje (*Global Positioning System, GPS*).

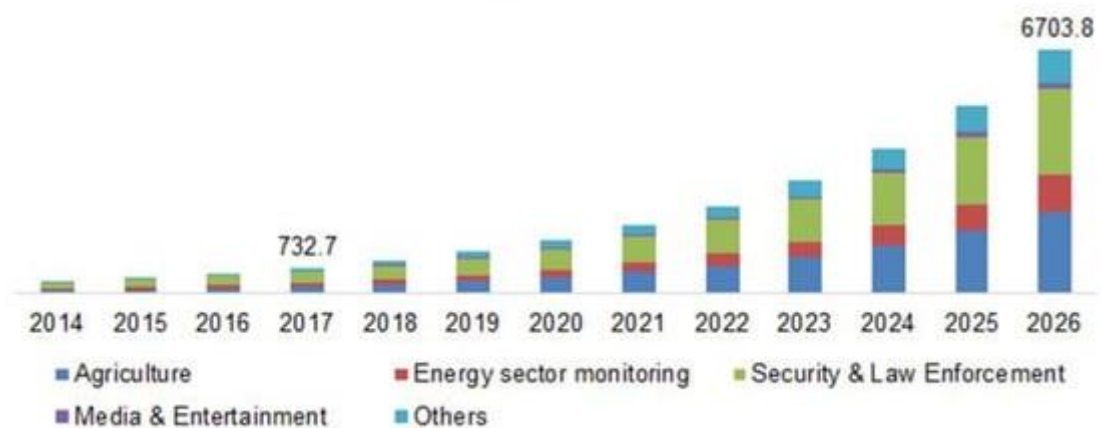
U posljednjih nekoliko godina unutar kojih dominira napredak bespilotnih zrakoplova kao i njihovo učinkovito djelovanje bespilotne letjelice zauzimaju značajno mjesto u vojnim operacijama. Te letjelice su izvorno i razvijane kroz dvadeseto stoljeće za vojne misije koje su bile previše "prljave ili opasne" za ljude, a do dvadeset prvog stoljeća su postale osnovna sredstva unutar vojne tehnološke opreme. Kako su se tehnologije upravljanja poboljšavale, a troškovi smanjivali, njihova se uporaba proširila na mnoge nevojne primjene.

Bespilotni zrakoplovi se odnose na kontrolirane letjelice bez pilota. Može se autonomno kontrolirati i njima se upravljati putem senzora, mikroprocesora i drugih elektroničkih naprava [4]. Slika broj 1. prikazuje tipičnu arhitekturu sustava bespilotnih zrakoplova, pokazujući kako bespilotni zrakoplovi komuniciraju sa satelitima, zemaljskim sustavima kontrole, pametnim telefonima i računalima putem komunikacijskih veza. U ovom slučaju ljudski operater koristi se daljinskim upravljanjem i rukovođenjem bespilotnim zrakoplovima. Također, bespilotni zrakoplovi mogu obavljati autonomne zadatke u situacijama kada je ljudska intervencija teška ili opasna [5].



Slika 1. Arhitektura UAV sustava [5].

Osim specifičnih područja primjene bespilotnih letjelica dolazi do značajnog porast istih na civilnom tržištu bespilotnih zrakoplova. Njihove ključne primjene uključuju operacije na daljinu kao što su potraga i spašavanje, praćenje katastrofa, praćenje okoliša i dostava zračne pošte, medicinskih predmeta i paketa. Što nam prikazuje slika 2. na temelju koje se može uočiti izniman porast prihoda SAD-a vezanih za komercijalno tržište bespilotnih zrakoplova u različitim sektorima.



Slika 2. Tržište komercijalnih UAV-a Sjeverne Amerike [6].

Zahvaljujući širokoj primjeni i području korištenja bespilotni zrakoplovi su dostupni s različitim specifikacijama, opremom, veličinama, rasponom i oblicima. Na tržištu su prisutni s različitim brojem rotora ili propelera. Naime, danas su bespilotni zrakoplovi razvijeni s

različitim motorima i strukturama krila i mogu komunicirati koristeći bežične tehnologije kratkog i dugog dometa, a njihove veličine mogu se klasificirati kao nano, mikro ili velike. Oni posjeduju izvrsne mogućnosti za pružanje mobilne povezanosti zbog kontinuiranog i razvojnog napretka.

Unatoč sve većoj pozornosti i razvoju umjetne inteligencije (*Artificial Intelligence, AI*) tehnologije, uglavnom se bespilotnim zrakoplovima upravlja s pomoću daljinskih upravljača s kojim upravljaju ljudi. Karakteristike, konfiguracije i mehanizmi bespilotnih zrakoplova razlikuju se ovisno o primjeni, brzini, težini i radu. Iako su značajke autopilota integrirane u postojeće letjelice, one se i dalje suočavaju s izazovima poput ograničenog trajanja baterije, ograničene autonomije, točnosti slijetanja, ograničenog vremena misije i udaljenosti.

2.1. Povijesni razvoj bespilotnih zrakoplova

Bespilotni zrakoplovi su se povezivali s vojskom i njihov razvoj je snažno bio motiviran vojnim primjenama. Zahvaljujući napretku i jednostavnosti primjene (daljinsko upravljanje) koriste se za vježbe protuzračnog ciljanja, prikupljanju obavještajnih podataka i kao platforme za nošenje oružja.

Od samog početka ratnih sukoba u ljudskoj povijesti, vojni zapovjednici žele znati veličinu, snagu i raspored neprijatelja s kojim se moraju suočiti prije samog sukoba. Kako bi stekli takvo znanje, koristili su različite jednostavne, ali dovoljno učinkovite metode. Najčešće su slali vojnike na uzvišenja ili sagrađene tornjeve, iz kojih su promatrali bojište.

Razvojem prvih letjelica omogućeno je izviđanje iz zraka. Izviđanje iz balona obilježilo je Prvi svjetski rat. Baloni su bili opremljeni opremom za izviđanje, te su bili postavljeni na visini od nekoliko stotina metara u neposrednoj blizini linije koja razdvaja zaraćene strane. Njihov zadatak bio je pratiti kretanje neprijateljskih postrojbi, broj i opremu neprijatelja, povlačenje novih snaga i resursa, i sve ostalo što bi moglo pružiti dovoljnu obavještajnu potporu ratnim stratezima. Padobranom bi se u potrebu nužde brzo napustilo balone u slučaju mogućeg neprijateljskog rušenja [7].



Slika 3. Prikaz Britanskog izvidničkog balona iz vremena Prvog svjetskoga rata [8].

Ovi načini tada su bili dovoljno učinkoviti, budući da tadašnja ratna doktrina nije predviđala dovoljno brzo raspoređivanje postrojbi koje bi omogućile veća iznenađenja. Vremenom je obavještajno prikupljanje informacija o neprijatelju postalo jedan od najvažnijih elemenata potpore u donošenju vojnih odluka i strategija te doktrini rata, bez obzira je li ratni sukob u tijeku ili ne. Razvojem vojne tehnologije i novim, bržim, načinom ratovanja, izvidničke jedinice su dobile na važnosti te su bile primorane razvijati se [7].

Zračne snage su oduvijek nastojale pratiti te zahtjeve i bile su najučinkovitiji i najfleksibilniji obavještajni sustav. Podaci o izviđanju iz zraka bili su najpouzdaniji i najizravniji izvor informacija. S obzirom na to, razumljivo je da su zadatci izviđanja iz zraka smatrani borbenim zadacima i da su imali visok stupanj prioriteta u planiranju zrakoplovnih operacija. Zrakoplovne platforme za izviđanje iz zraka nisu uvijek bile usko specijalizirane za ovu vrstu zadatka svojom namjenom i konstrukcijom. U ranim danima zrakoplovnih operacija, piloti su vizualno pregledavali teren leteći na planiranim borbenim zadaćama u potpuno naoružanim avionima.

U Drugom svjetskom ratu pojavili su se namjenski izviđački zrakoplovi, opremljeni raznim optičkim sustavima i kamerama. Ti zrakoplovi su još uvijek bili samo prilagođene verzije borbenih, napadnih ili transportnih aviona koji su bili u uporabi u to vrijeme. U-2 američki izviđački zrakoplov pravi je predstavnik specijalizirane zrakoplovne platforme. Takvi zrakoplovi lete na visini većoj od 20 000 metara i imaju iznimno skupe sustave izviđanja stoga nisu optimalno rješenje za bilo koju vojnu silu. Moguće je pronaći jednostavnija rješenja, među

kojima je najpopularnija uspostava izviđačke eskadrile. Takva bi eskadrila bila opremljena nizom konvencionalnih, najčešće napadnih aviona opremljenih kapsulama sa podvjesnim sustavima izviđanja, koji se postavljaju na podvjesnim točkama zrakoplova. Takvi zrakoplovi mogu obavljati i borbene i izvidničke misije ovisno o potrebama.

Izviđački zrakoplovi izloženi su stalnom i visokom riziku od neprijateljske vatre. Budući da su zadaće prikupljanja obavještajnih podataka kontinuirani proces, podatci se prikupljaju ne samo u ratu nego i u miru. Osim toga, sustavi izviđanja ugrađeni u zrakoplove zamijenili su oružje i sustave samozaštite te su stoga osjetljiviji ako se otkriju.

Nakon Drugog svjetskog rata neke su države tražile letjelice koje imaju sposobnost nadzora, izviđanja i prodora u neprijateljskog terena bez raspoređivanja vlastitih snaga u visokorizična područja. Tehnički zahtjevi su bili definirani autonomnim slijetanjem, letenjem i slijetanjem.

Kao rezultat toga, s vremenom su se razvile vrlo specifične i konstruktivno vrlo jednostavne verzije bespilotnih zrakoplova koji su se pojavili u Vijetnamskom ratu. Njihova primarna svrha bila je aerofoto izviđanje iza neprijateljskih pozicija. Njihove najvažnije prednosti u odnosu na zrakoplove s posadom bile su odsutnost rizika od gubitka pilota.

Rute leta tih zrakoplova unaprijed su programirane i obilježeni vrlo niskom razinom autonomije. Sustavi koji se koriste za izviđanje uglavnom su uključivali zrakoplovno-fotografske kamere visoke rezolucije, a slike bi se izradile nakon što bi zrakoplov sletio. U prvim desetljećima korištenja bespilotnih zrakoplova tehnologija izrade optičkih sustava nije zabilježila značajan napredak, a u to su vrijeme bili obilježeni velikom masom koja je bila jedan od kritičnih izazova u izgradnji bespilotnih zrakoplova koji je, uz ostale zahtjeve, morao imati što manje dimenzija.



Slika 4. Bepilotni zrakoplov američke proizvodnje oznake AQM-34 [9].

Bez obzira na to kako su ti zrakoplovi bili ciljani od strane neprijatelja, bilo je iznimno zahtjevno locirati ih u relativno kratkom vremenu leta, a ako su bili uspješni, atmosferski uvjeti imali su značajan utjecaj na kvalitetu dobivenih podataka na taj način. Konvencionalni zrakoplovi u većini su slučajeva zadržali prvenstvo zbog većeg opterećenja koje su mogli izdržati i šireg raspona zadaća koje su mogli odrađivati [7].

Osim zrakoplovno-fotografskog izviđanja, konvencionalni zrakoplovi s posadom također su imali mogućnost elektroničkog izviđanja i nošenja dodatnog oružja kako bi reagirali na novopojavljene i vremenski kritične ciljeve. Zbog svega toga bespilotni zrakoplovi dugo su imali status pričuvnih sredstava za izviđanje, čija bi uporaba bila opravdana samo u slučaju iznimno visokog rizika od rušenja (najčešće izviđanje na taktičkoj razini) ili zbog druge specifičnosti zadatka.

Ipak, u zadnja dva desetljeća, bespilotni zrakoplovi postigli su izniman napredak. Razlog je u činjenici da je tehnologija izrade izviđačkih sustava te računalna i procesna snaga dosegla potrebnu razinu i omogućila razvoj bespilotnih zrakoplova koji mogu ujediniti zahtjeve za dovoljno kvalitetnim izviđanjem s jedne strane i visok stupanj autonomije s druge. Što znači da se s razvojem digitalne tehnologije omogućila ugradnja visoko rezolucijskih i relativno malih fotografskih i video uređaja.

Vrijeme potrebno za dobivanje digitalnog zapisa znatno je kraće nego što je potrebno za razvoj klasičnog filma i omogućuje prijenos u stvarnom vremenu. Važno je istaknuti da digitalna fotografija ili video prijenos uživo još uvijek nemaju razlučivost fotoosjetljivog filma, ali je mogućnost prijenosa video ili fotografskih snimaka u stvarnom vremenu ključna za postizanje bržeg uočavanja i podjele obavještajnih podataka. To je preduvjet za smanjenje vremena reakcije, što je jedan od temeljnih zahtjeva moderne doktrine ratovanja. Takve manje letjelice koji spadaju u kategoriju taktičkih letjelica sada mogu nositi veliku količinu opreme i dugo ostati u zraku.

Taj trend, koji podrazumijeva smanjenje dimenzija i težine sustava, te njihovu optimizaciju i implementaciju na ovakvim platformama, nastavlja se, a pitanje je vremena, prije potpunog uklanjanja, potrebe za većim i snažnijim konvencionalnim zrakoplovima, kakav je navedeni U-2. Iako je sposobnost ovog zrakoplova da prevozi teret veća od 2 tone u usporedbi s 860 kg tereta koji danas nosi bespilotni zrakoplov RQ-4 Global Hawk, 35 takvih zrakoplova ostaje operativno u SAD-u, Global Hawk vjerojatno će u bliskoj budućnosti preuzeti gotovo sve zadaće izviđanja iz zraka na strateškoj razini [7].

2.2. Terminologija bespilotnih sustava

Posljednjih desetljeća sustavi bespilotnih zrakoplova (*Unmanned aerial vehicle, UAV*) ili besposadnih letjelica upotrebljavaju se u svakoj vojnoj službi, od ručnih mikro-UAV preko taktičkih sustava srednje veličine do potpuno razvijenih daljinski upravljanih letjelica (*Remotely piloted aircraft, RPA*). Istovremeno, na civilnom tržištu bilježi se eksponencijalni rast pretežno manjih sustava namijenjenih javnoj i rekreacijskoj uporabi. Međutim, dosta situacija upotrebe takvih letjelica privuklo je pozornost agencija za provođenje zakona i vojski diljem svijeta zbog povećane zlouporabe komercijalnih gotovih (*Commercial Off The Shelf, COTS*) 'dronova' u blizini zračnih luka, javnih događaja i vojnih postrojenja.

Ne postoji još uvijek jasna definicija i definiranost bespilotnih zrakoplova u određenom formalnom okviru. Naime, ime koje se najčešće upotrebljava u razvoju ovih letjelica, i to najčešće u stranim stručnim publikacijama, je *Unmanned Aerial Vehicle*, što bi u prijevodu na hrvatski jezik značilo bespilotni zrakoplov. Forma tog koncepta nije tek tako nastala jer su bespilotni zrakoplovi na početku razvoja bile samo dio proširenog tehnološkog koncepta bespilotnih vozila, uključujući razvoj kopnenih i podvodnih vozila [10].

Jedan od uobičajenih izraza u stručnoj literaturi je daljinski upravljani zrakoplov RPA, kao i daljinski upravljani zrakoplovni sustav (*Remotely Piloted Aircraft System, RPAS*). To nije alternativni pojam, već pokušaj razlikovanja između bespilotnih zrakoplova u kojima pilot u svakom trenutku kontrolira zrakoplov od drugih bespilotnih sustava u kojima zrakoplov djeluje neovisno u određenim ili svim segmentima leta. Zapravo, može se reći da RPA predstavlja podskup bespilotnih zrakoplova [10].

U Republici Hrvatskoj najčešće se koristi termin „bespilotna letjelica” (BPL), odnosno kada je riječ o specijalnim vojnim zrakoplovima, a termin „izviđačka bespilotna letjelica (IBL). Čini se da to ime nije optimalno terminološko rješenje iz više razloga; prije svega, takvim zrakoplovima upravlja pilot, ne na samoj platformi već na tlu. Međutim, interakcija između pilota i zrakoplova u smislu pružanja ulaznih podataka za aerodinamične kontrolne površine i izlaznu snagu motora i potisak postoji i ne može se reći da nema pilota u kontrolnoj petlji. S druge strane, koncept zrakoplova kolokvijalniji je od profesionalnog, što se najvjerojatnije dogodilo kao pokušaj razlikovanja bespilotnih platformi od konvencionalnih platformi s posadom ili letjelica. Pojam zrakoplov nije definiran prisutnošću posade na samoj platformi i predstavlja širok okvir u odnosu na način na koji se podiže pogonska skupina platforme, što istodobno u potpunosti odgovara tehničkoj i tehnološkoj prirodi bespilotnog zrakoplova [2].

Prva formalizirana definicija ispunjena je izmjenama i dopunama Zakona o zračnom prometu, gdje se člankom 2. točkom 2a bespilotni zrakoplov (*Unmanned Aircraft, UA*) definira kao zrakoplov namijenjen izvođenju operacija bez pilota u zrakoplovu, koji je ili daljinski upravljani ili programiran ili autonoman. U istom članku Zakona, stavak 76a definira sustav bespilotnog zrakoplova (*Unmanned Aircraft System, UAS*) kao bespilotni zrakoplov s pripadajućim uređajima [2].

Posljednjih godina, posebno uzimajući u obzir trenutačni nedostatak terminologije, postupno se usvaja nova terminološka praksa. U tom pogledu najvažniju ulogu igraju regulatorne institucije poput ICAO-a, (International Civil Aviation Organization) FAA-e (Federal Aviation Administration), Eurocontrola, NATO-a (North Atlantic Treaty Organization) i drugih, a ovdje postoji određeni konsenzus između struke i akademske zajednice i prihvaćen je termin bespilotnih zrakoplova (UAV-ova) ili sustava bespilotnih zrakoplova (UAS-ova). Pojam prihvaćanja podrazumijeva uporabu takvog pojma u znanstvenim publikacijama tih institucija. Važnost novog pojma odražava se u činjenici da se bespilotna letjelica sada smatra zrakoplovom te stoga podliježe obvezi reguliranja kriterija certifikacije, kao što je plovidbenosti, na isti način kao i konvencionalni zrakoplovi.

Najbliži hrvatski prijevod pojma *Unmanned Aircraft* je bespilotni zrakoplov (BZ) i čini se da takav izraz u potpunosti zadovoljava kriterije struke u kontekstu usvojene tehničke frazeologije. Taj će se pojam koristiti za ostatak ovog rada. Što se tiče šireg tehnološkog konteksta, koji primjenjuje načela teorije sustava, koristit će se izraz sustav bespilotnih zrakoplova.

2.3. Kategorizacija bespilotnih zrakoplova i sustava

Potrebno je naglasiti da trenutačno ne postoje standardi u pogledu kategorizacije bespilotnih zrakoplova, vojska i agencije iz obrambenih sustava imaju svoje standarde dok civilne institucije imaju svoje standarde koji se stalno razvijaju. Najčešći čimbenici preko kojih se kategoriziraju su veličina, domet i istrajnost.

Bespilotne zrakoplove po veličini dijelimo na:

- Vrlo mali BZ (*Very Small UAV*)
 - Micro ili Nano
- Male BZ (*Small UAV*)
 - Mini
- Srednje BZ (*Medium*)
- Velike BZ (*Large UAV*) [11].

Bespilotni zrakoplovi se također mogu podijeliti prema radijusu djelovanja i istrajnosti u zraku po pod klasama koje je razvila američka vojska:

- vrlo jeftini BZ bliskog dometa (*Very low cost close-range UAV*)
- BZ bliskog dometa (*Close-range UAV*)
- BZ kratkog dometa (*Short-range UAV*)
- BZ srednjeg dometa (*Mid-range UAV*)
- BZ velike izdržljivosti (*High Endurance UAV*)[11].

Prema Ministarstvu obrane Sjedinjenih Američkih Država, bespilotni zrakoplovi su podijeljeni u 5 kategorija, što se može vidjeti u tablici 1.

Tablica 1. Kategorizacija prema Ministarstvu obrane SAD-a.

Kategorija	Veličina	MGTM* (kg)	Normalna operativna visina (m)	Brzina (km/h)
Grupa 1	Mali	0 – 10	< 366 AGL**	< 185
Grupa 2	Srednji	10 – 25	< 1067	< 463
Grupa 3	Veliki	< 600	< 5.486 MSL***	< 463
Grupa 4	Veći	> 600	< 5.486 MSL	Neodređeno
Grupa 5	Najveći	> 600	> 5.486	Neodređeno

*Maximum Gross Takeoff Mass – maksimalna masa pri kojoj zrakoplov smije poletjeti
**AGL – Above Ground Level – iznad razine zemlje
***MSL – Mean Sea Level – srednja razina mora

Izvor: [11].

2.3.1. Klasifikacije bespilotnih zrakoplova prema veličini

Vrlo mali BZ (*Very small UAV*)

Klasa vrlo malih bespilotnih zrakoplova odnosi se na BZ s dimenzijama u rasponu od veličine velikih kukaca pa do 30-50 cm duljine. BZ inspiriran kukcima s lepršajućim ili rotirajućim krilima popularan su dizajn mikro letjelica. Izuzetno su male veličine, mogu se koristiti za špijuniranje jer mogu ulaziti u prostorije u koje veće letjelice ne mogu ući i ostati ne otkrivene. Odabir između lepršajućih ili rotirajućih krila stvar je željene sposobnosti manevriranja. Dizajn na bazi lepršanja krila omogućuje spuštanje i slijetanje na male površine. Primjeri vrlo malih BZ-a su izraelski IAI *Malat Mosquito* (s rasponom krila od 35 cm i izdržljivošću od 40 minuta), američki *Aurora Flight Sciences Skate* (s rasponom krila od 60 cm i duljinom od 33 cm), australski *Cyber Technology CyberQuad Mini* (s duljinom od 42 cm) [11].

Male BZ (*Small UAV*)

Klasa malih BZ-ova (koja se ponekad naziva i mini-BZ) odnosi se na UAV-ove čija je barem jedna dimenzija veća od 50 cm i ne veća od 2 metra. Mnogi dizajni u ovoj kategoriji temelje se na modelu s fiksnim krilima, a većina se ručno lansira bacanjem u zrak. Primjeri su jednometarski *RQ-11 Raven*, tvrtke *Aero Vironment* s rasponom krila od 1,4 m i RS-16 tvrtke *American Aerospace* [11].

Srednji BZ (*Medium UAV*)

Srednja klasa BZ-a odnosi se na BPL koje su preteške da ih nosi jedna osoba, ali su ipak manje od lakih letjelica. Obično imaju raspon krila od oko 5-10 m i mogu nositi nosivost od 100 do 200 kg. Primjeri srednjih bespilotnih zrakoplova s fiksnim krilima su izraelsko-američki *Hunter* i britanski *Watchkeeper*. Postoje i druge marke koje su se koristile u prošlosti, kao što su američki *Boeing Eagle Eye*, *RQ-2 Pioneer*, BAE sustavi *Skyeye R4E* i *RQ-5A Hunter* koji ima raspon krila od 10,2 m i dugačak je 6,9 m. Pri polijetanju teži oko 885 kg. RS-20 tvrtke *American Aerospace* je primjer BL-a koji obuhvaća specifikacije malog i srednjeg UAV-a [11].

Velike BZ (*Large UAV*)

Klasa velikih BZ-a odnosi se na velike bespilotne zrakoplove koje vojska uglavnom koristi za borbene operacije. Primjeri ovih velikih BZ-ova su američki *General Atomics Predator A i B* i američki *Northrop Grumman Global Hawk* [11].

2.3.2. Klasifikacija bespilotnih zrakoplova prema dometu i izdržljivosti

Vrlo jeftine BZ bliskog dometa

Ova klasa uključuje BZ koje imaju domet od 5 km, vrijeme trajanja od 20 do 45 minuta i cijenu od oko 10 000 dolara. Primjeri bespilotnih zrakoplova u ovoj klasi su *Raven* i *Dragon Eye*. BZ-ovi u ovoj klasi vrlo su bliski modelima zrakoplova [11].

BZ bliskog dometa

Ova klasa uključuje BZ-ove koji imaju domet od 50 km i vrijeme trajanja leta od 1 do 6 sati. Obično se koriste za zadaće izviđanja i motrenja. Vojska ih koristi za mobilne borbene grupe i za razne vojne/mornaričke operacije kao što su izviđanje, prikupljanje obavještajnih podataka, obilježavanje meta za druge jedinice, NBKO nadzor itd.. Neke od civilnih zadaća

uključuju sigurnosni nadzor područja aerodroma, kontrolu požara, nadzor elektrana i visokonaponskih vodova, prskanje usjeva itd. [11].

BZ kratkog dometa

Ova klasa uključuje BZ-ove koji imaju domet od 150 km ili više i vrijeme trajanja od 8 do 12 sati. Poput bespilotnih zrakoplova bliskog dometa, uglavnom se koriste u svrhe izviđanja i nadzora [11].

BZ srednjeg dometa

Klasa srednjeg dometa uključuje BZ-ove koje imaju velike brzine i radni radijus od 650 km. Osim za prikupljanje meteoroloških podataka, koriste se i za potrebe izviđanja i nadzora [11].

BZ velike izdržljivosti

Klasa bespilotnih zrakoplova velike izdržljivosti uključuje BZ-ove koji imaju izdržljivost od 36 sati i radni radijus od 300 km. Ova klasa bespilotnih zrakoplova može djelovati na visinama od 30 000 stopa. Također se koriste u svrhe izviđanja i nadzora [11].

Jednu od detaljnijih klasifikacija uspostavlja NATO svojom Organizacijom za istraživanje i tehnologiju (*Research & Technology Organization, RTO*). Cilj NATO klasifikacije je opisivanje bespilotnih zrakoplova na temelju širokog raspona karakteristika, poput njihove veličine, visine operativnog leta, vrijeme koje letjelica može provesti u zraku i radijus djelovanja. Pritom se radijus djelovanja odnosi na polumjer u kojem postoji stalna komunikacijska veza kroz koju se u potpunosti upravlja letjelicom. Namjera klasifikacije je olakšati interoperabilnost među članicama NATO-a.

RTO kategorizacija prikazana je u tablici broj 2. Osim toga, bespilotni zrakoplovi mogu se podijeliti na temelju profila leta, odnosno potiska i načina na koji se postiže letenje [12].

Tablica 2. NATO RTO klasifikacija bespilotnih zrakoplova.

KATEGORIJA	GTOW	VRSTA MISIJE	VISINA LETA	RADIJUS DJELOVANJA
Klasa 1				
Micro	< 2 kg	Taktička podjedinica	<200 ft	<5 km
Mini	2 kg – 5 kg	Taktička podjedinica	<3000 ft	<25 km
Small(Mala)	15 kg – 150 kg	Taktička jedinica	<5000 ft	<50 km
Klasa 2				
TUAV	150 kg– 600 kg	Taktičke formacije	<18000 ft	LOS (Line of sight)
Klasa 3				
MALE	>600 kg	Operativna	<45000 ft	BLOS (Beyond line of sight)
HALE	>600 kg	Strateška	<64000 ft	BLOS
UCAV(napadački)	>600 kg	Strateška	<65000 ft	BLOS

Izvor: [12].

Van linije vidokruga (*Beyond Line of Sight, BLOS*) i linija vidokruga (*Line of Sight, LOS*) se odnosi na prijenos i prijam radijskog signala, a linija vidljivosti nije između vizualne percepcije ljudskog operatora i letjelice, već između letjelice i bilo koje radio opreme na koju se oslanja za rad.

Micro UAV – mikro letjelice i mali dolet.

Ova kategorija uključuje minijaturne letjelice ukupne mase općenito ne veće od 2 kg i s rasponom krila ne većim od 150 mm. Većinom se koriste u urbanom području i zbog toga ih karakterizira mala brzina i mogućnost lebdenja, i stajanja, i spuštanja na zidove ili neke pozicije na objektima na kojima ima mjesta za slijetanje odakle mogu dalje izvršavati svoju misiju nadzora, a s tim što ne lete mogu čuvati energiju. Polijetati mogu iz ruke i zbog toga imaju manji raspon krila i kao posljedica toga im je veća ranjivost na atmosferske turbulencije [13].

Mini UAV – minijaturne letjelice i mali dolet.

Letjelice ove kategorije imaju masu ispod 20 kg, ali ipak malo veću od mikro letjelica. Mogu polijetati iz ruke i imaju dolet od oko 10 km. Vojska ih koristi kod mobilnih borbenih grupa za nadzor i izviđanja, a u civilnoj upotrebi mogu imati razne namjene [13].

Taktički BZ (*Tactical UAV, TUAV*) ili srednji dolet i izdržljivost (*Medium Range Endurance, MRE*) – srednja visina leta i istrajnost,

Ova kategorija primjenjuje se jednako na bespilotne zrakoplove koji lete na srednjim visinama i koji obavljaju letove u doletu od 100 i 300 km. Te su letjelice općenito manje i jednostavnije za korištenje od letjelica koje pripadaju HALE ili MALE kategorijama. U širokoj su uporabi u vojskama diljem svijeta, a jednako su zastupljene u ratnim zrakoplovstvima, ratnim mornaricama i kopnenim vojskama. To su uglavnom zadaće izviđanja, zračnog nadzora i prikupljanja obavještajnih podataka [13].

Visoka visina leta, velika istrajnost (*High Altitude Long Endurance, HALE*)

Bespilotni zrakoplovi iz kategorije HALE omogućuju visoku operativnu sposobnost, lete na visinama od 15 000 do 20 000 metara i mogu ostati u zraku dulje od 24 sata. Takve letjelice gotovo su isključivo u vlasništvu ratnih zrakoplovstava i sve više nose određeni smrtonosni teret koji im omogućuje obavljanje vojnih zadaća u okviru strateškog (globalnog) operativnog dosega. Komunikacijska veza ostvaruje se i putem satelitske veze (SAT/COM). Upotrebljavaju se uglavnom za zadaće izviđanja iz zraka i nadzora. Poznati predstavnik ove kategorije je američki *RQ-4A/B (Northrop Grumman)*, s rasponom krila većim od 35 metara. Zrakoplovi HALE imaju snažnu interakciju s drugim sudionicima zračnog prometa u kontroliranom zračnom prostoru [13].

Srednja visina leta, velika istrajnost (*Medium Altitude Long Endurance, MALE*)

Bespilotni zrakoplovi MALE kategorije imaju vrlo dinamičan raspon operativnih sposobnosti i lete na nadmorskim visinama od 5 000 do 15 000 metara, dok u zraku mogu ostati isto kao zrakoplovi tipa HALE, odnosno tijekom 24 sata. Ova kategorija je također najkompleksnija u kontekstu operativne uporabe, to je kategorija u koja je najzanimljivija korisnicima i u koju se najviše ulože. Naime, iako te letjelice ne obavljaju strateške zadaće, njihov operativni let veći od 500 km – za veliku većinu zemalja korisnika takvih letjelica te letjelice su zapravo je strateški alat zbog veće dostupnosti i manje cijene od HALE kategorije [13].

Bespilotni borbeni zrakoplovi (*Unmanned combat aerial vehicle, UCAV*) ili napadačke (*Strike*)– visoka visina leta, velika istrajnost

Bespilotni borbeni zrakoplovi UCAV, također poznati i kao napadački bespilotni zrakoplovi, su letjelice karakteristika kao i letjelice iz kategorije HALE s razlikom da nose naoružanje. Koriste se za nadzor, izviđanje, pronalaženje ciljeva i uništavanje ciljeva na zemlji, a u budućnosti se ide k tome da imaju mogućnost uništavanja ciljeva u zraku, tj. Da mogu voditi zračne dvoboje i ostvarivati prevlast u zraku [13].

2.4. Kategorije bespilotnih zrakoplova prema namjeni

Bespilotni zrakoplovi desetljećima su služili uglavnom u vojne svrhe, posebno u području taktičkog i strateškog zračnog izviđanja. Do sredine prošlog desetljeća više od 90% svih ulaganja u razvoj bespilotnih sustava izravna su posljedica državnih ulaganja za vlastitu uporabu u okviru modernizacije vojnih i obrambenih programa. Međutim, iako je tržište vojnih aplikacija ovih sustava nastavilo rasti (danas je doseglo više od 630 različitih modela letjelica koji su na popisu više od 40 zemalja), tržište civilnih aplikacija nije slijedilo taj korak. To je prvenstveno zbog regulatornih i pravnih okolnosti koje su još uvijek isključivo u korist vojnih zrakoplova koji lete pod posebnim uvjetima [13].

Kad je riječ o znatnom uvođenju civilnih bespilotnih zrakoplova na tržište i slijedom toga u operativnu uporabu, Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe (*EUROCONTROL*) procjenjuju da će do toga doći u okviru triju okvira ili kategorija aplikacija, od kojih će svaka pojedinačno potaknuti poseban tržišni odgovor. To su:

- tehnološki inducirane aplikacije,
- aplikacije inducirane platformom i
- aplikacije inducirane uslugom ili uslugama [13].

2.4.1. Tehnološki inducirani za civilnu primjenu

Razvoj civilnih bespilotnih zrakoplova u određenoj će mjeri biti potaknut tehnološkim napretkom multifunkcionalne opreme koja se trenutačno koristi uglavnom u vojne svrhe. To su optički senzori za nadgledanje visinskih terena na manjim platformama te radarski nadzor i relejna komunikacija na većim platformama. Razvoj tehnologije u kontekstu minijaturizacije,

poboljšanja izvedbe i smanjenja energetske potrebe u velikoj će mjeri usmjeravati razvoj civilne primjene [13].

2.4.2. Primjene inducirane aplikacije pomoću platformi

U određenoj mjeri, primjena će biti potaknuta postojećim vojnim platformama i povezanom opremom koja će pronaći jednaku civilnu uporabu. To su uglavnom male letjelice sposobne pratiti gospodarsku i energetska infrastrukturu. U tom kontekstu posebne industrije i vladine organizacije i nacionalni istraživački centri kao glavni korisnici takvih usluga imat će važnu ulogu u tome [13].

2.4.3. Primjene aplikacije inducirane uslugom

Telekomunikacijske usluge i usluge koje koriste satelite u nižim orbitama bit će zainteresirane za nove elemente infrastrukture koji su jeftiniji, jednostavniji za modernizaciju i prilagodbu stvarnosti tehničkog iskorištavanja. Slijedom toga, industrija će ponuditi odgovarajuće aplikacije na tržištu. Dok je većina postojećih primjena bespilotnih zrakoplova i demonstracija nekih novih orijentirana na vojsku, vidljiv je interes civilnih korisničkih skupina. Mogući razlog takve situacije je blizina osnovnih namjena takvih letjelica, a prije svega nadzor terena iz zraka (koji se u vojnom okruženju očituje kao borbena izviđanja i prikupljanje obavještajnih podataka o zraku) i korištenje geostacionarnih bespilotnih letjelica na velikim visinama kao novih infrastrukturnih elemenata za buduće telekomunikacijske sustave [13].

Ostale kategorije bespilotnih zrakoplova mogu se podijeliti u druge kategorije, osim po dolasku i karakterističnom profilu i namjeni leta, uzimajući u obzir

- a) vrstu konstrukcije prema kojoj se zrakoplovi mogu dalje dijeliti na zrakoplove s fiksnim krilima i klasični profil uzlijetanja/slijetanja i zrakoplove s rotirajućim krilima s okomitim uzlijetanjem/slijetanjem.
- b) njihovoj masi, prema kojoj dijelimo zrakoplove na one teže od zraka i one lakše od zraka (baloni).
- c) pogonske skupine, koje mogu biti klipni motori, turbo-propeleri, turbo-ventilatorski turbo-osovinski i turbo-mlazni motori te elektromotori (pogonjeni solarnim panelima ili gorivim ćelijama).

3. Pogonski sustavi bespilotnih zrakoplova

Tip pogonskog sustava izravno je povezan s namjenom, zadaćama i željenim performansama bespilotnog zrakoplova. Pogonski sustav bespilotnog zrakoplova se sastoji od izvora energije i pogonske jedinice. Prema izvoru energije dijelimo ih na tri tipa, a to su [14]:

- sustavi koji koriste fosilna goriva (motori s unutarnjim izgaranjem),
- hibridni sustavi koji koriste fosilna goriva i električnu energiju,
- sustavi koji koriste samo električnu energiju.

Prednosti sustava bespilotnih letjelica koje koriste tradicionalne pogonske sustave na fosilna goriva su velika nosivost, veći dolet i istrajnost i brža opskrba izvorom energije (gorivom) od sustava koja koriste električnu energiju. Međutim, zbog ekoloških razloga i cijene fosilnih goriva, hibridni i električni sustavi su se sve više razvijaju. Hibridni sustavi se sastoje od motora s unutarnjim izgaranjem i od električnog motora koji rade zajedno kako bi proizveli dovoljno energije potrebne za let zrakoplova, čime se učinkovito štedi oko 30% potrošnje goriva u usporedbi s sustavima na fosilna goriva. Dok sustavi koji koriste samo električnu energiju imaju prednosti niske emisije ugljika, male razine zagađenja, niske cijene i visoke razine iskoristivosti energije [14].

3.1 Pogonski sustavi na fosilna goriva

Pogonski sustav bespilotnih zrakoplovnih sustava se sastoji od mehanizma snabdjevenija gorivom, motora, mehaničke transmisije i propelera. Središnji dio tog cjelokupnog sustava je motor koji ima ulogu pretvaranja kemijske energije goriva u toplinsku energiju, a zatim nju pretvara u mehanički rad. Takvi motori se većinom klasificiraju u dvije kategorije, a to su klipni i mlazni motori. Iako su u osnovi motori kod bespilotnih zrakoplova isti kao i kod civilnih i vojnih zrakoplova s posadama, motori prikladni za bespilotne zrakoplovne sustave moraju imati karakteristike kao što su: velika istrajnost, male dimenzije, velika specifična snaga, robusnost i jednostavno održavanje. U tablici 3. možemo vidjeti usporedbe karakteristika nekoliko tipova motora.

Tablica 3. Karakteristike motora na fosilna goriva.

TIP MOTORA	KARAKTERISTIKE MOTORA				KARAKTERISTIKE BESPILOTNIH ZRAKOPLOVA		
	SNAGA	OBRTAJI (rpm)	SPECIFIČNA SNAGA(kW/kg)	BRZINA (km/h)	VISINA LETA(m)	ISTRAJNOST(h)	MASA(kg)
KLIPNI MOTOR	20-400 Hp	3000- 7000	0,76-1,37	110-260	2500- 9700	<40	<1150
ROTIRAJUĆI MOTOR	<120 Hp	6000- 12000	<4,1	/	2500- 8000	/	<1000
TURBO- MLAZNI	<170 kN	/	<10	700- 1100	3000- 14000	<2,5	<2500
TURBO- VENTILATORNI	<560 kN	/	<11	500- 1100	3000- 20000	<42	<12000
TURBO - ELISNI	<1000 Hp	1000	4	350-500	14000- 16000	<32	<3200
TURBO- OSOVINSKI	<9000 Hp	/	3-7	180-300	4000- 6100	<4	<1500

Izvor: [14].

3.1.1. Klipni motori

Klipni motori imaju sustav motora s unutrašnjim izgaranjem koji čini zakretni moment uz pomoć klipnog motora. U pogonskom sustavu bespilotnih zrakoplova da bi klipni motor pogonio bespilotni zrakoplov tijekom leta potrebna je kombinacija klipnog motora s propelerom. Prednosti klipnih motora su [14]:

- zrela tehnologija: klipni motori se upotrebljavaju i razvijaju već dugi niz godina i tehnologija njihove upotrebe i izrade već dobro poznata svim korisnicima,

- jednostavna struktura: u usporedbi s mlaznim motorima, klipni motori imaju mnogo jednostavniju strukturu i s tim su mnogo lakši za održavanje,
- manji troškovi: klipni motori su jeftini za proizvodnju i održavanje i vrlo su pouzdani. Prikladni su za upotrebu na malim i srednjim pogonskim sustavima bespilotnih zrakoplova.

Nedostaci klipnih motora u odnosu na mlazne motore su [14]:

- mali omjer snage i mase: u usporedbi s mlaznim motorima taj omjer je mal i on utječe na težinu tereta kojeg bespilotni zrakoplov može ponijeti,
- ograničenije brzine: zato što klipni motor stvara potisak rotacijom propelera, njegova najveća brzina ne može premašiti brzinu zvuka, tako da ne može zadovoljiti zahtjeve zrakoplova kojima je potrebna velika brzina,
- slabe performanse na velikim visinama: budući da su klipnom motoru potrebne velike količine kisika tijekom rada, njegove performanse su značajno lošije rijetkog zraka na velikim nadmorskim visinama.

Kod pogonskih sustava bespilotnih zrakoplova koristi se nekoliko vrsta klipnih motora [15]:

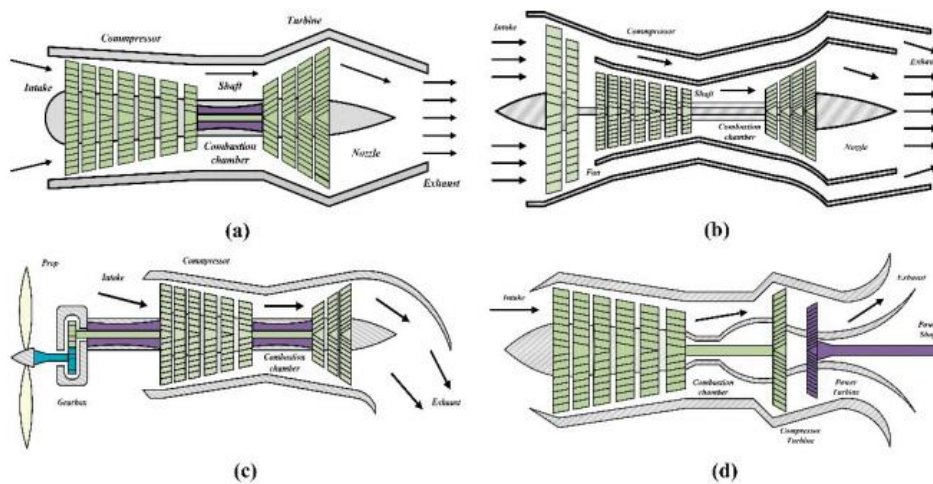
- Dvotaktni zrakom hlađen motor – nisu potrebni dodatni sustavi i podmazivanje se rješava gorivom. Rad na visokim temperaturama i podmazivanje goriva razlog su zašto ovaj tip motora ispušta više ispušnih plinova od drugih tipova motora. Ako se ova vrsta pogona koristi za bespilotni zrakoplovi koje rade na višim visinama, ubrizgavanje goriva treba primijeniti zbog manje količine kisika što dovodi do nepotpunog izgaranja i gubitka snage. Prednosti ovog tipa motora su vrlo niska masa, visok omjer snage i mase, dok je glavni nedostatak visoka razina buke u usporedbi s četverotaktnim i Wankelovim motorima.
- Motor četverokatni- bespilotni zrakoplovi koje su teže od 50 kg najčešće primjenjuju sustav pogona koji ima četverotaktni. Budući da ova vrsta pogona zahtijeva složenije elemente u smislu podmazivanja, distribucijskog mehanizma i sustava ubrizgavanja, ukupna masa ovih motora je značajno veća od dvotaktnog motora. Prednosti ove vrste pogona su manja potrošnja goriva u usporedbi s Wankel motorom, dulji vijek trajanja motora, dok su nedostaci visoki maseni i vrlo niski omjer snage i mase u usporedbi s dvotaktnim motorima.

- Rotirajući motor – radijalni i specifični način rada u kojem je koljenasta osovina fiksna i cilindri se okreću oko nje kao cjelina na koju je propeler pričvršćen. Ne treba složeni usisni i ispušni sustav tako da ima jednostavnu strukturu. Njegove su prednosti mala veličina i težina, niska cijena i visoka učinkovitost.
- Wankel motor – primjer četverotaktnog okretnog motora s trokutastim klipom u ovalnom kućištu. Zbog svojih malih dimenzija, ovaj tip motora pogodan je za ugradnju u bespilotni zrakoplov jer je relativno mali prostor potreban za smještaj cijelog pogonskog sustava. Prednosti ovog tipa motora su visok omjer snage i mase, jednostavnost konstrukcije, pouzdan rad na velikom broju okretaja, potpuno dinamično balansiranje i jednostavnost sustava. Nedostaci u ovoj vrsti postrojenja su velika potrošnja goriva, relativno nizak zakretni moment i veći troškovi proizvodnje.

3.1.2. Mlazni motori

Mlazni motor je motor u kojem se kemijska energija goriva izgaranjem pretvara u kinetičku energiju mlaza plinova što velikom brzinom struje unatrag kroz mlaznicu motora. Takvo razvijenoj akcijskoj sili suprotstavlja se reakcijska sila suprotnog smjera, tj. sila potiska koja pokreće zrakoplov. Osnovni dijelovi motora su: usisnik zraka, kompresor, komora za izgaranje, turbina i mlaznica.

Mlazne motore, koje vidimo na slici 5., možemo podijeliti u četiri kategorije, a to su: turbo-mlazni, turbo-ventilatorski, turbo-elisni te turbo-osovinski.



Slika 5. Tipovi mlaznih motora. A) turbo-mlazni; b) turbo-ventilatorski; c) turbo-elisni; d) turbo-osovinski [15].

Tipovi mlaznih motora su [15]:

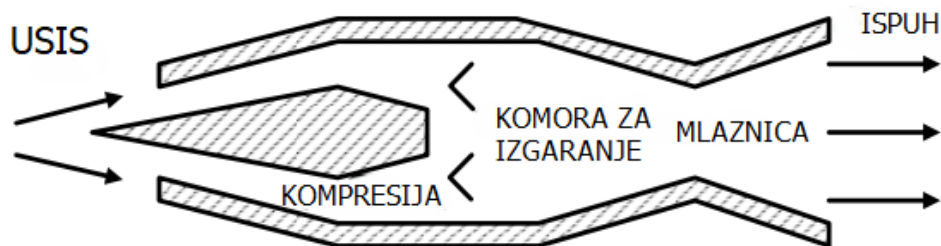
- Turbo-mlazni motor (engl. *Turbojet*) – je tip mlaznog motora gdje se zrak nakuplja u prednjem dijelu i tamo se okretanjem kompresorskih lopatica stješnjava. U taj stlačeni zrak se ubrizgava gorivo koje sagorijeva, nakon čega se smjesa plina i zraka naglo širi. Ta smjesa okreće turbinu koja pokreće kompresor i ispušta struju vrućeg zraka koja velikom brzinom gura avion prema naprijed. Turbo-mlazni motor ima prednost kao što su zanemariva masa i značajan omjer snage i mase što je dovelo do toga da se već naširoko koristi u pogonskim sustavima bespilotnih zrakoplova. Međutim, on ima i neke nedostatke poput velike potrošnje goriva pri malim brzinama i niske učinkovitosti jer ispušta plin visoke temperature i visokog tlaka koji još uvijek ima puno energije.
- Turbo-ventilatorski motor (engl. *Turbofan*) – je tip mlaznog motora koji je nastao kao odgovor na problem niske učinkovitosti turbo-mlaznih motora. Poboljšanja su napravljena dodavanjem ventilatora na usisnom traktu. Princip rada je da turbine okreću goleme ventilatore na prednjem dijelu aviona i usisava dodatnu količinu zraka, koja se ne uvodi u kompresor i komoru za izgaranje, već se izravno koristi za stvaranje dodatnog potiska. Potisak nastaje uglavnom od potiska komprimiranog plina ventilatora, koji ispušta plin s manjom energijom nego kod turbo-mlaznog motora, pa turbo-ventilatorski motor ima veću učinkovitost i dulji životni vijek. Takvi motori se koriste za vojne i velike putničke zrakoplove.

- Turbo-elisni motori (engl. *Turboprop*) – su motori su zapravo turbo-mlazni motori s vanjskim propelerom kojeg zajedno s kompresorom pogoni turbina. Najveći dio potiska daje propeler, dok izlazni mlaz daje tek manji dio. Turbo-elisni motori imaju prednost značajnog omjera snage i mase, nisku vibraciju, kompaktniju strukturu u usporedbi s tradicionalnim klipnim motorima i veću učinkovitost od turbo-ventilatorskih motora pri malim brzinama. Takvi motori se koriste za transportne i manje putničke zrakoplove gdje su njihove značajke su pouzdanost i ekonomičnost.
- Turbo-osovinski (engl. *Turboshaft*) – je motor koji je jako sličan turbo-elisnom. Glavna razlika između njih je da se energija mlaza ispušnih plinova koristi za pokretanje osovine koja preko prijenosnih zupčanika pokreće rotor. Zbog svojih karakteristika najčešće se ugrađuje u helikoptere.

Mlazni pogon koristi se za široki spektar namjena bespilotnih zrakoplova, od akrobatskih letjelica pa sve do jedrilica i helikoptera. Danas je ova vrsta pogonskih sustava tehnološki razvijena u toj mjeri da je moguće prilagoditi sve elemente sustava ovisno o namjeni bespilotnog zrakoplova [15].

3.1.3. Nabojno mlazni motori

Nabojno mlazni motor (ramjet, atodid ili Lorinov motor) najjednostavniji je među mlaznim motorima jer nema ni kompresor ni turbinu, već se zrak stlačuje u komoru za izgaranje zahvaljujući velikoj brzini kretanja zrakoplova, a time i zračne struje što kroz posebno oblikovan usisnik ulazi u motor. Struktura motora, koju možemo vidjeti na slici 6., je dosta pojednostavljena jer nema kompresor i turbinu, nego samo: usisnik zraka, komoru za izgaranje i mlaznice.



Slika 6. Nabojno mlazni motor[14]

Potisak koji stvara motor je u pozitivnoj korelaciji s brzinom usisa zraka, pa što je veće brzina leta zrakoplova to je veći generirani potisak nabojno mlaznog motora. Zbog te značajke se ne može koristiti u mirovanju i ima loše značajke pri malim brzinama, pa se često koristi u kombinacijama s drugim motorima ili, ako je zrakoplov opremljen samo nabojno mlaznim motorom, koristi će se druga letjelica koja će osigurati početnu brzinu za rad nabojno mlaznog motora. Zbog svojih vrhunskih performansi pri velikim brzinama često se koristi u hipertoničnim bespilotnim zrakoplovnim sustavima kao što je američki bespilotni zrakoplovni sustav X-51A s brzinom pet puta većom od brzine zvuka [14].

3.2. Hibridni pogonski sustavi

Zbog sve većeg iscrpljivanja naftnih resursa i sve ozbiljnijih klimatskih problema, tradicionalni pogonski sustavi ne mogu zadovoljiti sve veće zahtjeve za zelenom čistom energijom i potrebama zaštite okoliša. Čisti električni sustavi još nisu dovoljno razvijeni za upotrebu u većim zrakoplovima i limitirani su veličinom baterija te ne zadovoljavaju u potpunosti potrebe zračnog prometa. To je rezultiralo razvojem hibridnog pogonskog sustava na gorivo i električnu energiju u kojem se potisak ostvaruje zajedničkim radom tradicionalnog motora na gorivo i električnog motora [14].

Hibridne pogonske sustave možemo klasificirati na [14]:

- Paralelni hibridni pogon – je sustav gdje motor na gorivo i električni motor zajedno pokreću rotaciju propelera. Kad je snaga motora prevelika, višak snage će se kroz generator pretvoriti u električnu energiju i pohraniti u uređaj za pohranu energije. Kad snaga motora bude nedovoljna, uređaj za pohranu će osloboditi električnu energiju za pogon električnog motora za kompenzaciju nedovoljne snage motora. Ovaj način rada može dodatno poboljšati učinkovitost pogonskog sustava kako bi se smanjila potrošnja goriva i povećala istrajnost i domet.
- Serijski hibridni pogon – je pogonski sustav gdje motor pokreće generator na proizvodnju električne energije, koja zauzvrat pokreće elektromotor na rad koji pokreće rotaciju propelera i generira snagu koja je potrebna za let.
- Serijski-paralelni hibridni pogon – je sustav koji je spoj serijske i paralelne strukture. Pogonska jedinica se sastoji od motora i elektromotora koji tijekom leta zajedno daju

snagu za rotaciju propelera. Pri malim brzinama sustav radi uglavnom u serijskom obliku, dok pri velikim brzinama radi paralelno. Takav serijsko paralelni hibridni sustav može imati prednosti i serijske i paralelne strukture.

- Složeni hibridni pogon – je zapravo serijski-paralelni pogon kojem je dodan pretvarač električne energije kako bi se generator i električni motor mogli kontrolirati odvojeno. Na ovaj način se može postići preciznija kontrola sustava i može se dodatno uštedjeti gorivo.

3.3. Električni pogonski sustavi

Ključni elementi električnog pogona su propeler, motor, regulator i baterija. U prvom kontekstu pogonskog električnog principa potrebno je istaknuti ovisnost snage i generiranog potiska. Promjene parametara i performansi pogonskog sustava nastaju tijekom promjene parametara propelera, kao posljedica promjene potiska sustava. U drugom elementu sustava, energetska segment koji mora osigurati dovoljno energije za sve elemente. Strujni regulatori dio su energetske sustava, dizajniran za promjenu ulaznog regulacijskog ulaza signala upravljačke jedinice na odgovarajuću vrijednost frekvencije napona i za osiguravanje elektromotora pri zadanoj ustaljenoj brzini [15].

Elektromotori moraju biti projektirani tako da stvaraju moment proporcionalan naponu napajanja. Struktura karakteristična za ovu vrstu pogona je jednostavnost s minimalnim rotacijskim elementima koji značajno olakšavaju rad na performansama pri većim brzinama.

Prednosti ovog tipa motora su [14]:

- Ekološki prihvatljiv – korištenjem električne energije se smanjuju emisije štetnih tvari i smanjuje emisija ugljika.
- Svestranost dizajna – omogućuje bolje aerodinamičke i letne performanse koje mogu zadovoljiti razne specifične potrebe korisnika.
- Širok raspon izvora energije – gorive ćelije, solarna energija i litijeve baterije mogu se koristiti kao izvor energije.
- Jednostavna struktura – električni pogonski sustavi su jednostavni za održavanje i popravljavanje.

Nedostaci električnih pogonskih sustava [14]:

- Niski kapaciteti za pohranu energije – trenutni kapaciteti litijske baterije su nedovoljni što rezultira prevelikom težinom baterije koja bi zadovoljavala potrebe.
- Visoka cijena komponenti za pohranu energije – tehnologija za pohranu električne energije još nije dovoljno zrela i njen daljnji razvoj istiskuje velike financijske troškove.
- Smanjena učinkovitost tijekom loših vremenskih uvjeta – u složenom elektromagnetskom okruženju pouzdanost električnog pogonskog sustava bit će smanjena do određene mjere.

4. Zadatci i misije bespilotnih zrakoplova s mlaznim pogonskim sustavom

Bespilotni zrakoplovi se upotrebljavaju samo kada oni donose prednost u odnosu na letjelice s posadom. Korisnik je onaj koji odlučuje koji tip letjelice je najprikladniji za obavljanje zadaće i odgovara na pitanje je li rješenje letjelica s posadom ili bez posade. Izbor na bespilotne zrakoplove većinom pada kad je misija opasna, tj. kad postoji velika vjerojatnost gubitka letjelice i kod misija izviđanja i nadziranja, gdje je jako bitna koncentracija koja kod ljudskih posada jako opada s vremenom.

Zadatci i misije bespilotnih zrakoplova s mlaznim pogonom su podijeljene na vojne i civilne i u daljnjem tekstu će biti prikazane mogućnosti upotrebe u jednoj ili drugoj podjeli.

4.1. Vojna namjena

Misije izviđanja i nadzora iz zraka predstavljaju veliku većinu osnovnih namjena bespilotnih zrakoplova koji se nalaze u vojnim inventarima. S vremenom, zbog iskazanih taktičkih prednosti takvih letjelica, a ponajprije je riječ o njihovoj sposobnosti da budu bliže vojnom protivniku bez postojanja ugroze za vojnika koji njima upravlja, razvile su se i razne napadačke, tj. borbene sposobnosti.

Isprva su senzorske platforme služile pronalaženju i označavanju ciljeva na zemlji, te pasivno navođenje vatre na te iste ciljeve, a razvojem tehnologije omogućeno je da se na takve zrakoplove postavi i naoružanje za neposredno i autonomno napadanje ciljeva na zemlji i u zraku. Jedan od primjera takvih zrakoplova je američka bespilotni zrakoplov tipa *General Atomics MQ-1 Predator*, naoružana navođenim protuoklopnim projektilima *AGM-114 Hellfire*.

Misije bespilotnih zrakoplova u vojne svrhe mogu se podijeliti u četiri kategorije:

- Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance (*ISTAR*), obavještajni rad, nadzor, pronalaženje ciljeva i izviđanje su misije gdje bespilotni zrakoplovi služi kao oči na nebu.
- Napadačke ili borbene, misije gdje su bespilotni zrakoplovi naoružani i imaju mogućnosti djelovanja po metama na zemlji.

- Mete, misije gdje se bespilotni zrakoplovi koriste kao meta za borbene zrakoplove s posadom ili za protuzračne sustave.
- Lutajuće streljivo ili “dronovi kamikaze“ (Loitering Munitions), bespilotni zrakoplovi za jednokratnu upotrebu koji nose bojevu glavu i zabijaju se u metu.

Sjedinjene Američke Države u sklopu programa razvoja višenamjenskog borbenog aviona šeste generacije (*Next Generation Air Dominance, NGAD*) razvijaju i borbeni bespilotni zrakoplov nazvan Kolaborativni borbeni zrakoplov (*Collaborative Combat Aircraft, CCA*) poznate kao i „*Loyal Wingman*“. CCA bi imala mlazni pogon jer cilj je da ona može pratiti borbene mlazne zrakoplove i čak voditi zračne dvoboje s neprijateljskim zrakoplovima.

Borbena skupina će se sastojati od letjelice s pilotom (*Penetrating Counter-Air, PCA*) te više borbenih bespilotnih zrakoplova CCA. Pritom će PCA služiti kao istureno zapovjedno mjesto, dok će letjelicama CCA biti prepušteno izvršavanje borbenih zadaća. Pri tome se javlja izazov razvoja sustava koji će omogućiti pilotu istodobno upravljanje avionom i rojem zrakoplova CCA. Jedino je rješenje intenzivna primjena umjetne inteligencije. Kako će količina podataka biti prevelika za pilota, umjetna inteligencija morat će preuzeti na sebe i upravljanje PCA-om usmjeravanje djelovanja CCA-a. Pritom će pilot imati ulogu koja će potvrđivati ili zamjenjivati prioritete djelovanja CCA-a [16].

4.2. Civilna namjena

Nedavni brzi napredak u proširenju opsega vojne i državne uporabe bespilotnih zrakoplova doveo je do prepoznavanja vrlo širokog potencijala za civilnu komercijalnu primjenu različitih bespilotnih zrakoplova, od kojih su većina mali bespilotni zrakoplovi koji rade ispod visine koju obično koriste zrakoplovi s posadom ili barem ispod oko 1 000 stopa nadmorske visine. Mnoge od ovih upotreba sada su dobro uspostavljene i uključuju [17]:

- Fotografiranje iz zraka,
- Primjena u poljoprivredi (oprašivanje usjeva i nadzor...),
- Nadzor iz zraka u svrhu zaštite od požara,
- Nadzor prometa,
- Olakšavanje komunikacije i emitiranja,

- Prijevoz malih paketa i rasutih tereta,
- Praćenje mrežne infrastrukture kao što su željezničke pruge, dalekovodi i cjevovodi,
- Atmosferska istraživanja....

Upotreba bespilotnih zrakoplova može imati raznu upotrebu za civilnu namjenu, ali većina tih zadaća se ne izvode s letjelicama s mlaznim motorom. BZ s mlaznim pogonom je u većini slučajeva veći i skuplji od letjelica s drugim pogonima i stoga ga u većini slučajeva nije ekonomično koristiti. Iz tih razloga te letjelice nisu našle veliku primjenu u civilnom sektoru.

Zadaće u kojima se mogu koristiti bespilotni zrakoplovi s mlaznim motorom su zadaće koje zahtijevaju veću izdržljivost u zraku, veći radijus djelovanja i let na većim visinama. Takve zadaće su većinom zadaće nadzora velikih površina.

Jedna od takvih zadaća je i zadaća nadzora isključivog gospodarskog pojasa zemlje koja ima pristup na otvoreno more. IGP se može prostirati i do 200 nm od polaznih crta od kojih se mjeri širina teritorijalnog mora i nad tim velikim područjem ta država koja ga je proglasila ima pravo nadzora nad tim područjem u svrhu čuvanja svojih interesa.

U sklopu zadaće nadzora isključivog gospodarskog pojasa obavljaju se:

- Patrole naftnih i plinskih bušotina,
- Rano otkrivanje zagađenja mora,
- Nadzor ribolova u pojasu,
- Carinska kontrola,
- Traganje i spašavanje na moru.

Jedan od načina nadziranja tih ogromnih područja je nadzor iz zraka s letjelicama koje karakterizira veliki radijus djelovanja i velika izdržljivost tj. mogućnost dugog ostajanja u zraku. Letjelice s tim karakteristikama su i bespilotni zrakoplovi s mlaznim pogonom. Prednosti tih letjelica su:

- Manji troškovi koji proizlaze iz toga što te letjelice nemaju posadu,
- Manje su pa zahtijevaju manje održavanja i manje ljudi za održavanje od letjelica s posadom.
- Zbog manjih dimenzija manja je potrošnja goriva.

- Mogu duže ostati u zraku jer nemaju ljudsku posadu kojoj s vremenom zbog umora pada koncentracije.

5. Analiza eksploatacijskih i tehničkih značajki mlaznih motora za bespilotne zrakoplove

Pogonski sustav, bilo to kod bespilotnih zrakoplova ili kod zrakoplova s posadom, jako utječe na performanse zrakoplova pa tako i na misiju za koju je taj zrakoplov namijenjen. Imajući to u obziru kod biranja pogonskog sustava za bespilotni zrakoplov najviše nas uvjetuje misija tog zrakoplova. Kako je fokus ovog rada na mlaznim motorima fokusirati ćemo se na misije koje su pogodne za korištenje mlaznih motora. Identificirali smo dvije misije u kojima se koriste bespilotni zrakoplovi s mlaznim motorima.

Karakteristike motora potisak, težina, specifična potrošnja goriva i cijena su glavne karakteristike koje se razmatraju kod odabira za bespilotne zrakoplove. Međutim treba uzeti u obzir i druge čimbenike kao što su tehnička pitanja koja se tiču motora, značajke dizajna ili radne karakteristike koje mogu biti važne za misiju bespilotnog zrakoplova [18].

Karakteristike bespilotnih zrakoplova za određene misije [18]:

- **ISTAR misije** – primarna namjena ovih letjelica je nadzor i izviđanje. Karakterizira ih srednji ili veliki dolet, velika istrajnost, srednja do velika visina leta, srednje do velike podzvučne brzine i širok raspon senzora i komunikacijskih sustava. *Global Hawk* je primjer takvog bespilotnog zrakoplova
- **Napadačke ili borbene misije** – primarna namjena ovih letjelica je onesposobljavanje ili uništavanje neprijateljskih ciljeva. Karakterizira ih srednji dolet i istrajnost, lete na srednjim visinama, srednje do velike podzvučne brzine. Njihov korisni teret može uključivati ubojna sredstva raznih vrsta i opremu za elektroničko ratovanje. Primjer bespilotnih zrakoplova za ovu vrstu misije je *Predator A/B*.

Bespilotni zrakoplovi su zbog nedostatka ljudske posade i misija koje za sad još nisu prijevoz ljudi i velikih tereta manji od zrakoplova s ljudskom posadom i iz tog razloga su potrebni manji motri nego kao kod putničkih zrakoplova. U tablici 5. možemo vidjeti podjelu mlaznih motora koji se koriste ili planiraju koristiti u bespilotnim zrakoplovima prema njihovoj masi i potisku.

Podatke o specifičnoj potrošnji goriva postojećih motora pri odgovarajućim uvjetima leta je teško prikupiti. Neki se podatci smatraju poslovnom tajnom i većina dostupnih podataka

nije za iste uvjete leta [18]. Iz tog razloga ćemo se u našoj podjeli navesti samo potisak i masu motora.

Tablica 4. Podjela mlaznih motora prema masi i potisku

VELIČINA	MODEL	TIP	MASA	POTISAK
VRLO MALI	JJ-3000	Turbo-mlazni	1,67 kg	133,4 N
	JJ-1800	Turbo-mlazni	1,570 kg	89 N
MALI	PBS-TJ200	Turbo-mlazni	28 kg	2280 N
SREDNJI	PT6A-135A	Turbo-elisni	157 kg	750 hp
	AL-450S	Turbo-elisni	157 kg	450 hp
	J85-GE21	Turbo-mlazni	300 kg	22240 N
VELIKI	AE-3007(F137-PR-100)	Turbo-ventilatorski	717 kg	33860 N

Izvor: [20,22].

Kod odabira pogonskog sustava za bespilotne zrakoplove postoje još četiri karakteristike koje moramo uzeti u obzir [18]:

- Istrajnost – kod bespilotnih zrakoplova treba biti veća istrajnost nego kod zrakoplova s ljudskom posadom kod ISTAR misija jer nije limitirana ljudskom izdržljivošću. Borbene bespilotne letjelice također imaju mogućnosti nadzora i izviđanja pa je i njima potrebna velika istrajnost.
- Operativna upotreba – može biti drugačija nego kod zrakoplova nego kod zrakoplova s ljudskom posadom te može rezultirati zahtjevima za kraćim životnim vijekom.
- Omjer snage i mase – zrakoplovi s posadom imaju veću masu pa s tim i veću potrebnu snagu dok bespilotni zrakoplovi imaju manju masu i s tim bolji omjer snage i mase.

- Dizajn – bespilotni zrakoplovi u većini slučajeva svojim dizajnom trupa stvaraju manji otpor zraka što utječe na pogonske sustave tako da smanjuje potrebnu snagu i potrošnju goriva.

Kako pogonski sustav značajno utječe na letne performanse zrakoplova u tablici 5. su prikazane prednosti i nedostaci četiri tipa mlaznih motora.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci četiri tipa mlaznih motora

TIP MOTORA	PREDNOSTI	NEDOSTATCI
Turbo-mlazni	<ul style="list-style-type: none"> • Široka primjena • Velike brzine • Prikladan za velike nadmorske visine 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka emisija zagađenja pri maloj brzini • Visoka cijena • Složena tehnologija • Niska učinkovitost
Turbo-ventilatorski	<ul style="list-style-type: none"> • Veliki omjer snage i mase • Velika snaga • Velika učinkovitost • Velika istrajnost 	<ul style="list-style-type: none"> • Nije prikladan za velike brzine • Veće sile otpora tijekom leta
Turbo-elisni/Turbo-osovinski	<ul style="list-style-type: none"> • Kompaktna struktura • Niska razina buke • Jednostavno održavanje 	<ul style="list-style-type: none"> • Nije prikladan za velike brzine • Uska primjena

Izvor: [15].

Iz prethodnih tablica možemo donijeti zaključak da su turbo-mlazni i turbo-ventilatorski motori imaju superiorne performanse pri velikim brzinama i sposobnosti letenja na velikim visinama. Stoga su prikladniji su prikladni za primjenu u bespilotnim letjelicama za izviđanje na velikim visinama. Turbo-elisni motor karakterizira manja brzina i jednostavno održavanje. Može se također koristiti za misije izviđanja i nadzora, ali samo u civilne svrhe ili vojne gdje neprijatelj ne posjeduje moderne protuzračne sustave. Turbo-osovinski motori imaju usku primjenu i koriste se samo helikopterima.

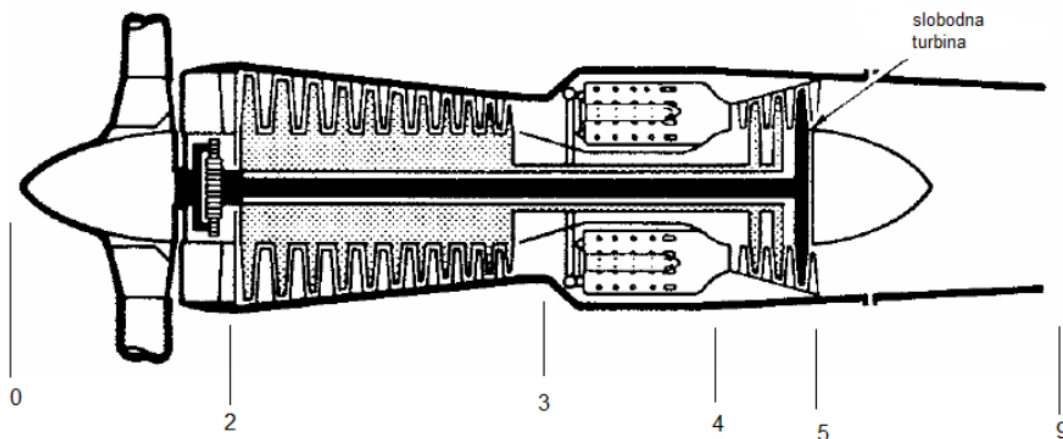
Kako je u ovom radu izabrana misija nadzora Isključivog gospodarskog pojasa Republike Hrvatske za čiju provedbu nam nisu potrebni zrakoplovi koji lete na velikim visinama i zrakoplovi velikih brzina i gdje se najviše gledaju troškovi eksploatacije za analizu performansi u sljedećem poglavlju je izabran turbo-elisni motor *PT6A-135A* američkog proizvođača Pratt & Whitney.

6. Određivanje performansi mlaznih motora za izabranu misiju bespilotnih zrakoplova

U ovom dijelu rada prikazan je model za određivanje performansi i izračun performansi u izvanprojektnom režimu rada turbo-elisnog motora *PT6A-135A*. Radi lakšeg snalaženja u jednadžbama pri analizi performansi motora definirane su karakteristične pozicije u strujanju fluida kroz motor. Glavne pozicije svakog mlaznog motora označene su u skladu prema RAP (*Recommended Aero Practice*) dokumentom koji predstavljaju industrijski standard i one su [19]:

- 0 – točka u neporemećenoj struji zraka ispred zrakoplova,
- 1 – uvodnik,
- 2 – prvi stupanj kompresora,
- 3 – posljednji stupanj kompresora,
- 4 – kraj komore izgaranja,
- 5 – posljednji stupanj turbine,
- 6 – ukoliko motor ima naknadno izgaranje
- 7 – početak mlaznika,
- 8 – sredina mlaznika,
- 9 – kraj mlaznika.

Na slici je prikazan turbo-elisni motor sa slobodnom turbinom poput *PT6A-135A*, sa označenim osnovnim pozicijama korištenim u proračunu.



Slika 7. Osnovne pozicije po RAP standardu [19]

Najbolji pokazatelji rada komponenata i važni parametri pri računanju izvanprojektnih režima rada motora. Omjer totalnih tlakova komponenata označava se s π , uz indeks koji označava komponentu: k za kompresor, t za turbinu, da za uvodnik (engl. *diffusor*), b za komoru izgaranja (engl. *burner*) i n za mlaznik (engl. *nozzle*).

Omjer totalnih temperatura označava se s τ , s istim pripadajućim indeksima.

U tablici su prikazani ulazni parametri za proračun i analizu u izvanprojektnim režimima rada. Uobičajeno je kod analiza izvanprojektnih režima rada referentnim termodinamičkim stanjem smatrati stanje u projektnoj točki, ali zbog nedostatka nekih podataka prihvaćene su vrijednosti referentnog stanja prikazane u tablici. Sve iznesene veličine opisane su na kraju rada u Popisu oznaka.

Tablica 6. Veličine korištene u proračunu

Stanje okoline - ISA SL	$P_0 = 101325 \text{ Pa}$		$T_0 = 288 \text{ K}$		$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$	
Omjeri tlakova	$\pi_{dmax} = 0,98$	$\pi_{cR} = 30$	$\pi_{th} = 0,2212$	$\pi_b = 0.94$	$\pi_{tl} = 0.2537$	$\pi_n = 0.98$
Omjeri temperatura	$\tau_{cR} = 2.7852$		$\tau_{th} = 0,7336$	$\tau_{rR} = 1$		$\tau_t = 0.55$
Iskoristivosti	$\eta_b = 0.995$	$\eta_c = 0.8450$	$\eta_g = 0.99$	$\eta_{mL} = 0.99$	$\eta_{prop} = 0.812$	$\eta_r = 1$

Izentropske konstante	Za zrak, $\gamma_c = 1.4$	Za ispušne plinove, $\gamma_t = 1.3$
Specifične topline	Za zrak, $C_{pc} = 1.004 \text{ kJ}/(\text{kgK})$	Za ispušne plinove, $C_{pt} = 1.234 \text{ kJ}/(\text{kgK})$
Donja ogrjevna vrijednost goriva	$h_{pr} = 428000 \text{ kJ}/\text{kg}$	
Referentni maseni protok zraka	$m_0 = 15 \text{ kg}/\text{s}$	
Referentni položaj poluge potiska	$T_{t4R} = 1078 \text{ K}$	
Položaj poluge potiska	$T_{t4} = 1363 \text{ K}$	

Izvor: [20].

Kao ulazne veličine u proračun se još uzimaju stanje atmosfere i određeni položaj poluge snage izražen preko ograničenja temperature produkata izgaranja na ulazu u turbinu (T_{t4}).

Funkcionalna ovisnost između dvije varijable motora za sve režime rada može se opisati kao [21]:

$$f(\pi, \tau) = f(\pi_r, \tau_r)$$

Za analizu se koriste sljedeće pretpostavke [22]:

- nepromjenjiva geometrija motora,
- omjeri totalnih tlakova uvodnika, turbine, komore izgaranja i mlaznika i iskoristivost svih komponenti su nepromijenjene i jednake vrijednostima prikazanim u tablici,
- utjecaj oduzimanja zraka sa kompresora i turbine za pogon uređaja i hlađenje je zanemariv
- radni fluid je idealni plin u strujanju kroz cijeli motor, koriste se specifična toplina zraka do komore izgaranja i specifična toplina ispušnih plinova od komore izgaranja.

Za stvaranje potiska mlaznog motora vrlo je bitan maseni protok zraka. Potisak je moguće povećati povećanjem masenog protoka ili povećanjem razlike brzina na ulazu i izlazu.

Za turbo-elisne motore, korištenje parametara masenog protoka i zakona očuvanja mase računa se prema izrazu:

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_f = \dot{m}_2(1 + f) = \dot{m}_4 = \frac{P_{t4}A_4}{\sqrt{T_{t4}}} MFP(M_4)$$

Maseni protok zraka slijedi iz izraza za parametar masenog protoka (MFP) na poziciji 4 za prigušeni protok:

$$\dot{m}_o = \frac{p_{t4}}{\sqrt{T_{t4}}} \frac{A_4}{1 + f} MFP(1) = \frac{p_0 \pi_r \pi_d \pi_k}{\sqrt{T_{t4}}} \left[\frac{\pi_b A_4}{1 + f} MFP(1) \right]$$

S obzirom da je protok prigušen ($M_4 = 1$) a površina konstanta ($A_4 = konstanta$) na stanici 4, maseni protok jezgre može se izjednačiti s istim iz projektne točke, odnosno referentnim veličinama:

$$\frac{\dot{m}_o \sqrt{T_{t4}}}{p_0 \pi_r \pi_d \pi_k} = \frac{\pi_b A_4}{1 + f} MFP(1) = \left(\frac{\dot{m}_o \sqrt{T_{t4}}}{p_0 \pi_r \pi_d \pi_k} \right)_R$$

Konačan izraz za računanje masenog protoka zraka glasi:

$$\dot{m}_o = \dot{m}_{oR} \frac{p_0 \pi_r \pi_d \pi_k}{(p_0 \pi_r \pi_d \pi_k)_R} \sqrt{\frac{T_{t4R}}{T_{t4}}}$$

Iz jednakosti radova kompresora i turbine slijedi da je:

$$\eta_m \dot{m}_4 c_{pt} (T_{t4} - T_{t4:5}) = \dot{m}_2 c_{pc} (T_{t3} - T_{t2})$$

Uzmu li se u obzir temperaturni odnosi, preurede u promjenjive i konstantne uvjete i izjednače u konstante referentne vrijednosti, dobije se izraz:

$$\frac{\tau_r (\tau_c - 1)}{T_{t4}/T_0} = \eta_m (1 + f) (1 - \tau_{tH}) = \left[\frac{\tau_r (\tau_c - 1)}{T_{t4}/T_0} \right]_R$$

Za τ_c proizlazi slijedeći izraz:

$$\tau_c = 1 + \frac{T_{t4}/T_0}{(T_{t4}/T_0)_R} \frac{(\tau_r)_R}{\tau_r} (\tau_c - 1)_R$$

Iz definicije učinkovitosti kompresora, π_c iznosi:

$$\pi_c = [1 + \eta_c(\tau_c - 1)]^{\gamma_c/(\gamma_c-1)}$$

Analiza ciklusa u komori izgaranja računa se preko koeficijenta dobivenog rada, C_c , prema jednadžbi:

$$C_c = (\gamma_c - 1)M_0 \left[(1 + f) \frac{V_9}{a_0} - M_0 + (1 + f) \frac{R_t T_9/T_0}{R_c V_9/a_0} \frac{1 - P_0/P_9}{\gamma_c} \right]$$

s tim da drugi dio jednadžbe, $(1 + f) \frac{R_t T_9/T_0}{R_c V_9/a_0} \frac{1 - P_0/P_9}{\gamma_c}$, ima mjerljivu vrijednost samo za gušeni protok, to jest protok kada je $M_9 = 1$. U tom trenutku na izlazu iz mlaznika se formira strujanje brzine $M = 1$, a vrijednost P_0/P_9 smanjuje se na vrijednosti manje od 1, za razliku do tada kada se uzima da je $P_0/P_9 = 1$.

Turbina je dio mlaznog motora u kojem se vrši ekspanzija ispušnih plinova, što znači da se temperatura i tlak smanjuju, to jest približavaju vrijednostima tlaka i temperature okoline. Dva parametra korištena u jednadžbama su stupanj pada tlaka π i stupanj pada temperature τ koji su međusobno povezani:

$$\pi_{tL} = \pi_{tLR} \sqrt{\frac{\tau_{tL}}{\tau_{tLR}} \frac{MFP(M_{9R})}{MFP(M_9)}}$$

$$\tau_{tL} = 1 - \eta_{tL}(1 - \pi_{tL}^{(\gamma_t-1)/\gamma_t})$$

Gdje je MFP parametar masenog protoka kao funkcija Machovog broja, a izražava se jednadžbom:

$$MFP(M_i) = \frac{M \sqrt{\gamma/R}}{\left\{ 1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} \right) M^2 \right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

Ako je $M_9 = 1$, to jest protok je napravio gušeni mlaznik u referentnim uvjetima i svim ostalim uvjetima koji se razmatraju, π_{tL} i τ_{tL} ostaju konstante.

Ravnoteža snage ovog vratila kojeg pogoni turbina snage je ista ona snaga koja pogoni propeler preko reduktora te se iskazuje pomoću koeficijenta rada propelera:

$$C_{prop} = \eta_{prop} \eta_g \eta_{mL} (1 + f) \tau_\lambda \tau_{TH} (1 - \tau_{tL})$$

Postoje dva režima protoka za protok kroz konvergentnu ispušnu mlaznicu. Nezagušeni protok će biti kada je:

$$\frac{P_{t9}}{P_0} = \pi_r \pi_d \pi_c \pi_b \pi_{tH} \pi_{tL} \pi_n < \left(\frac{\gamma_t + 1}{2} \right)^{\gamma_t / (\gamma_t - 1)}$$

a prigušen protok kada je:

$$\frac{P_{t9}}{P_0} = \pi_r \pi_d \pi_c \pi_b \pi_{tH} \pi_{tL} \pi_n \geq \left(\frac{\gamma_t + 1}{2} \right)^{\gamma_t / (\gamma_t - 1)}$$

Za nezagušeni protok, izlazni statični tlak P_9 jednak je tlaku okoline P_0 i podzvučnom izlaznom Mahovom broju M_9 koji je dan izrazom:

$$M_9 = \sqrt{\frac{2}{\gamma_t - 1} \left[\left(\frac{P_{t9}}{P_0} \right)^{(\gamma_t - 1) / \gamma_t} - 1 \right]}$$

Kod prigušenog protoka tada je:

$$M_9 = 1, \quad \frac{P_{t9}}{P_9} = \left(\frac{\gamma_t + 1}{2} \right)^{\gamma_t / (\gamma_t - 1)}, \quad \text{i} \quad \frac{P_0}{P_9} = \frac{P_{t9} / P_9}{P_{t9} / P_0}$$

6.1 Matematički model

Matematički model turbo-elisnog motora preuzet je iz literature [21]: Mattingly, J.D.; Heiser, W. H.; Pratt, D.T. Aircraft Engine Design Second Edition.

$$R_c = \frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c} C_{pc}$$

$$R_t = \frac{\gamma_t - 1}{\gamma_c} C_{pt}$$

$$a_0 = \sqrt{\gamma_c R_c T_0}$$

$$V_0 = a_0 M_0$$

$$\tau_r = 1 + \frac{\gamma_c - 1}{2} M_0^2$$

$$\pi_r = \tau_r^{\gamma_c / (\gamma_c - 1)}$$

$$\eta_r = 1$$

$$\begin{aligned}\pi_d &= \pi_{dmax}\eta_r \\ \tau_c &= 1 + \frac{T_{t4}/T_0}{(T_{t4}/T_0)_R} \frac{(\tau_r)_R}{\tau_r} (\tau_c - 1)_R \\ \pi_c &= [1 + \eta_c(\tau_c - 1)]^{(\gamma_c/\gamma_c-1)} \\ \tau_\lambda &= \frac{c_{pt}T_{t4}}{c_{pc}T_0} \\ f &= \frac{\tau_\lambda - \tau_r\tau_c}{h_{PR}\eta_b/(c_pT_0) - \tau_\lambda} \\ \dot{m}_0 &= \dot{m}_{0R} \frac{p_0\pi_r\pi_d\pi_c}{(p_0\pi_r\pi_d\pi_c)_R} \sqrt{\frac{T_{t4R}}{T_{t4}}}\end{aligned}$$

Početna vrijednost π_{tLR}

$$\begin{aligned}\pi_{tL} &= \pi_{tLR} \\ \tau_{tL} &= 1 - \eta_{tL}(1 - \pi_{tL})^{(\gamma_t-1)/\gamma_t} \\ \frac{P_{t9}}{P_0} &= \pi_r\pi_d\pi_c\pi_b\pi_{tH}\pi_{tL}\pi_n\end{aligned}$$

Ako je $\frac{P_{t9}}{P_0} \geq \left(\frac{\gamma_t+1}{2}\right)^{\frac{\gamma_t}{\gamma_t-1}}$, onda je $M_9 = 1$, $\frac{P_{t9}}{P_9} = \left(\frac{\gamma_t+1}{2}\right)^{\frac{\gamma_t}{\gamma_t-1}}$ i $\frac{P_0}{P_9} = \frac{P_{t9}/P_9}{P_{t9}/P_0}$

$$\text{Inače, } \frac{P_0}{P_9} = 1 \quad \frac{P_{t9}}{P_9} = \frac{P_{t9}}{P_0} \quad \text{i} \quad M_9 = \sqrt{\frac{2}{\gamma_t-1} \left[\left(\frac{P_{t9}}{P_0}\right)^{(\gamma_t-1)/\gamma_t} - 1 \right]}$$

$$\pi_{tLN} = \pi_{tLR} \sqrt{\frac{\tau_{tL}}{\tau_{tLR}} \frac{MFP(M_{9R})}{MFP(M_9)}}$$

$$\frac{T_9}{T_0} = \frac{T_{t4}\tau_{tH}\tau_{tL}}{(P_{t9}/P_9)^{(\gamma_t-1)/\gamma_t}}$$

$$\frac{V_9}{a_0} = M_9 \sqrt{\frac{\gamma_t R_t T_9}{\gamma_c R_c T_0}}$$

$$C_C = (\gamma_c - 1)M_0 \left[(1 + f) \frac{V_9}{a_0} - M_0 + (1 + f) \frac{R_t T_9/T_0}{R_c V_9/a_0} \frac{1 - P_0/P_9}{\gamma_c} \right]$$

$$C_{prop} = \eta_{prop}\eta_g\eta_{mL}(1 + f)\tau_\lambda\tau_{tH}(1 - \tau_{tL})$$

$$C_{tot} = C_{prop} + C_C$$

$$\frac{F}{\dot{m}_0} = \frac{C_{tot}c_{pc}T_0}{V_0}$$

$$S = \frac{f}{F/\dot{m}_0}$$

$$\frac{\dot{P}}{\dot{m}_0} = C_{tot}c_{pc}T_0$$

$$S_p = \frac{f}{C_{tot}c_{pc}T_0}$$

$$F = \dot{m}_0 \left(\frac{F}{\dot{m}_0} \right)$$

$$\dot{P} = \dot{m}_0 \left(\frac{\dot{P}}{\dot{m}_0} \right)$$

$$\eta_P = \frac{C_{tot}}{C_{prop}/\eta_{prop} + [(\gamma_c - 1)/2][(1 + f)(V_9/a_0)^2 - M_0^2]}$$

$$\eta_T = \frac{C_{tot}c_{pc}T_0}{fh_{PR}}$$

$$\eta_0 = \eta_P\eta_T$$

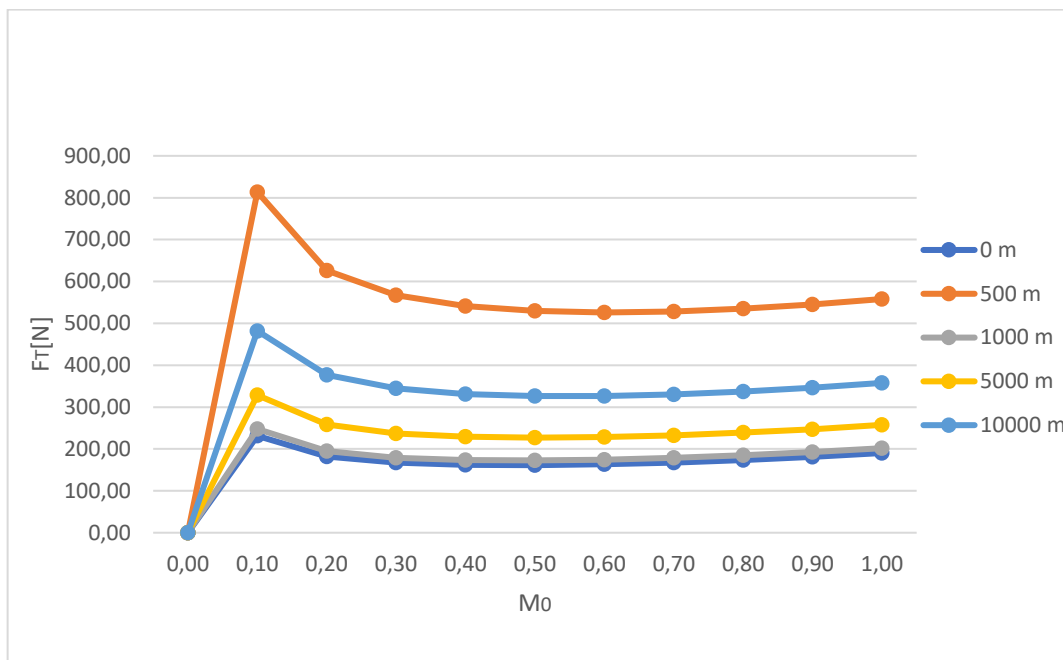
6.2 Analiza performansi u izvanprojektnim režimima rada

U ovom dijelu rada prikazani su rezultati proračunskog modela za izračun performansi turbo-elisnog mlaznog motora. Prikazane su analizirane performanse u skladu s mogućom misijom i uvjetima eksploatacije bespilotnog zrakoplova za čiji je pogonski sustav predviđen analizirani motor. Odabran je raspon visine od 0 do 10 000 m, a brzina od 0 do 1 Macha i analizira se utjecaj vanjske temperature kao parametra koji značajno utječe na potisak polijetanja. Pri određivanju performansi letjelice potrebno je uzeti u obzir gubitke ugradnje motora na zrakoplovu.

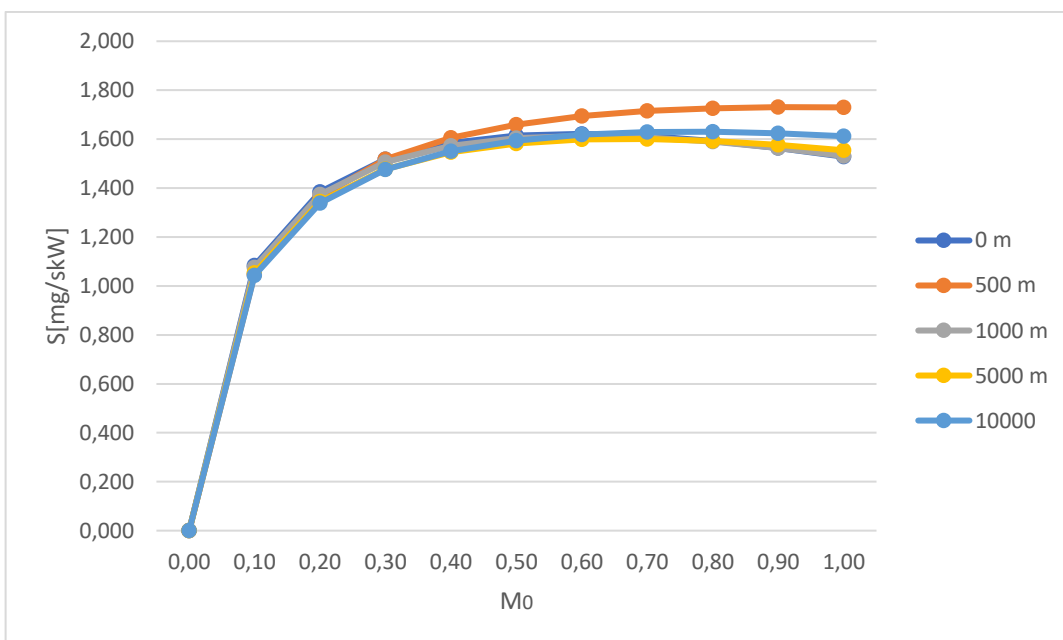
6.2.1 Utjecaj parametara eksploatacije na performanse motora pri krajnjem položaju poluge snage

Sljedeći dijagrami prikazuju performanse motora (potisak, specifičnu potrošnju goriva, maseni protok zraka, snagu, iskoristivost motora) i kako se mijenjaju s promjenom brzine

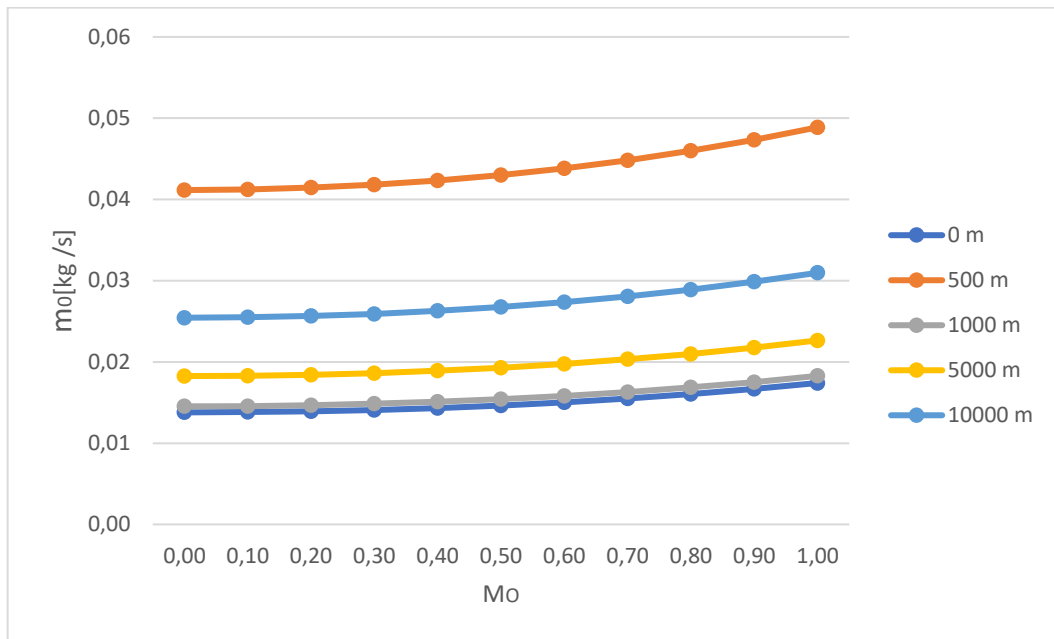
zrakoplova do $M=1$ u rasponu visine od 0 do 10 000 m. Temperatura na ulazu u turbinu iznosi 1363 K što odgovara maksimalnom položaju poluge potiska.



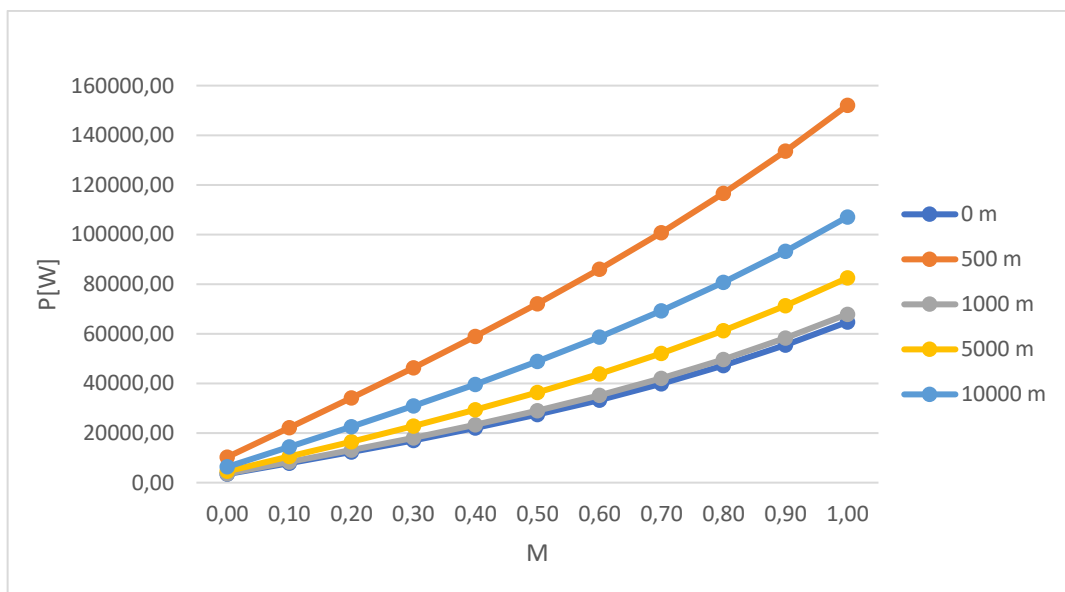
Slika 8. Utjecaj brzine zrakoplova na potisak mlaznog motora.



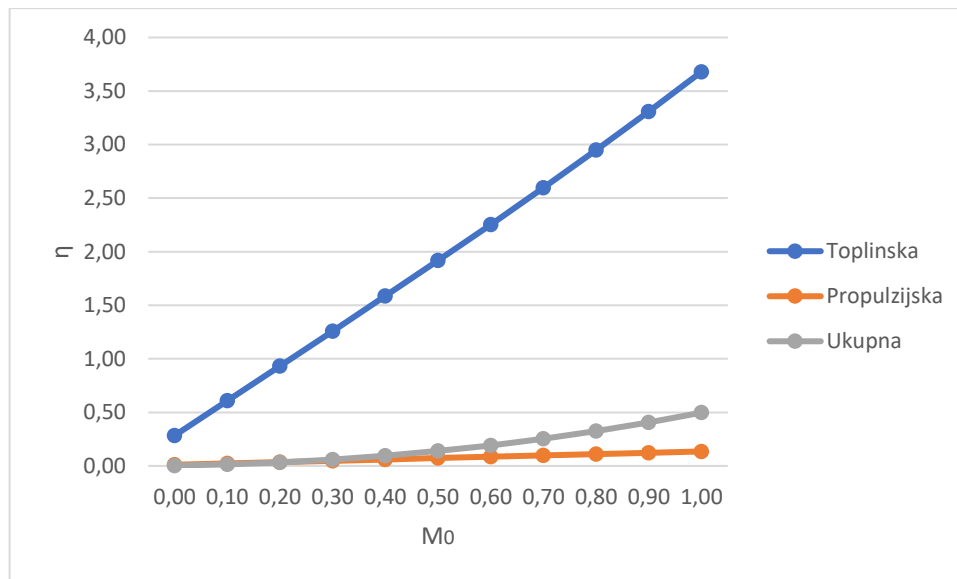
Slika 9. Utjecaj brzine zrakoplova na specifičnu potrošnju goriva.



Slika 10. Utjecaj brzine zrakoplova na maseni protok zraka.



Slika 11. Utjecaj brzine zrakoplova na snagu motora



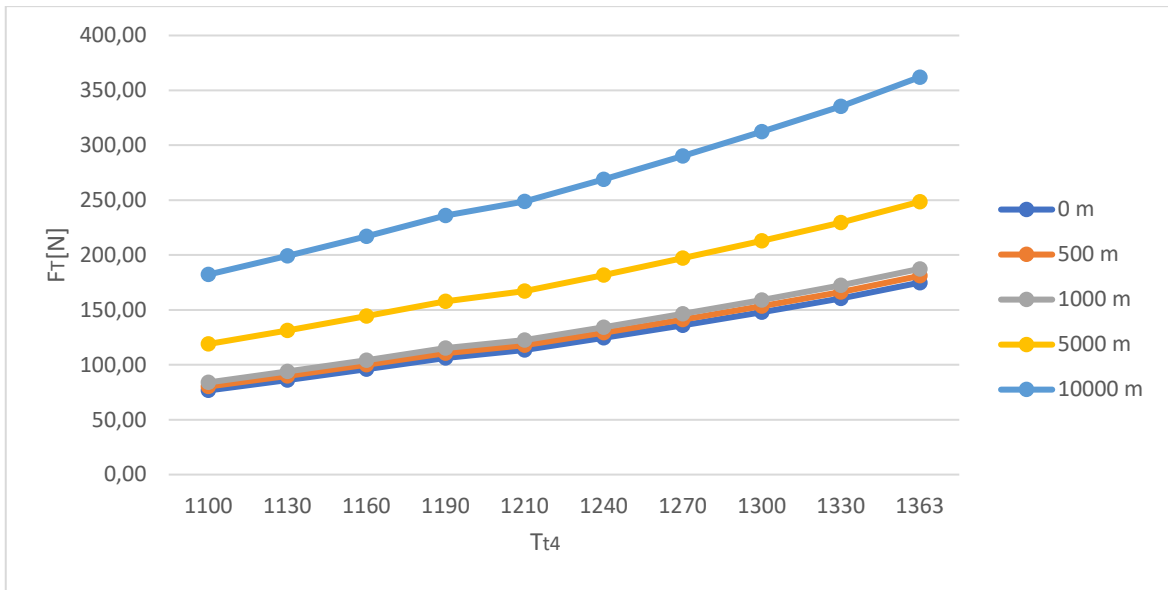
Slika 12. Utjecaj brzine zrakoplova na iskoristivost motora

Sve iskoristivosti motora pokazuju približne vrijednosti na svim visinama pa su zbog preglednosti grafa prikazane samo za visinu od 500 m.

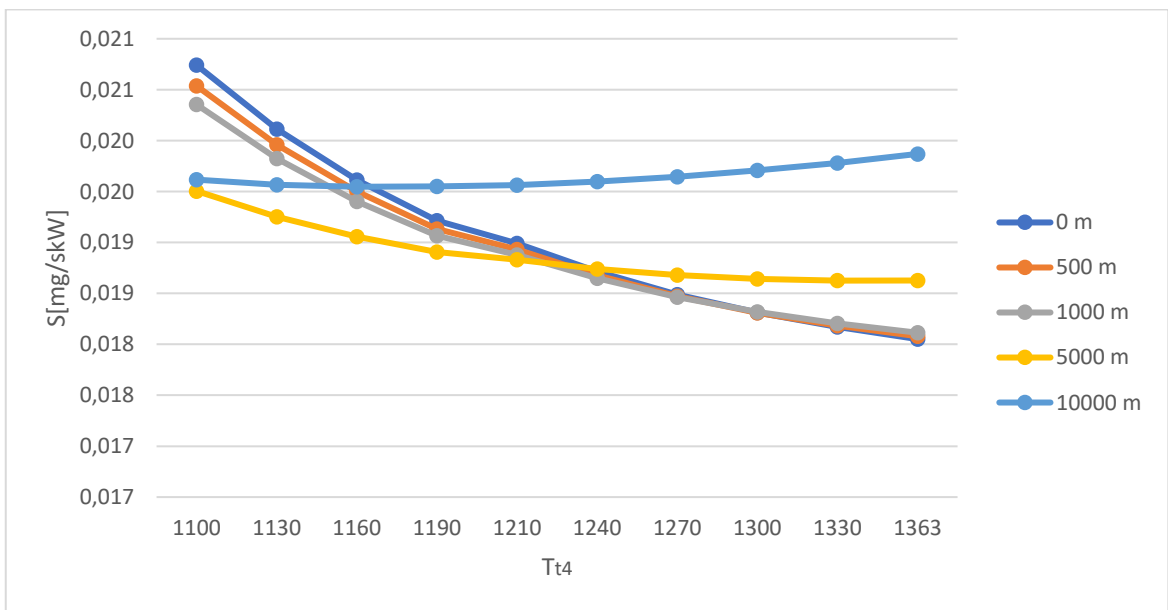
U prikazanim dijagramima (Slika 8, 9, 10, 11, 12) možemo vidjeti ponašanje turboelisanog motora s promjenom brzine na različitim visinama. U ovom proračunu je uzet raspon brzina do 1 Macha. Iz dijagrama je vidljivo da porastom visine pada tlak i temperatura, odnosno gustoća zraka pa s tim pada potisak, snaga, maseni protok zraka i specifična potrošnja goriva. Proporcionalno brzini zrakoplova raste specifična potrošnja goriva, snaga i maseni protok zraka dok se potisak zrakoplova blago smanjuje.

6.2.2 Utjecaj parametara eksploatacije na performanse motora pri različitim položajima poluge snage u režimu krstarenja

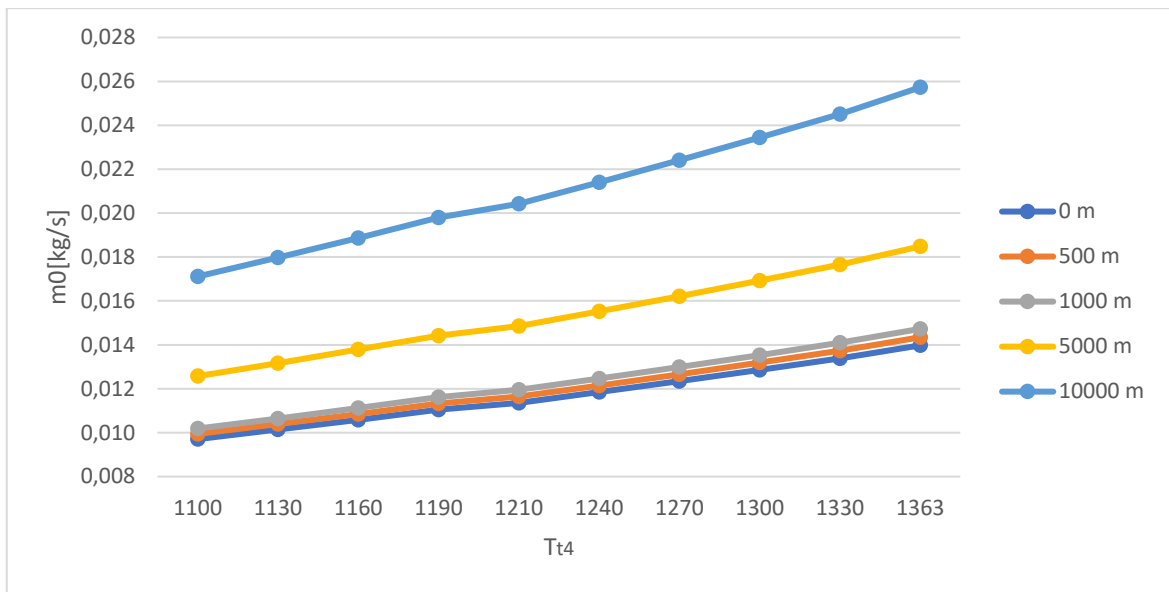
Mijenjanjem položaja poluge snage ograničava se temperatura produkta izgaranja na ulazu u turbinu. Kao maksimalna temperatura na ulazu u turbinu za motor *PT6A-135A* uzima se temperatura $T_{t4}=1363$ K. U sljedećim grafovima biti će prikazan utjecaj temperature na ulazu u turbinu od 1100 K do 1363 K na performanse motora za različite visine. Kao konstantna brzina odabrana je srednja brzina krstarenja od 0,24 Macha.



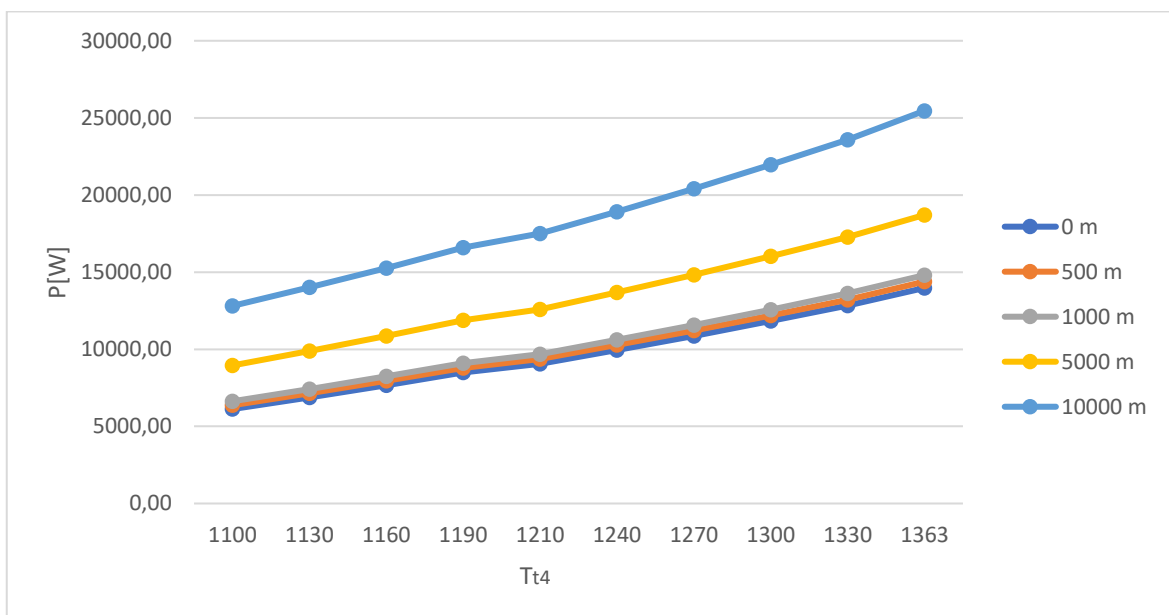
Slika 13. Utjecaj promjene položaja poluge snage na potisak motora



Slika 14. Utjecaj promjene položaja poluge snage na specifičnu potrošnju goriva.



Slika 15. Utjecaj promjene položaja poluge snage na maseni protok zraka.



Slika 16. Utjecaj promjene položaja poluge snage na snagu motora.

U prikazanim dijagramima (Slika 13, 14, 15, 16) vidljivo je ponašanje turbo-elisnog motora sa stalnom brzinom od 0,24 Macha pri različitim visinama leta. Analizom utjecaja promjene položaja poluge snage (odnosno promjene temperature produkata izgaranja na ulazu u turbinu) pri konstantnoj brzini može se primjetiti da se smanjenjem temperature potisak smanjuje, specifična potrošnja goriva povećava, maseni protok zraka je približno konstantan ali u blagom padu i snaga opada.

Zaključak

U oružanima sukobima diljem svijeta sve veću pozornost i utjecaj na vojne operacije imaju bespilotni zrakoplovi. Svjedoci smo njihovog velikog razvoja ne samo u tehnologiji i njihovim performansama nego i u načinu njihove upotrebe.

Većina tehnologije koju je razvila vojna industrija našla je svoju ulogu u civilnom sektoru, pa tako i bespilotni sustavi. Razvijaju se razne letjelice, ali za sada su to većinom manje letjelice koje služe za nadzor i za snimanje. Većinom se koriste sustavi koji su pogonjeni s električnim motorom.

Pogonski sustav, bilo to kod bespilotnih zrakoplova ili kod zrakoplova s posadom, jako utječe na performanse zrakoplova pa tako i na misiju za koju je taj zrakoplov namijenjen. Turbo-mlazni i turbo-ventilatorski motori imaju superiorne performanse pri velikim brzinama i sposobnosti letenja na velikim visinama. Zbog toga su prikladniji za primjenu u bespilotnim letjelicama za izviđanje na velikim visinama. Turbo-elisni motor karakterizira manja brzina i jednostavno održavanje. Može se također koristiti za misije izviđanja i nadzora, ali samo u civilne svrhe ili vojne gdje neprijatelj ne posjeduje moderne protuzračne sustave. Turbo-osovinski motori imaju usku primjenu i koriste se samo u helikopterima.

Imajući to u obziru kod biranja pogonskog sustava za bespilotni zrakoplov najviše nas uvjetuje misija tog zrakoplova. Kako je fokus ovog rada na mlaznim motorima i predviđena misija je misija izviđanja i nadzora, za izračun performansi izabran je turbo-elisni motor.

U ovom radu prikazan je matematički model turbo-elisnog motora i izrađeni su dijagrami ovisnosti potiska, snage, masenog protoka i specifične potrošnje goriva o brzini zrakoplova. Iz dijagrama je vidljivo da porastom visine pada tlak i temperatura, odnosno gustoća zraka pa s tim pada potisak, snaga, maseni protok zraka i specifična potrošnja goriva. Proporcionalno brzini zrakoplova raste specifična potrošnja goriva, snaga i maseni protok zraka dok se potisak zrakoplova blago smanjuje. Specifična potrošnja goriva i snaga linearno rastu povećanjem brzine, a smanjuju se povećanjem visine leta. Maseni protok je u početnom ubrzavanju gotovo konstantan,

Literatura

- [1] Federal Aviation Administration, Preuzeto s: <https://www.faa.gov/faq/what-unmanned-aircraft-system-uas>, [pristupljeno: 10. travnja. 2024.]
- [2] Republika Hrvatska. *Zakon o zračnom prometu. Izdanje: 92.* Zagreb: Narodne Novine; 2014.
- [3] NATO Research and Technology Organization, compilation of edited proceedings of the „Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications,“ course, April 2000. Preuzeto s: [file:///C:/Users/Korisnik/Downloads/EN-009-\\$\\$ALL.PDF](file:///C:/Users/Korisnik/Downloads/EN-009-$$ALL.PDF) [pristupljeno: 1. lipnja 2024]
- [4] Nourmohammadi A, Jafari M, Zander T O A, *Survey on Unmanned Aerial Vehicle Remote Control Using Brain–Computer Interface.* IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst. 2018, 48, 337–348.
- [5] Kanellakis C, Nikolakopoulos G, *Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends.* J. Intell. Robot. Syst. 2017, 87, 141–168.
- [6] Polaris market research, Preuzeto s: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/commercial-uav-market/request-for-sample> [pristupljeno: 05. svibnja 2024.]
- [7] Bagarić T, *Bespilotne letjelice - od izvidničkog sredstva do borbenog zrakoplova strateške važnosti,* *Hrvatski vojnik*, broj 94, travanj 2003. Zagreb.
- [8] National Library of Scotland, preuzeto s: <http://digital.nls.uk/first-world-war-official-photographs> [pristupljeno: 06. svibnja 2024]
- [9] USAF helicopter pilot association, pristupljeno s: <http://usafhpa.org> [pristupljeno: 10. svibnja 2024.]
- [10] Bernauw K, *Drones: The Emergine Era of Unmanned Civil Aviation,* Pravni fakultet Sveučilišta u Gentu, Ghent, Belgija.
- [11] PennState, pristupljeno s: <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5> [pristupljeno: 15. svibnja 2024.]
- [12] Mitridis D, Kapsalis S, Terzis D, Panagiotou P, *An Evaluation of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Trends and Correlations with Respect to NATO Classification,*

- Region, EIS Date and Operational Specifications. *Aerospace* 2023, 10, 382. Preuzeto s: <https://doi.org/10.3390/aerospace10040382> [pristupljeno: 20. svibnja 2024.]
- [13] The Joint JAA/EUROCONTROL Initiative on UAVs: UAV TASK Force Final report, A concept for European regulations for unamned Aerial vehicles, 2004.
- [14] Zhang, B.; Song, Z.; Zhao, F.; Liu, C. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies* 2022,15,455.
- [15] Meić-Sidić A, *Analiza letnih značajki bespilotne letjelice Extra 330I, Diplomski rad*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2021.
- [16] Hrvatski vojnik, 26. svibnja 2023. broj 683. str 48.
- [17] Skrzypietz T, Unmanned Aircraft Systems for Civilian Missions, *BIGS*, Branderburg Institute for society and securty, Branderburg, 2012.
- [18] Nelson, J. R.; Dix, D., M.. Development of Engines for Unmanned Air Vehicles: Some Factors To Be Consider, Institute For Defense Analyses, Virginia, 2003.
- [19] Gas Turbine Engine Performance Station Identification and Nomenclature, ARP 755 A, SAE, Warrendale, PA, 1974.
- [20] European Union Aviation Safety Agency–Type-certificate date sheet, pristupljeno s: [file:///C:/Users/Korisnik/Desktop/nova%20lit/EASA IM.E.094 TCDS Issue 3 2023of](file:///C:/Users/Korisnik/Desktop/nova%20lit/EASA_IM.E.094_TCDS_Issue_3_2023of) [pristupljeno: 20. lipnja 2024.]
- [21] Mattingly J D, Heiser W H, Pratt, D.T. *Aircraft Engine Desing Second Edition*, AIAA Education Series, Virginia, 2002.
- [22] Domitrović A, *Proračun izvanprojektnih režima rada turbomlaznog motora*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2002.

Popis slika

Slika 1. Arhitektura UAV sustava [5].....	3
Slika 2. Tržište komercijalnih UAV-a Sjeverne Amerike [6].	3
Slika 3. Prikaz Britanskog izvidnički balon iz vremena prvog Svjetskoga rata [8].	5
Slika 4. Беспилотни зракоплов америчке производње ознаке AQM-34, (упораба- Вијетнамски рат) [9].....	7
Slika 5. Tipovi mlaznih motora. A) turbo-mlazni; b) turbo-ventilatorski; c) turbo-elisni; d) turbo-osovinski [15].....	22
Slika 6. Nabojno mlazni motor[14]	23
Slika 7. Osnovne pozicije po RAP standardu[19]	36
Slika 8. Utjecaj brzine zrakoplova na potisak mlaznog motora.	43
Slika 9. Utjecaj brzine zrakoplova na specifičnu potrošnju goriva.	43
Slika 10. Utjecaj brzine zrakoplova na maseni protok zraka.	44
Slika 11. Utjecaj brzine zrakoplova na snagu motora	44
Slika 12. Utjecaj brzine zrakoplova na iskoristivost motora	45
Slika 13. Utjecaj promjene položaja poluge potiska na potisak motora	46
Slika 14. Utjecaj promjene položaja poluge potiska na specifičnu potrošnju goriva.	46
Slika 15. Utjecaj promjene položaja poluge potiska na maseni protok zraka.	47
Slika 16. Utjecaj promjene položaja poluge potiska na snagu motora.	47

Popis tablica

Tablica 1. Kategorizacija prema Ministarstvu obrane SAD-a	11
Tablica 2. NATO RTO klasifikacija беспилотних зракоплова.	14
Tablica 3. Karakteristike motora na fosilna goriva.	19
Tablica 4. Podjela mlaznih motora prema masi i potisku.....	32
Tablica 5. Prednosti i nedostaci četiri tipa mlaznih motora.....	33
Tablica 6. Veličine korištene u proračunu.....	36

Popis oznaka

a m/s brzina zvuka

c_{pc} $J/(kgK)$ specifična toplina zraka

c_{pt} $J/(kgK)$ specifična toplina plinova izgaranja

f kg/kg omjer gorivo/zrak

F_T N potisak

H_d $J/(kgK)$ donja ogrjevna vrijednost goriva

M Machov broj

MFP parametar masenog protoka

\dot{m}_f kg/s maseni protok goriva

\dot{m}_0 kg/s maseni protok zraka

p Pa statički tlak

p_t Pa totalni tlak

R_c $J/(kgK)$ plinska konstanta za zrak

R_t $J/(kgK)$ plinska konstanta za plinove izgaranja

SFC specifična potrošnja goriva

T K statička temperatura

T_t K totalna temperatura

V_0 m/s brzina zrakoplova

V_9 m/s brzina ispušnih plinova

π omjer tlakova

τ omjer temperatura

η iskoristivost komponenata

INDEKSI

R referentno stanje

- r slobodna struja zraka
- d uvodnik (diffusor)
- c kompresor (compressor)
- b komora izgaranja (burner)
- t turbina (turbine)
- n mlaznik (nozzle)
- m mehaničko (mechanical)
- g reduktor (gearbox)

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ diplomski rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom _____ Eksploatacijske i tehničke značajke mlaznih motora za bespilotne zrakoplove _____, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZJR.

Student/ica:

U Zagrebu, _____ 28.08.2024

Josip Peraić
(ime i prezime, potpis)