

# Odabir bespilotne letjelice primjenom podrške odlučivanja

---

Ivković, Ivona

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:537665>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivona Ivković**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Predrag Čosić, dipl. ing.

Student:

Ivona Ivković

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Predragu Ćosiću na vodstvu, podršci i beskrajnom strpljenju, dipl. ing. Maji Trstenjak na usrdnoj pomoći pri pisanju ovog rada, prof.dr.sc. Milanu Vrdoljaku na nesebičnom dijeljenju vlastitog stručnog znanja i vremena, te g. Bože Šariću, dipl. oec. iz tvrtke Plurato na odgovorima i suradnji.

Ivona Ivković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivona Ivković**

Mat. br.: 0035108826

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Odabir vrste bespilotne letjelice primjenom podrške odlučivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Selection of the Unmanned Aerial Vehicle Using Decision Support**

Opis zadatka:

U radu dati kratku povijest razvoja bespilotnih letjelica, značajke letjelica (pogon, snaga motora, masa letjelice, primijenjene materijale, nosivost letjelice, način upravljanja letjelice, doseg letjelice, područje primjene), najpoznatije proizvođače, zaključak, literatura. Naznačiti važnost odabira vrste letjelice obzirom na civilnu, pretpostavljenu primjenu. Opisati ukrajno područje višekriterijalnog optimiranja te razvijene sustave potpore odlučivanju. Opisati AHP metodu odlučivanja, Saatijevu skalu i sl. te rezultate primjene IT aplikacije Expert Choice. Analizirati rezultate te temeljem gornjih postavki, razraditi kriterijski sustav i moguće scenarije. Kritički razmotriti dobijene rezultate te mogućnosti validacije istih.

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zdao:

Prof.dr.sc. Predrag Čosić

Rok predaje rada:

**1. rok:** 24. veljače 2017.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.

**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.

**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.

**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| POPIS SLIKA .....   | IV   |
| POPIS TABLICA.....  | VI   |
| POPIS OZNAKA .....  | VII  |
| POPIS KRATICA .....   | VIII |
| SAŽETAK.....  | X    |
| SUMMARY .....   | XI   |
| 1 UVOD.....   | 1    |
| 1.1 Nazivlje: bespilotna letjelica, dron, UAV .....                                       | 1    |
| 1.2 Odabir nove tehnologije za konkurentnost na tržištu.....                              | 2    |
| 2 BESPILOTNE LETJELICE .....  | 3    |
| 2.1 Kratka povijest bespilotnog leta [1], [7] .....                                       | 3    |
| 2.2 Prodor u civilni sektor [1], [4], [7].....  | 5    |
| 2.3 Klasifikacija bespilotnih letjelica [1], [4], [15], [16] .....                        | 8    |
| 2.3.1 Klasifikacija prema masi [16] .....   | 8    |
| 2.3.2 Klasifikacija prema istrajnosti i dometu [16].....                                  | 9    |
| 2.3.3 Klasifikacija prema maksimalnoj visini leta [1], [16].....                          | 9    |
| 2.3.4 Klasifikacija prema vrsti motora [16] .....   | 10   |
| 2.3.5 Klasifikacija prema konstrukciji [1], [15], [17] .....                              | 11   |
| 2.3.6 Klasifikacija bespilotnih letjelica prema stupnju autonomnosti [15], [20] .....     | 12   |
| 2.3.7 Ostale klasifikacije.....   | 16   |
| 2.4 Zakonski okviri .....   | 18   |
| 2.4.1 Sjedinjene Američke Države [23], [24] .....   | 19   |
| 2.4.2 Europa i svijet [25], [26], [27], [28].....   | 19   |
| 2.4.3 Hrvatska [30] .....   | 20   |
| 2.5 Konfiguracije i sustavi bespilotnih letjelica.....                                    | 22   |
| 2.5.1 Konfiguracija [1], [7] .....  | 22   |
| 2.5.2 Pogonski sustavi za bespilotne letjelice [7], [34], [37] .....                      | 27   |
| 2.5.3 Avionika bespilotne letjelice i korisni teret (senzori) [1], [15], [41], [42] ..... | 31   |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.6   | Materijali [7], [44].....  | 34 |
| 2.7   | Modularnost sustava [37].....  | 35 |
| 3     | Analiza konfiguracija bespilotnih letjelica i pregled tržišta .....  | 36 |
| 3.1   | Komercijalna uporaba bespilotnih letjelica [7], [17] [46], [47]..... | 36 |
| 3.2   | Odluka o odabiru letjelice za specifičnu namjenu .....               | 39 |
| 3.2.1 | Razmatranja o komercijalnim konfiguracijama letjelica [1], [7].....  | 40 |
| 4     | VIŠEKRITERIJSKO ODLUČIVANJE I SUSTAVI POTPORE ODLUČIVANJU .....      | 42 |
| 4.1   | Višekriterijsko odlučivanje [50], [51].....                          | 42 |
| 4.2   | Analitičko-hijerarhijski proces – AHP metoda [51], [52], [53].....   | 43 |
| 4.3   | Sustavi za potporu odlučivanju – DSS [50], [55] .....                | 46 |
| 4.4   | Softverski paket Expert Choice [56], [54] .....                      | 47 |
| 5     | Odabir bespilotne letjelice primjenom AHP metode.....                | 48 |
| 5.1   | Analiza komercijalno dostupnih letjelica.....                        | 48 |
| 5.2   | Kriteriji za odabir bespilotne letjelice .....                       | 51 |
| 5.2.1 | Konfiguracija .....  | 52 |
| 5.2.2 | Maksimalna težina pri polijetanju (MTOW) .....                       | 52 |
| 5.2.3 | Istrajnost leta .....  | 52 |
| 5.2.4 | Maksimalna visina leta.....  | 52 |
| 5.2.5 | Cijena .....   | 52 |
| 5.2.6 | Korisni teret.....   | 53 |
| 6     | ZAKLJUČAK.....   | 61 |
|       | PRILOZI.....   | 65 |

## POPIS SLIKA

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Slika 2.1  | Hewitt-Sperry Automatic Airplane (1916.) [8].....  | 3  |
| Slika 2.2  | Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk [9] .....  | 4  |
| Slika 2.3  | Letjelica Helios tvrtke AeroVironment, Inc [1] .....   | 5  |
| Slika 2.4  | VTOL UAV Yamaha R-MAX u uporabi [2] .....  | 6  |
| Slika 2.5  | DJI Phantom 4 Pro [14].....  | 7  |
| Slika 2.6  | LALE/LASE letjelice: prva sprijeda je RQ-11A Raven; slijeva nadesno u drugom redu su Evolution i Dragon Eye; u trećem redu slijeva nadesno su NASA FLIC, Arcturus T-15 i Skylark, a u posljednjem redu su letjelice RQ-2B Pioneer, Tern i Neptune [1]..... | 10 |
| Slika 2.7  | HTOL letjelica (s fiksnim krilima) Lancaster 5 tvrtke Precision Hawk (gore) i VTOL letjelica (s rotorima) Matrice 600 tvrtke DJI [18], [19].....   | 12 |
| Slika 2.8  | Zakonski okviri za UAV sustave u 15 zemalja svijeta [22] .....   | 18 |
| Slika 2.9  | Kategorije letačkih operacija za RH [30] .....   | 21 |
| Slika 2.10 | BWB dizajn letjelice eBee tvrtke SenseFly [36].....  | 23 |
| Slika 2.11 | Upravljanje heksakopterom pomoću smjera vrtnje rotora (CW - u smjeru kazaljke na satu, CCW - u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu) [32] .....   | 25 |
| Slika 2.12 | Upravljanje oktokopterom pomoću smjera vrtnje rotora (CW - u smjeru kazaljke na satu, CCW - u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu) [32] .....  | 25 |
| Slika 2.13 | Bell Eagle Eye Tiltrotor [35].....   | 26 |
| Slika 2.14 | Usidrena HiperSfera [37] .....   | 27 |
| Slika 2.15 | Pogonski sustavi bespilotnih letjelica [39] .....  | 28 |
| Slika 2.16 | Penguin C (UAV Factory), MALE letjelica trajanja leta do 20 h [38] .....   | 29 |
| Slika 2.17 | Letjelica Yeair s četiri rotora i hibridnim pogonom (prototip) [39].....   | 30 |
| Slika 2.18 | Dizajn upravljačkog letnog sustava male letjelice s pogonskom baterijom [15]..   | 31 |
| Slika 2.19 | Povećana situacijska svjesnost bespilotne letjelice Albris, tvrtke SenseFly [43]   | 34 |
| Slika 2.20 | Letjelica Atlasus koja se isporučuje rastavljena u prenosivom koferu [45].....   | 35 |
| Slika 3.1  | Mapirana fotografija cesta (lijevo) i ortomozaik i DSM model (desno) [42] .....  | 37 |
| Slika 3.2  | Vodećih 20 tvrtki na tržištu bespilotnih letjelica u trećem kvartalu 2016 [49]....   | 38 |
| Slika 4.1. | Strukturiranje hijerarhije donošenja odluke AHP metodom [51] .....   | 43 |
| Slika 4.2  | Numerička usporedba važnosti elemenata u programu Expert Choice.....   | 47 |



---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 4.3 | Grafička usporedba važnosti elemenata u programu Expert Choice .....                            | 47 |
| Slika 5.1 | Prikaz kriterija i alternativa .....  | 53 |
| Slika 5.2 | Usporedba važnosti kriterija pomoću Saatyjeve skale .....                                       | 55 |
| Slika 5.3 | Poredak kriterija prema važnosti .....  | 55 |
| Slika 5.4 | Postupak rangiranja alternativa s obzirom na kriterij (prikaz s obzirom na MTOW) .....          | 56 |
| Slika 5.5 | Prikaz rezultata rangiranja alternativa .....   | 56 |
| Slika 5.6 | Analiza dobivenih rezultata .....   | 57 |
| Slika 5.7 | Analiza rezultata s promijenjenim odnosom alternativa i konfiguracije (preferira se HTOL) ..... | 58 |
| Slika 5.8 | Prikaz rezultata s promijenjenom važnosti kriterija .....                                       | 59 |
| Slika 5.9 | Prikaz rezultata s promijenjenim odnosom kriterija i alternativa .....                          | 59 |

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 2.1 Razine autonomije [20] .....                                       | 17 |
| Tablica 4.1 Saatyjeva skala relativnih važnosti s opisom značenja [51] .....   | 44 |
| Tablica 4.2 Vrijednosti RI slučajnih indeksa [54].....                         | 45 |
| Tablica 5.1 Analiza letjelica dostupnih na komercijalnom tržištu .....         | 49 |
| Tablica 5.2 Karakteristike letjelica kao kriteriji za odabir alternative ..... | 51 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>OZNAKA</b>                          | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>   |
|--|-----------------|---|
| $CI = \frac{\Lambda_{max} - n}{n - 1}$ | -               | indeks konzistentnosti  |
| n                                      | -               | broj kriterija  |
| $\Lambda_{max}$                        | -               | konstanta za izračun indeksa konzistentnosti<br>(svojstvena vrijednost) |
| RI                                     | -               | slučajni omjer konzistentnosti  |
| CR                                     |                 | omjer konzistencije   |

## POPIS KRATICA

| <b>KRATICA</b> | <b>Pojam na engleskom jeziku</b>                      | <b>Pojam na hrvatskom jeziku/opis</b>                                       |
|----------------|---|---|
| AHP            | Analytic Hierarchy Process                            | analitički hijerarhijski proces   |
| BLOS           | Beyond Line of Sight                                  | izvan vidnog polja  |
| BVLOS          | Beyond Visual Line of Sight                           | izvan granica vidnog polja  |
| BWB            | Blended Wing Body                                     | konfiguracija spoja krila i trupa   |
| DEM            | Digital Elevation Model                               | digitalni elevacijski model terena  |
| DOW            | Dry Operating Weight                                  | težina letjelice bez goriva   |
| DSM            | Digital Surface Model                                 | digitalni model terena  |
| DSS            | Decision Support System                               | sustav potpore odlučivanju  |
| E/O            | Electro/Optical                                       | elektro/optički   |
| EM             | Electro-Magnetic                                      | elektromagnetski  |
| ERAST          | Environmental Research Aircraft and Sensor Technology | Program za letjelice za istraživanja okoliša i senzorsku tehnologiju (NASA) |
| FAA            | Federal Aviation Agency                               | američka agencija FAA   |
| GCP            | Ground Control Point                                  | Točka zemljane kontrole   |
| GIS            | Geographic Information System                         | Geografski informacijski sustav   |
| GPS            | Global Positioning System                             | Globalni sustav pozicioniranja  |
| HALE           | High-Altitude Long Endurance                          | velika visina i duga istrajnost leta  |
| HD             | High Definition                                       | visoka rezolucija   |
| HTOL           | Horizontal Take-Off and Landing                       | horizontalno uzlijetanje i slijetanje                                       |
| INS            | Inertial Navigation Systems                           | inercijski navigacijski sustavi   |
| IoT            | Internet of Things                                    | „Internet stvari“   |
| LADAR          | Laser Detection and Ranging                           | laserski radar  |
| LALE           | Low-Altitude Long Endurance                           | mala visina i duga istrajnost leta  |
| LASE           | Low-Altitude Short Endurance                          | mala visina i kratka istrajnost leta  |
| LIDAR          | Light Detection and Ranging                           | optički radar   |
| LOS            | Line of Sight   | vidno polje, linija pogleda   |
| MALE           | Medium-Altitude Long Endurance                        | srednja visina i duga istrajnost leta                                       |

---

|       |   |  |
|-------|---|--|
| MAV   | Micro/Miniature Aerial Vehicle                | mikro/mini (bespilotna) letjelica  |
| MTOW  | Maximum Take-off Weight                       | najveća težina polijetanja   |
| NASA  | National Aeronautics and Space Administration | američka agencija za zrakoplovstvo i svemirski let                                       |
| OM    | Operativna masa                               | težina letjelice s gorivom   |
| RADAR | Radio Detection and Ranging                   | radar  |
| RC    | Remote Control                                | daljinski upravljano   |
| RPA   | Remotely Powered Aircraft                     | daljinski upravljana letjelica   |
| RPAS  | Remotely Powered Aircraft System              | sustav daljinski upravljane letjelice  |
| SES   | Single European Sky                           | Jedinstveno europsko nebo  |
| sUAS  | Small Unmanned Aerial System                  | mala bespilotna letjelica, često se zbog karakteristika poistovjećuje s LASE letjelicama |
| UAS   | Unmanned Aerial System                        | sustav bespilotne letjelice  |
| UAV   | Unmanned Aerial Vehicle                       | bespilotna letjelica   |
| VLOS  | Visual Line Of Sight                          | unutar granica vidnog polja  |
| VTOL  | Vertical Take-Off and Landing                 | vertikalno uzlijetanje i slijetanje  |

## SAŽETAK

U ovom radu predstavljena je analiza sustava i konfiguracija civilnih i profesionalnih komercijalnih bespilotnih sustava letjelica i pregled stanja tržišta bespilotnih letjelica u komercijalnom sektoru danas, te je temeljem prikupljenih informacija izvršen i opisan postupak odabira vrste bespilotne letjelice primjenom računalne podrške odlučivanju. Ovaj rad ne sadrži detaljno ispitivanje tržišta, već se bavi analizom sustava bespilotnih letjelica dostupnih na današnjem tržištu i analizom postojećeg stanja na tržištu. Tom analizom utvrdit će se najpogodniji tipovi bespilotnih letjelica za komercijalnu primjenu s obzirom na njihove namjene i tražene performanse, a analiza ključnih karakteristika prema njihovoj namjeni utemeljit će kriterije za odabir. Odabir će se izvršiti analitičko-hijerarhijskim procesom donošenja odluka (AHP metodom) pomoću softverskog paketa *Expert Choice*.

Ključne riječi: bespilotna letjelica, dron, UAV, odabir letjelice, karakteristike letjelice, podrška odlučivanju, analitičko-hijerarhijski proces, *Expert Choice*

## SUMMARY

This paper presents an analysis of various systems and configurations of unmanned aerial systems used for civil and commercial purposes and an overview of the state of the market of unmanned aerial vehicles in the commercial sector today. Based on collected and described information, the decision for selection of a type of the unmanned aircraft system was derived using and applying (computer) decision support system. This paper does not contain detailed market research, but instead considers the analysis of unmanned aviation systems available on the present market and an analysis of the current state of the market. This analysis will identify the most suitable type of unmanned aerial vehicle for commercial applications with regard to its intended use and required performance characteristics. The analysis of key features of these systems will establish the selection criteria. The selection will be made through an analytic hierarchy process (AHP) in the software package *Expert Choice*.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, drone, UAV, selection of UAV, UAV characteristics, Decision Support System, Analytical Hierarchy Process, *Expert Choice*

## 1 UVOD

Bespilotne su letjelice (eng. *Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) još prije samo desetak godina bile namijenjene gotovo isključivo vojnoj industriji, znanstvenoj zajednici te manjim skupinama entuzijastičnih modelara i hobista. Nagli razvoj i minijaturizacija tehnologije koja podržava ove sustave (pametni telefoni, senzori, kamere, grafički i procesorski čipovi, baterije, softver i sustavi za prikupljanje i analizu podataka, podaci u oblaku ili tzv. *cloud computing*,) i istodobna komercijalizacija sve profesionalnije i kvalitetnije opreme (donedavno nedostupne širem tržištu) omogućili su usporedni razvoj sustava bespilotnih letjelica i njihov prodor u komercijalni civilni sektor. Usprkos brojnim legislativnim, etičkim i tehnološkim izazovima, bespilotne letjelice nalaze svoju primjenu u sve širem spektru civilnog djelovanja: od entuzijastičnih hobista, preko profesionalaca iz svijeta filmske industrije i fotografije, do državne uprave (službe spašavanja i sigurnosti, nadzor šuma i šumskih požara) i primjene u preciznoj poljoprivredi i nadzoru usjeva te od strane velikih energetske tvrtki, građevinske industrije, naftne industrije i znanstveno-istraživačke zajednice.

### 1.1 Nazivlje: bespilotna letjelica, dron, UAV

Izraz „dron“ populariziran je usprkos protivljenju stručnih zajednica diljem svijeta, prvenstveno zahvaljujući modernim letećim igračkama na daljinsko upravljanje, odnedavno dostupnim i na našem tržištu. U ovom se radu izrazi „bespilotne letjelice“, „dronovi“ i „UAV“ koriste kao istoznačnice, na jednak način na koji se ti pojmovi izjednačuju i u engleskom govornom području (*Unmanned Aerial Vehicles* – UAV, *Unmanned Aerial Systems* - UAS, *Remotely Piloted Aircraft* – RPA, *Remotely Piloted Aircraft Systems* – RPAS, *drones*). Neki američki autori ([1], [2]) ističu razlike između pojmova RPA i UAV prema stupnju autonomnosti: pojam RPA označava letjelice koje su u potpunosti neautonomne, daljinski upravljane (tj. letjelice kojima se upravlja unutar vidnog polja operatera, eng. VLOS – *Visual Line Of Sight*), a UAV letjelice koje mogu imati različite stupnjeve autonomije; potom između pojmova UAV i UAS – prvi pojam označava samu letjelicu, a drugi cjeloviti sustav potreban za izvršenje određene misije. Europske smjernice za pravila o bespilotnim



letjelicama ( [3]) ostavljaju korištenje terminologije svakoj zemlji na izbor, jednako kao i izbor regulativa i zakona za integraciju bespilotnih letjelica u civilni zračni prostor.

## **1.2 Odabir nove tehnologije za konkurentnost na tržištu**

Tržište tehnologija povezanih s UAV sustavima je široko, već sada vrlo razgranato i s mnoštvom neostvarenih potencijala. Mnoge velike tvrtke u raznim poljima industrije, građevine, poljoprivrede i šumarstva već su prepoznale uštedu vremena i operativnih troškova koju im omogućava primjena sustava bespilotnih letjelica u nadzoru, inspekciji te prikupljanju i analizi važnih podataka. [4] Međutim, UAV tehnologija nije više dostupna samo velikim igračima: dronovi su malo-pomalo prodrli u našu sadašnjost. U Hrvatskoj je do travnja 2017. godine bilo registrirano ukupno 340 tvrtki koje u svom poslovanju koriste dronove [5] (primjerice, tvrtka Belje od 2016. godine koristi dronove za preciznu poljoprivredu, [6]). U takvom je tržišnom okruženju odluka za uvođenje dronova u poslovanje, ili čak pokretanje vlastitog poslovanja s bespilotnim letjelicama i njihovim sustavima logičan poduzetnički pothvat.

U utrci za tržišnu konkurentnost uporaba bespilotnih letjelica ima sve veću važnost: one omogućavaju brzo i jednostavno prikupljanje podataka iz zraka pomoću kojih je moguće uštedjeti sate i dane rada ili analizirati podatke s fizički nepristupačnih područja. Zahvaljujući tome bespilotne letjelice svoju su primjenu našle u gotovo svim gospodarskim i industrijskim granama. Pravilan odabir tehnologije (u ovom radu: bespilotne letjelice) koja će na najbolji mogući način zadovoljiti specifične zahtjeve tvrtke ili klijenta jamčit će ostanak tvrtke u utrci za moguću prednost na komercijalnom tržištu proizvoda i usluga.

## 2 BESPILOTNE LETJELICE

### 2.1 Kratka povijest bespilotnog leta [1], [7]

Leteći strojevi golicaju ljudsku maštu od pamtivijeka – a neke njihove izvedbe sežu u daleku prošlost, kakva je primjerice kineska igračka iz 5.st.pr.n.e., koja je mimikirala autorotacijska gibanja zapažena u prirodi – pad sjemena javora. Prvi baloni s ljudskom posadom odvojili su se od zemlje krajem 18. stoljeća (braća Montgolfier), a 1917. Tesla postavlja temelje tehnologije daljinskog upravljanja, ključne za današnji razvoj bespilotnih letjelica. Povijest leta je ujedno i povijest modernog ratovanja: 1849. godine austrijske su snage iskoristile balone s eksplozivom za napad na Veneciju. Pokušaj nije uspio: iako su neki baloni uspješno stigli na cilj, neki su se, nošeni zračnim strujama, vratili i eksplodirali iznad austrijskih vojnih linija. Ovaj gotovo ljupki vojni promašaj svoje nastavke dobiva razvojem zrakoplovne tehnologije u razdobljima Prvog i Drugog svjetskog rata, kada zaraćene strane pokušavaju iznjedruti tehnološku, a time i vojnu prednost na sve domislive načine - pa tako i razvojem sustava letjelica za let bez ljudske posade, upravljanih sa zemlje.



Slika 2.1 Hewitt-Sperry Automatic Airplane (1916.) [8]

Primjeri su takvih ranih sustava Hewitt-Sperry Automatic Airplane iz 1916. (Slika 2.1), letuća bomba namijenjena presretanju cepelina, zračni torpedo Kettering Bug (Liberty Eagle) iz 1918, te tzv. „majka svih dronova“ - zračna meta Queen Bee iz 1926, Reginald Dennyjeva daljinski upravljana zračna meta Radioplane OQ-2 iz 1939., navođeni zračni projektili RAE 1921 Target, TDR-1, te drugi više ili manje uspješni pokušaji koji su pretežno počivali na modifikaciji zrakoplova sa zračnom posadom u bespilotne sustave. Radioplane OQ-2 je bio prva bespilotna letjelica koja je krenula u serijsku proizvodnju za američko vojno tržište (za vrijeme Drugog svjetskog rata proizvedeno je oko 15000 jedinica).

Razdoblje hladnog rata i Vijetnamskog rata te utrka u naoružanju iznjedrili su mnogo tipova zračnih projektila i bespilotnih letjelica (Northropove BQM i MQM Chukkar serije, Ryan Firebee AQM-34, izraelski Tadiran Mastiff), s namjenom prilagođenom mirnodopskim uvjetima: izviđanje i tzv. *dull, dirty and dangerous* (dosadne, prljave i opasne) misije. Najpoznatiji modeli za nadzor i izviđanje, verzije kojih su i danas u aktivnoj vojnoj upotrebi, su AAI RQ-2 Pioneer, Predator (serije MQ i RQ-1L), Northrop Grummanov RQ-4 Global Hawk (Slika 2.2) te Hunter IAI RQ-5.



Slika 2.2 Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk [9]

U studenom 2002. uloga bespilotnih letjelica u ratovanju zauvijek je promijenjena kada je CIA iskoristila letjelicu Predator MQ-1 za ubilački napad na 6 članova al-Qaede u Jemenu - bez podrške vojnika sa zemlje. [10] Taj događaj obilježen je porastom negativnog mišljenja

javnosti o upotrebi dronova i prvim debatama o etičnosti i zakonskim okvirima upotrebe takvih letjelica.

## 2.2 Prodor u civilni sektor [1], [4], [7]

Civilni sektor bespilotnih letjelica svoj razvoj duguje zahvaljujući prvenstveno vojnim, a potom i znanstvenim projektima visoke i skupe tehnologije: letjelice koje bi nosile senzore potrebne za prikupljanje podataka morale su biti velike i vrlo skupe, izrađene specifično za određeno znanstveno istraživanje ili projekt. Početak promjene označava NASA-in program za razvoj letjelica za znanstveno-istraživačke misije studija okoliša ERAST (*Environmental Research Aircraft and Sensor Technology*, 1987.). [11] Program je bio usmjeren na razvoj bespilotnih letjelica koje bi bile sposobne letjeti duge misije na visinama većim od 18000 m. Tehnologija solarnih gorivih ćelija omogućava razvoj projekta Helios, bespilotne letjelice koju je u sklopu ERAST-a razvila tvrtka AeroVironment, Inc. (Slika 2.3).



Slika 2.3 Letjelica Helios tvrtke AeroVironment, Inc [1]

Ova je letjelica imala raspon krila od 75 m, konstrukciju od lakih kompozitnih materijala (karbonska vlakna, epoksidna smola/grafit, kevlar, viskoelastične pjene) i upravljačke površine sa 72 zakrilca upravljana servomotorima povezanim sa središnjim računalom leta.

Skretanjem se upravljalo diferencijalnim dovođenjem snage motorima na dva krila, a velik diedralni kut<sup>1</sup> omogućavao je upravljanje poniranjem i propinjanjem (pošto su motori na krajevima krila bili smješteni na više položaje od onih bliže trupu). Solarni paneli ugrađeni su na model 2000 godine, te je zahvaljujući njima i dodatnoj litijevoj bateriji ova letjelica mogla ostati u zraku za dnevnog svjetla i dodatno maksimalno pet sati noćnog leta. Težina prazne letjelice iznosila je 600 kg, mogla je nositi korisni teret mase do 329 kg (uključujući i balast, instrumente, dodatnu litijsku bateriju i senzore), a projektirana je za let na visinama do 30400 m – tipično između 15000 i 21000 m – pri brzinama krstarenja od 30 km/h (na niskim visinama) do 273 km/h (na maksimalnoj visini leta).

Iako obustavljen 2003. godine, ovaj je projekt označio početak većih ulaganja u razvoj bespilotnih letjelica za znanstveno-istraživački i civilni sektor. Tako je tvrtka Insitu (projekt je kasnije preuzela tvrtka AAI) razvila projekt Aerosonde, prvu bespilotnu letjelicu koja je preletjela Atlantski ocean 1998. godine, namijenjenu prikupljanju podataka o temperaturi, tlaku, vlazi i brzini vjetra iznad oceana i udaljenih područja. Letjelica je preletjela ocean za 26 sati i 45 minuta. [12]



Slika 2.4 VTOL UAV Yamaha R-MAX u uporabi [2]

---

<sup>1</sup> kut između horizontalne ravnine i ravnine krila

Prva prava komercijalna upotreba bespilotnih letjelica započinje krajem 80-ih u Japanu korištenjem bespilotnih helikoptera Yamaha R-MAX (Slika 2.4) za precizno zaprašivanje rižinih polja, promatranje vulkanske aktivnosti te za pomoć pri katastrofama, kakva je bila nedavna katastrofa nuklearnog reaktora u Fukushima (prikupljanje podataka o razini radijacije iznad pogođenih područja): zaključno s 2015. godinom ovim je bespilotnim letjelicama postignuto preko 2 milijuna uspješnih sati leta! [13]

Usprkos tome, tržište bespilotnih letjelica do 2010. godine može se usporediti s tržištem računalne tehnologije 80-ih: ograničeno na znanstvenu zajednicu ili na skupine hobista i samograditelja. Nije postojao univerzalni dizajn specifičan za određenu namjenu, niti je postojalo neko veće tržište komercijalnih bespilotnih letjelica: proizvodi su se prodavali u obliku elektroničkih kompleta i u ograničenim količinama. Međutim, u posljednjih 7 godina dronovi su postali manji, jeftiniji i jednostavniji. Velik preokret dogodio se 2010., kada je francuska tvrtka Parrot na tržište pustila svoj prvi komercijalni dron upravljani putem pametnog telefona – kvadrokopter *A.R. Drone*. Nedugo nakon toga kineska tvrtka DJI predstavlja svoj prvi komercijalni dron: Phantom (Slika 2.5), s integriranom kamerom i GPS-om.



Slika 2.5 DJI Phantom 4 Pro [14]

Bespilotne letjelice danas nalaze sve više primjene u civilnom sektoru - od profesionalnih snimanja iz zraka za filmsku i fotografsku industriju, preko primjena u industriji (inspekcije građevina, mostova, dalekovoda, vjetrenjača, cjevovoda, mapiranje terena, 3D i volumetrijska analiza terena) do primjena u državnoj upravi (policijski nadzor, službe sigurnosti, nadzor i pregled kritičnih infrastruktura – cesta, željeznica, spraćenje stanja prometa i sl.), šumarstvu (nadzor i mapiranje šuma, nadzor šumskih požara, praćenje stanja eko-sustava) i poljoprivredi (precizna poljoprivreda, nadzor usjeva), a ritam razvoja UAV sustava i podržavajuće tehnologije nastavlja se ubrzavati gotovo logaritamskom progresijom.

### **2.3 Klasifikacija bespilotnih letjelica [1], [4], [15], [16]**

Općenito za bespilotne letjelice vrijede jednake osnovne podjele kao i za klasične letjelice s ljudskom posadom: podjela po namjeni – na vojne, civilne i komercijalne, podjela na letjelice teže i lakše od zraka, na letjelice s nepokretnim krilima i rotorom (rotorima) – što najčešće određuje bitne karakteristike slijetanja i polijetanja (tj. ima li letjelica sposobnost vertikalnog polijetanja i slijetanja (VTOL, *Vertical Take-Off and Landing*) ili je HTOL (*Horizontal Take-Off and Landing*) tipa). Daljnje podjele mogu se vršiti po nizu specifičnih namjena i karakteristika i performansi letjelice. S obzirom na to da ne postoji jedinstveni zakonski okvir kojim se definira područje upotrebe ovih letjelica (tj. određeni zakoni i regulative postoje, ali nisu jedinstveni, već specifični za svaku regiju i zemlju), trenutno ne postoji jedinstvena i opće prihvaćena klasifikacija bespilotnih letjelica. U nastavku je opisana klasifikacija bespilotnih letjelica prema njihovim najznačajnijim karakteristikama: masi, trajanju leta i doletu, maksimalnoj visini leta, vrsti pogona, konstrukciji (konfiguraciji) i stupnju autonomije letjelice.

#### **2.3.1 Klasifikacija prema masi [16]**

Za ovu klasifikaciju uzimaju se najčešće vrijednosti maksimalne težine letjelice pri polijetanju (MTOW, *Maximim Take-off Weight*), rjeđe operativna masa (OM) – zbroj suhe težine letjelice (DOW, *Dry Operating Weight*) i težine goriva.

- Super-teške letjelice –teže od 2000 kg (X-45, Global Hawk, Predator)
- Teške bespilotne letjelice –između 200 i 2000 kg (Outrider, Fire Scout)
- Srednje teške bespilotne letjelice – između 50 i 200 kg (Raven, Phoenix, Tern, Mako)
- Lagane bespilotne letjelice – između 5 i 50 kg (ScanEagle, Manta, Skylark)
- Minijaturne (male) bespilotne letjelice – lakše od 5 kg (Wasp, Hornet)

### 2.3.2 Klasifikacija prema istrajnosti i dometu [16]

Međusobna ovisnost ovih parametara je očita: što je veća istrajnost letjelice, to je veći i njen operativni radijus. Ovi parametri najčešće određuju tip letjelice za određenu namjenu – izbor letjelice određen je udaljenošću cilja misije od mjesta lansiranja.

- bespilotne letjelice dugog trajanja leta (istrajnosti), LE (Long Endurance) – trajanje leta 24 h i više, dolet veći od 1500 km (do 22000 km za Global Hawk)
- bespilotne letjelice kratkog trajanja leta (istrajnosti), SE (Short Endurance) – trajanje leta kraće od 5 h.

### 2.3.3 Klasifikacija prema maksimalnoj visini leta [1], [16]

I ova je podjela vrlo jasna, letjelice se dijele prema maksimalnoj visini leta. Ova je karakteristika usko povezana s trajanjem leta/doletom i vrstom pogona.

- bespilotne letjelice s malom visinom leta – LA (Low Altitude) - letjelice čija je maksimalna visina leta do 1000 m
- bespilotne letjelice sa srednjom visinom leta – MA (Medium Altitude) - letjelice s maksimalnom visinom leta između 1000 i 10000 m (najveći dio UAV letjelica spada u ovu kategoriju)
- bespilotne letjelice s velikom visinom leta – HA (High Altitude) - letjelice koje mogu letjeti na visinama većim od 10000 m

U opisima karakteristika bespilotnih letjelica često se kombiniraju značajke istrajnosti i visine leta, pa se tako često spominju kombinirani klasifikacijski pojmovi poput HALE, LALE, LASE, SALE, itd., gdje su LE i SE skraćenice koje se odnose na istrajnost letjelice u zraku



(LE – *Long Endurance*, dugo trajanje leta, SE – *Short Endurance*, kratko trajanje leta). Slika 2.6 prikazuje nekoliko LALE/LASE letjelica na jednom mjestu: sve su letjelice konfiguracije s fiksnim krilima, više-manje konvencionalnih konfiguracija krila velike vitkosti<sup>2</sup> (osim letjelice Neptune, čiji je trapezoidni oblik krila i široki trup rezultat optimizacije specifične misiji: letjelica je namijenjena za let iznad vode i za slijetanje na vodu).



Slika 2.6 LALE/LASE letjelice: prva sprijeda je RQ-11A Raven; slijeva nadesno u drugom redu su Evolution i Dragon Eye; u trećem redu slijeva nadesno su NASA FLIC, Arcturus T-15 i Skylark, a u posljednjem redu su letjelice RQ-2B Pioneer, Tern i Neptune [1]

#### 2.3.4 Klasifikacija prema vrsti motora [16]

Pošto se bespilotne letjelice koriste za najrazličitije namjene, za ispunjavanje zahtjeva misije opremljene su različitim motorima. Veličina i težina motora u razmjeru s njegovom snagom je ograničavajući faktor za sve letjelice, tako i za one bez ljudske posade. Na bespilotnim

---

<sup>2</sup> vitkost krila: omjer kvadriranoga raspona krila i površine krila

letjelicama moguće je naći sve vrste motora, od turboventilatorskih, dvotaktnih, klipnih, turbopropelerskih, propelerskih do električnih pogona kakvi se pretežno koriste na manjim letjelicama za komercijalnu upotrebu (do 5 kg).

### 2.3.5 *Klasifikacija prema konstrukciji [1], [15], [17]*

- *Bespilotne letjelice s nepokretnim krilima*: ove letjelice za polijetanje i slijetanje zahtijevaju pistu ili se pri polijetanju lansiraju katapultom ili ručno i uzgon stvaraju zbog stalnog potisnog kretanja prema naprijed, omogućenog propelerom kojeg pogoni ili motor s unutarnjim sagorijevanjem ili električni motor. Moguće konfiguracije ovog tipa letjelica su, slično letjelicama s ljudskom posadom, konvencionalne i nekonvencionalne (delta krilo, leteće krilo, kanari, tandem krilo). Ove letjelice spadaju u kategoriju letjelica s horizontalnim polijetanjem i slijetanjem (HTOL) i zahtijevaju ili poletnu pistu ili lansiranje iz ruke, katapulta (Slika 2.7.)
- *Bespilotne letjelice s pokretnim krilima – rotorima*: imaju sposobnost vertikalnog polijetanja i slijetanja (VTOL) te prednost lebdenja i visoke manevribilnosti pri manjim brzinama i na nižim visinama leta, što ih je u posljednje vrijeme populariziralo u civilnom industrijskom sektoru. Ove letjelice izražuju se u brojnim konfiguracijama: s jednim glavnim rotorom i jednim repnim rotorom (klasični helikopter), s koaksijalnim rotorima, s tandem-rotorima, s više rotora (3, 4, 8, 12, 16)
- *Ostalo – bespilotne letjelice lakše od zraka* (baloni, zračni brodovi) te konfiguracije teže od zraka s mašućim krilima (mikro letjelice nadahnute letom kukaca) i hibridne letjelice, koje su sposobne za VTOL, a nakon polijetanja naginju rotore i nastavljaju let kao letjelice s fiksnim krilima.



Slika 2.7 HTOL letjelica (s fiksnim krilima) Lancaster 5 tvrtke Precision Hawk (gore) i VTOL letjelica (s rotorima) Matrice 600 tvrtke DJI [18], [19]

### 2.3.6 Klasifikacija bespilotnih letjelica prema stupnju autonomnosti [15], [20]

Upravo je autonomnost letjelice ona karika koja nedostaje za potpunu integraciju bespilotnih letjelica u svakodnevni život – na način na koji su to napravili, primjerice, pametni telefoni, čije tržište ulazi u svoju posljednju fazu razvoja. [17] Postojeće regulative u mnogim državama još uvijek ograničavaju let letjelica za civilno-komercijalni sektor izvan vidnog polja (eng. BLOS – *Beyond Line of Sight*), što je izravna posljedica njihove neautonomnosti u različitom stupnju.

Potrebno je razlikovati pojmove *automatizirani* sustav i *autonomni* sustav. Automatizirani sustav, u kontekstu bespilotnih letjelica, je onaj sustav koji je programiran da logički slijedi predefinirani set pravila – što znači da je konačno ponašanje letjelice predvidljivo i ponovljivo. Autonomni sustav sposoban je razumjeti veću razinu namjere i smjera. Takav je sustav sposoban, prema stanju trenutno očitano s vlastitih senzora, odabrati (između određenog broja alternativa) određenu akciju ispravljanja tog stanja bez ljudskog nadzora i upravljanja, iako određeni stupanj ljudske kontrole još uvijek postoji. U Tablici 2.1 navedeno je 10 razina autonomije. Ova se ALFUS (*Autonomy Levels For Unmanned Systems*)

klasifikacija [20] odnosi na sve daljinski upravljane sustave (bespilotne letjelice, vozila, itd.) te obuhvaća i civilne i vojne primjene tih sustava. Što je manja razina autonomnosti, to je veći posao operatera. Potpuno upravljane letjelice zahtijevaju stalni nadzor i unos parametara od strane operatera – to su u stvari daljinski upravljani sustavi. Upravljanje letjelicama može se vršiti i putem video veze, pomoću tzv. *First Person View* sustava, tj. sustava za upravljanje letjelicom iz perspektive pilota pomoću podataka koje letjelica bilježi kamerom i bežičnim putem šalje na naočale za virtualni let koje nosi operater. [21] Polu-autonomne letjelice (danas najraširenija grupa upravljanja) zahtijevaju manualni unos parametara za npr. polijetanje, slijetanje i određene manevre, ali imaju i funkciju automatskog navođenja leta i mogu potpuno neovisno slijediti set preprogramiranih parametara i točaka putanje. Potpuno autonomne letjelice (razina 10 u Tablici 2.1) danas se još uvijek nalaze na nedostižnom kraju spektra autonomnosti - let bez ikakve ljudske intervencije, s mogućnošću prepoznavanja terena, prepreka, komunikacije s drugim letjelicama/uređajima i uz sposobnost donošenja kompleksnih odluka. Autonomnost nekih današnjih vojnih letjelica je toliko visoka da zadovoljava razine 8 i 9 u Tablici 2.1.) dok su letjelice u civilnoj uporabi pretežno letjelice razine s vrlo malom do umjerenom razinom autonomnosti (osnovno izbjegavanje sudara i prepoznavanje terena, osnovna razina polu-autonomnosti, 1 do 5 u Tablici 2.1).

Okvirno, bespilotne letjelice prema stupnju autonomnosti možemo podijeliti u tri kategorije: potpuno daljinski upravljane letjelice, polu-autonomne sustave i potpuno autonomne sustave. Većina komercijalnih sustava u današnjoj uporabi su polu-autonomni sustavi, sposobni slijediti preprogramirane putanje i reagirati na programirani način na osnovu podataka dobivenih sa senzora.

### 2.3.7 Ostale klasifikacije

Postoje još i najraznovrsnije predložene klasifikacije, primjerice klasifikacija prema opterećenju krila [16], prema MTOW i energiji udara [3], te mnoge druge, proizvoljne klasifikacije, nastale logikom zajedničkih karakteristika dizajna, namjene i karakteristika letjelice (primjerice, prema mogućnosti leta unutar i izvan linije opažanja (eng. *Line of Sight*, LOS), prema klasi zračnog prostora koji koriste, i drugo).

Tablica 2.1 Razine autonomije [20]

| Raz . | Opis  | Percepcija promatranja/situacijska svjesnost  | Donošenje odluka  | Sposobnost  |
|-------|---|---|---|---|
| 1     | Daljinska kontrola  | Slike s kamere na letjelici koje pregledava operater/FPV  | Nema  | Daljinsko upravljanje u relativno sigurnom stacionarnom okruženju                 |
| 2     | Daljinsko upravljanje sa znanjem stanja letjelice                 | Senzori na upravljačkoj ploči, prikaz dubinske slike s letjelice                                | Osnovno izvještavanje o stanju letjelice                                    | Daljinsko upravljanje u relativno složenom stacionarnom okruženju                 |
| 3     | Prethodno isplanirana misija                                      | GPS točke, izbjegavanje sudara  | Upravljanje na osnovu planirane putanje                                     | Osnovno praćenje programiranje putanje uz intervencije operatera                  |
| 4     | Obrada senzorskih podataka na letjelici                           | Percepcija jednostavnih oblika i površina   | Za jednostavno okruženje  | Slijedi dobivene podatke uz pomoć operatera                                       |
| 5     | Jednostavno prepoznavanje i izbjegavanje prepreka                 | Lokalna percepcija i baza podataka s mapama   | Osnovna polu-autonomna navigacija   | Planiranje putanje u realnom vremenu zasnovano na procjenama rizika,              |
| 6     | Jednostavno prepoznavanje i izbjegavanje prepreka, analiza terena | Percepcija i modeliranje okoline  | Planiranje i prepoznavanje složenih terena i objekata                       | Svladavanje prepreka uz pomoć operatera   |
| 7     | Prepoznavanje objekata u pokretu i praćenje, autonomna vožnja     | Spajanje podataka sa senzora s kartama cesta i okoline, prepoznavanje objekata u pokretu        | Robusno planiranje i prepoznavanje kompleksnog terena                       | <i>Cross country</i> sa svladavanjem prepreka uz malu pomoć operatera             |
| 8     | Kooperativne operacije, konvoj, presretanja, nadolazeći promet    | Spajanje podataka s vanjskih izvora i senzora u realnom vremenu, široko poznavanje pravila leta | Napredno donošenje odluka s obzirom na podatke dijeljene s drugim uređajima | Brza i učinkovita provedba zadataka vožnje putanjom s minimalnim unosom operatera |
| 9     | Suradnja s drugim letjelicama, gotovo ljudska razina upravljanja  | Percepcija u lošim vremenskim uvjetima i uvjetima okoliša                                       | Kolaborativno taktičko ponašanje  | Postizanje složenih kolaborativnih misija uz mali nadzor operatera                |
| 10    | Potpuno autonomno, na razini čovjeka ili bolje                    | Spajanje i uporaba podataka iz svih područja  | Potpuna neovisnost u planiranju i ostvarivanju zadanih ciljeva              | Postizanje složenih kolaborativnih misija bez intervencije operatera              |

## 2.4 Zakonski okviri

Budući da su sustavi bespilotnih letjelica razvijani prvenstveno za vojne i znanstveno-istraživačke potrebe, do nedavno nije niti postojala potreba za zakonskom regulativom koja bi omogućavala njihovu sigurnu uporabu u civilnom zračnom prostoru. Međutim, naglo i eksplozivno širenje tržišta u posljednjih desetak godina uvjetovalo je hitno stvaranje regulatornih okvira kojima bi se regulirala i integrirala uporaba tih sustava te uskladila s postojećim zakonima (npr. zakonima o zaštiti privatnosti, o zaštiti osobnih podataka, i sl.).

Na Slici 2.8 prikazani su zakonski okviri za 15 različitih zemalja na 5 kontinenata. Mnoge zemlje još uvijek razvijaju regulativne okvire za komercijalnu uporabu UAV sustava, koje se, iako pod istim okvirom i s istim ciljem, ipak razlikuju za svaku pojedinu zemlju: mogućnost leta izvan vidnog polja (BVLOS) bez ishođenja posebnih dozvola od lokalnog nadležnog zakonodavnog tijela još uvijek ne postoji, primjerice, u Njemačkoj, Francuskoj, Indoneziji, Australiji, Meksiku i SAD-u.

| Država     | Mogućnost komercijalnih letova | Potrebna dozvola za let | Mogućnost BVLOS leta | Potrebna dozvola za BVLOS letove | Potrebno osiguranje za komercijalne letove | Potrebna obuka za dozvolu za UAV pilota |
|------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|--|---|
| Poljska    | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✓                                | ✓  | ✓                                       |
| UK         | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✓                                | ✓  | ✓                                       |
| Kina       | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✗                                | ✓  | ✓                                       |
| Kanada     | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✗                                | ✓  | ✗                                       |
| Njemačka   | ✓                              | ✓                       | ✗                    | ✗                                | ✓  | ✓                                       |
| Francuska  | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✗                                | ✗  | ✓                                       |
| JAR        | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✗                                | ✗  | ✓                                       |
| Indonezija | ✓                              | ✓                       | ✗                    | ✗                                | ✓  | ✓                                       |
| Australija | ✓                              | ✓                       | ✗                    | ✗                                | ✓  | ✓                                       |
| Brazil     | ✓                              | ✓                       | ✓                    | ✗                                | ✗  | ✗                                       |
| Meksiko    | ✓                              | ✓                       | ✗                    | ✗                                | ✗  | ✓                                       |
| SAD        | ✓                              | ✓                       | ✗                    | ✗                                | ✗  | ✗                                       |
| Japan      | ✓                              | ✗                       | ✗                    | ✗                                | ✗  | ✗                                       |
| Rusija     | ✗                              | ✗                       | ✗                    | ✗                                | ✗  | ✓                                       |
| Argentina  | ✗                              | ✗                       | ✗                    | ✗                                | ✗  | ✗                                       |

Slika 2.8 Zakonski okviri za UAV sustave u 15 zemalja svijeta [22]

### **2.4.1 Sjedinjene Američke Države [23], [24]**

U SAD-u je regulatornu inicijativu preuzela Federalna uprava za avijaciju, FAA (*Federal Aviation Administration*), koja je izdala niz prijedloga zakona o registraciji i uporabi bespilotnih letjelica u nacionalnom zračnom prostoru radi svođenja rizik ugrožavanja letjelica s ljudskom posadom i ljudi na tlu na najmanju moguću razinu. U lipnju 2016. godine FAA je izdala propise o korištenju malih bespilotnih letjelica [25] (operativne mase do 25 kg), koji uključuju pravila o načinu upravljanja (dozvoljen samo VLOS), dozvoljenom vremenu korištenja (isključivo za danjeg svjetla i u zoru i sumrak uz odgovarajuće svjetlo na letjelici), maksimalnu brzinu i visinu leta (160 km/h, 121 m iznad tla ili iznad strukture s koje se upravlja letjelicom), vremenske uvjete u kojima je dopušteno upravljati letjelicom i dozvoljene klase zračnog prostora. Letjelice operativne mase veće od 55 kg (kakve se najčešće koriste u znanstveno-istraživačkom i civilnom sektoru zaštite i nadzora) moraju steći potvrdu o plovidbenosti i dobiti posebnu dozvolu prema Odjeljku 333 FAA Akta o modernizaciji i reformi iz 2012. (FAA Modernization and Reform Act of 2012 - FMRA). FAA je do kraja 2016. odobrila 5552 peticije za izuzećem [24] prema Odjeljku 333 FMRA.

### **2.4.2 Europa i svijet [25], [26], [27], [28]**

U Europi je prijedlog integracije daljinski upravljanih sustava [28] postavila grupa EUROCONTROL – međunarodna organizacija s 41 državom-članicom posvećena unaprjeđenju „Jedinstvenog europskog neba“ (Single European Sky - SES) – inicijative za optimizaciju upravljanja zračnim prometom na međunarodnom nivou, a u cilju poboljšanja sigurnosti, povećanja kapaciteta zračnog prostora, smanjenja troškova i smanjenja utjecaja na okoliš. [29] 29. listopada 2015. godine usvojena je „Rezolucija Europskog parlamenta o sigurnoj upotrebi zrakoplovnih sustava na daljinsko upravljanje (RPAS), opće poznatih kao bespilotne letjelice, u civilnom zrakoplovstvu (2014/2243(INI)) . [26]

Agencija EUROCONTROL u ožujku 2016. predlaže zakonski okvir za tri različite operativne kategorije bespilotnih letjelica: [27]

1. *otvorena upotreba* – bespilotne letjelice kojima je moguće upravljati bez dodatnih certifikata ili potvrda zrakoplovnih vlasti, pod uvjetom da se ovim letjelicama upravlja unutar linije opažanja (VLOS) operatera, pri definiranim maksimalnim visinama leta koje su niže od

visina leta koje koriste zrakoplovi s ljudskom posadom i na određenim udaljenostima od aerodroma i osjetljivih zona. Ovim vozilima ne smije se upravljati iznad ljudi i općenito zadovoljavaju industrijski standard „igračaka“

2. *specifična uporaba* – potrebno je izvršiti procjenu rizika koja će idendtificirati sve opasnosti po treće strane na zemlji i u zraku, a pravila koja se odnose na njih ovise o njihovom specifičnom tipu, plovidbenosti i operativnim parametrima

3. *certificirana uporaba* – ova kategorija uključuje veće bespilotne letjelice koje imaju iste zahtjeve kao i letjelice s ljudskom posadom: potvrdu o plovidbenosti te certifikaciju i licenciranje operatera letjelice (pilotska licenca).

### 2.4.3 Hrvatska [30]

U Hrvatskoj je na snazi Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (u nastavku: Pravilnik) - Narodne novine, br. 49. od 6. svibnja 2015. godine. Ovim Pravilnikom propisuju se opći, tehnički i operativni uvjeti za sigurnu uporabu bespilotnih zrakoplova, sustava bespilotnih zrakoplova i zrakoplovnih modela te uvjeti kojima moraju udovoljavati osobe koje sudjeluju u upravljanju tim zrakoplovima i sustavima. Odredbe ovoga Pravilnika primjenjuju se na sustave bespilotnih zrakoplova<sup>3</sup>, s operativnom masom letjelice do i uključujući 150 kilograma, a koji se koriste u Republici Hrvatskoj. Odredbe Pravilnika ne primjenjuju se na sustave bespilotnih zrakoplova kada se koriste za državne aktivnosti (vojne, policijske, sigurnosno-obavještajne, carinske, aktivnosti potrage i spašavanja, gašenja požara, obalne straže i slične aktivnosti ili službe).

U članku 2.11 Pravilnika određena su ograničenja za rukovanje bespilotnim letjelicama: letjelicom se smije upravljati samo unutar vidnog polja rukovatelja i na udaljenosti ne većoj

---

<sup>3</sup> Prema Pravilniku – sustav bespilotnog zrakoplova (UAS) je „sustav namijenjen izvođenju letova zrakoplovom bez pilota koji je daljinski upravljani ili programiran i autonoman. Sastoji se od bespilotnog zrakoplova i drugih komponenti za upravljanje ili programiranje neophodnih za kontrolu bespilotnog zrakoplova, od strane jedne ili više osoba“ [30]



od 500 m od rukovatelja. Letačke operacije korištenjem sustava FPV<sup>4</sup> [31] (*First Person View*) Hrvatskoj dozvoljene su isključivo uz prisutstvo još jedne osobe.

Prema članku 3. Pravilnika, letačke operacije koje izvode bespilotni zrakoplovi dijele se u kategorije prema operativnoj masi letjelice i klasi područja izvođenja leta (Slika 2.8).

Jedno od najvećih zakonskih ograničenja uporabe bespilotne letjelice je dozvola leta isključivo unutar vidnog polja operatera.

Letjelice su tako prema svojoj operativnoj masi (OM) klasificirane na sljedeći način:

1. Klasa 5: letjelice do 5 kilograma
2. Klasa 25: letjelice od 5 kilograma do 25 kilograma
3. Klasa 150: letjelice od 25 kilograma do i uključujući 150 kilograma.

| Klasa sustava<br>bespilotnog<br>zrakoplova | Klasa područja izvođenja letenja |   |                           |                                   |
|--|----------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------------|
|  | I<br>Neizgrađeno<br>područje     | II<br>Izgrađeno<br>nenaseljeno područje | III<br>Naseljeno područje | IV<br>Gusto naseljeno<br>područje |
| 5<br>OM < 5kg                              | A                                | A                                       | B                         | C                                 |
| 25<br>5 ≤ OM < 25kg                        | A                                | B                                       | C                         | D                                 |
| 150<br>25 ≤ OM ≤ 150kg                     | B                                | C                                       | D                         | D                                 |

Slika 2.9 Kategorije letačkih operacija za RH [30]

U odnosu na izgrađenost, naseljenost i prisutnost ljudi, područja letenja dijele se na klase (prema članku 4. Pravilnika):

1. Klasa I – Područje u kojem nema izdignutih građevina ili objekata i u kojem nema ljudi, osim rukovatelja i osoblja koje je nužno za letenje.
2. Klasa II – Područje u kojem postoje pomoćni gospodarski objekti ili građevine koje nisu namijenjene za boravak ljudi i u kojem nema ljudi, osim rukovatelja i osoblja koje je nužno za letenje. Dozvoljen je samo povremeni prolazak, bez zadržavanja, ljudi kroz područje (biciklisti, šetači i sl.).

<sup>4</sup> *First Person View*, FPV - upravljanje letjelicom iz perspektive letjelice pomoću kamere na letjelici koja snimljene podatke dostavlja na naočale za daljinsko upravljanje koje nosi osoba koja upravlja letjelicom.

3. Klasa III – Područje u kojem postoje građevine ili objekti primarno namijenjeni za stanovanje, poslovanje ili rekreaciju (stambene zgrade, stambene kuće, škole, uredi, sportski tereni, parkovi i slično).

4. Klasa IV – Područje uskih urbanih zona (središta gradova, naselja i mjesta).

Navedene podjele omogućavaju kategorizaciju letačkih operacija u kategorije A, B, C i D (Slika 2.8) i postavljanje zakonskog okvira za letačke operacije bespilotnim letjelicama:

1. Kategorije A i B – operator smije izvoditi letačke operacije ove kategorije ako je prije izvođenja letačkih operacija Agenciji<sup>5</sup> dostavio Izjavu propisanu Pravilnikom

2. Kategorija C – operator smije izvoditi letačke operacije ove kategorije ako je izradio operativni priručnik i prije izvođenja letačkih operacija Agenciji dostavio Izjavu propisanu Pravilnikom

3. Kategorija D – za izvođenje letačkih operacija ove kategorije operater mora dobiti odobrenje Agencije

## **2.5 Konfiguracije i sustavi bespilotnih letjelica**

### **2.5.1 Konfiguracija [1], [7]**

#### *2.5.1.1 Konfiguracija s nepokretnim krilima*

Osnovne karakteristike konfiguracije s nepokretnim krilima su jednostavnija konstrukcija (u usporedbi s konstrukcijom letjelice s rotorima), te mogućnost ostvarivanja duljeg leta pri većim brzinama i na većim visinama, čime se omogućava nadgledanje velikih površina u jednom preletu. Najčešće se projektiraju s s krilima velike vitkosti, što im omogućava uštedu energije jedrenjem, a time i bolji omjer operativne mase letjelice i korisnog tereta, što ih osposobljava za nošenje teže i složenije opreme. Efikasnija aerodinamika omogućava tako dulje trajanje leta pri većim brzinama, čime se omogućava nadgledanje velikih površina u jednom letu i veća otpornost na vjetar, što ih čini idealnima za misije mapiranja i

---

<sup>5</sup> Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo

pretraživanja (GIS – *Geographic Information System*), nadzora usjeva, i sl. Manje konfiguracije mogu se lansirati iz ruke (letjelice težine do oko 5 kg) ili s manje lansirne rampe (do 25 kg), a veće konfiguracije s nepokretnim krilima (teže od 25 kg) zahtijevaju stazu za polijetanje i slijetanje.

- a) Konvencionalna konfiguracija – krilo, trup, rep – ove konfiguracije odlikuju vitki trup letjelice i velik raspon krila velike vitkosti (kao na Slici 2.7). Zahvaljujući vitkosti trupa moguće je rasporediti dodatnu težinu oko trupa s obzirom na centar ravnoteže zrakoplova (korisni teret).
- b) Nekonvencionalne konfiguracije – razvijane su kao posljedica nužnih optimizacijskih postupaka pri dizajnu letjelice kako bi se zadržale ili poboljšale letne karakteristike klasične konfiguracije. Danas razlikujemo:
  - delta krilo – krilo u obliku trokura
  - tandem krilo – izvedba s dva krila
  - leteće krilo - ravna konstrukcija bez jasno definiranog trupa letjelice
  - BWB (*Blended Wing Body*) – konstrukcija s glatkim spojem krila koje prelazi preko trupa, čineći veću uzgonsku površinu (za razliku od letećeg krila, ovdje se radi o spoju dvije strukture: krila i trupa). Primjer takvog dizajna je izuzetno uspješna komercijalna letjelica eBee tvrtke SenseFly, prikazana na Slici 2.10.
  - kanare – horizontalni stabilizatori s upravljačkim površinama ispred krila



Slika 2.10 BWB dizajn letjelice eBee tvrtke SenseFly [36]

### 2.5.1.2 Konfiguracija s pokretnim krilima

#### a) Konvencionalna konfiguracija

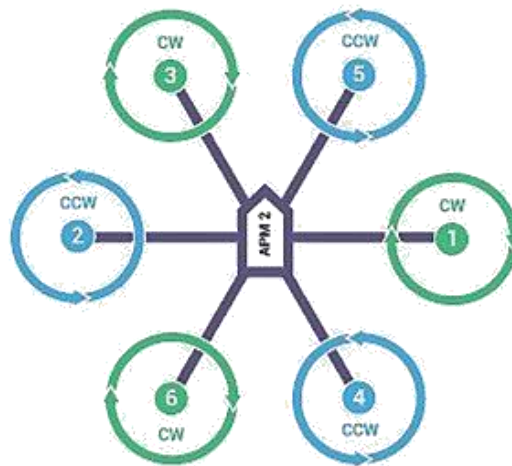
Helikopter je klasična konfiguracija s pokretnim krilima, tipična za veće VTOL letjelice, sposobne lebdjeti i nositi veću težinu tereta. Primjer jedne takve uspješne UAV letjelice je Yamaha R-MAX, bespilotni helikopter prikazan ranije, na Slici 2.4.

#### b) Nekonvencionalne konfiguracije (multirotori) [32], [33]

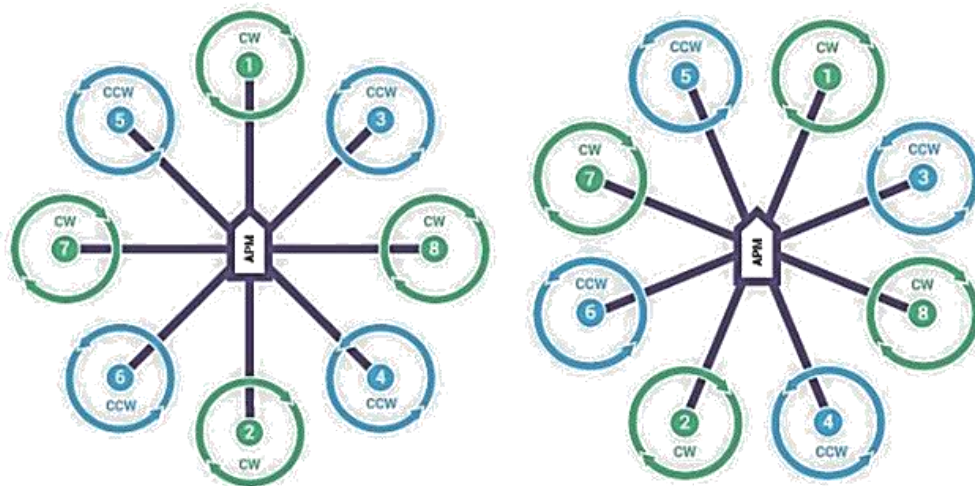
Većina UAV letjelica s rotorima na tržištu danas su upravo multirotor tipa, s najraznovrsnijim konfiguracijama i brojem motora i rotora. Upravljanje letjelicom s više rotora vrši se promjenom brzine vrtnje pojedinih motora, što u različitim kombinacijama rezultira ubrzavanjem/usporavanjem, propinjanjem, skretanjem i valjanjem letjelice. Multikopteri mogu imati dva, tri, četiri, šest, osam ili (rjeđe) više rotora.

Konfiguracije *bikoptera* zbog problema s upravljivosti i stabilnosti gotovo da i nemaju značajniju komercijalnu primjenu. *Trikopteri* su konfiguracije s tri rotora razmještena na krakovima pod kutevima od 120 stupnjeva ili (rjeđe) u obliku slova T. Ova konfiguracija ima slabiju upravljivost od konfiguracije s četiri ili više rotora, ali i jednu prednost, koju rado iskorištavaju hobisti i zaljubljenici u utrke dronova: brzo skretanje. Stražnji rotor ove konfiguracije može se nagnjati ulijevo ili udesno pomoću ugrađenog servo motora, što omogućava skretanje s manjim gubitkom brzine nego što je to slučaj kod konfiguracije s četiri ili više rotora. (kvadrikopteri skreću tako da smanje brzinu motora na jednoj strani, što znači da nužno znatno usporavaju tijekom skretanja). *Kvadrikopteri* (konfiguracije s četiri rotora) su najčešća i najpopularnija konfiguracija na tržištu. Postoje konfiguracije s četiri kraka razmještena pod kutem od 90 stupnjeva, u obliku slova X ili u obliku križa (smjerovi okretanja susjednih rotora su suprotni, tj. par međusobno nasuprotnih rotora rotira u istom smjeru), konfiguracije s tri kraka (tzv. Y4 konfiguracija, krakovi su razmješteni kao kod trikoptera, samo su na stražnjem kraku dva koaksijalna rotora) te konfiguracije s V i A „repom“ (stražnjim krakom), slične Y4 kombinaciji. *Heksakopteri* su letjelice sa šest rotora montiranih simetrično na krakovima međusobno razmaknutim za 60 stupnjeva, s po tri seta rotora koji rotiraju na način prikazan na Slici 2.11. Zbog povećane stabilnosti i redundantnosti u slučaju otkaza jednog motora te povećanog kapaciteta podizanja i snage, ove su

konfiguracije sve popularnije na tržištu – iako im je i cijena, zbog kompliciranije izvedbe i zahtjeva konstrukcije, veća. Heksakopteri dolaze i u tzv. Y6 konfiguracijama, na kojima su na istom kraku smještena po dva suprotno rotirajuća koaksijalna rotora.



Slika 2.11 Upravljanje heksakopterom pomoću smjera vrtnje rotora (CW - u smjeru kazaljke na satu, CCW - u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu) [32]



Slika 2.12 Upravljanje oktokoferom pomoću smjera vrtnje rotora (CW - u smjeru kazaljke na satu, CCW - u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu) [32]

*Oktokopteri* (Slika 2.12) – letjelice s osam motora (rotora) - su teže, veće i složenije letjelice: veći broj motora i složenija i teža konfiguracija zahtijevaju i snažniji pogonski sustav (baterije većeg kapaciteta), što ih čini još skupljima od prethodno nabrojanih konfiguracija. Njihova popularnost u profesionalnom komercijalnom spektru ipak raste: povećana snaga motora jamči i povećanu nosivost korisnog tereta (složeniji, skuplji i teži senzori ili više njih).

#### 2.5.1.3 Hibridna konfiguracija [34]

Letjelica koja ima sposobnost vertikalnog polijetanja uz pomoć rotora, a nakon polijetanja leti kao letjelica s nepokretnim krilima, prikazana je na Slici 2.13

Hibridne konfiguracije nastoje dobrim letnim performansama letjelica s fiksnim krilima dodati sposobnost vertikalnog polijetanja i slijetanja rotokoptera, međutim njihova komercijalna uporaba ograničena je složenošću izvedbe i samim time, cijenom.



Slika 2.13 Bell Eagle Eye Tiltrotor [35]

#### 2.5.1.4 Ostale konfiguracije [34]

U ovu skupinu spadaju letjelice s mašućim krilima (ornikopteri) i letjelice lakše od zraka (baloni, diridžabli-zračni brodovi). Jedan zanimljiv primjer takve letjelice jest zračni brod Hipersfera (Slika 2.14), hrvatski projekt koji je prošao prvu fazu financiranja i trenutno je u

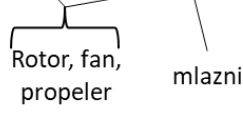
fazi traženja povoljnih strateških partnerstava. Letjelica je zamišljena kao zračni brod koji bi služio kao pojačanje ili proširenje mobilne mreže te koji bi, umrežen s drugim hipersferama, mogao služiti kao zračna mobilna telekomunikacijska platforma. [36]



Slika 2.14 Usidrena HiperSfera [37]

### 2.5.2 Pogonski sustavi za *bespilotne letjelice* [7], [34], [37]

Osnovna podjela pogonskih sustava za *bespilotne letjelice* prikazana je na Slici 2.15: na sustave s motorima s unutarnjim izgaranjem i sustave s električnim motorima. Pogonski sustav projektira se u fazi preliminarnog dizajna, u izravnoj sprezi s konfiguracijom sustava, prema profilu misije letjelice – željenom trajanju leta, dometu i zahtijevanoj nosivosti.

| Izvor energije                 | bio-kemijski  | električni naboj<br>(Sunčevo zračenje) foto-naponska ćelija | elektrolit                        |
|--------------------------------|---|---|-----------------------------------|
| Pohrana energije               | spremnik goriva   | baterija  | spremnik elektrolita              |
| Pretvorba u mehaničku energiju | motor s unutarnjim izgaranjem<br>klipni      turbinski                            | električni motor  | goriva ćelija<br>električni motor |
| Pretvorba u uzgon/potisak      |  | rotor, fan, propeler  | rotor, fan, propeler              |

Slika 2.15 Pogonski sustavi bespilotnih letjelica [39]

### 2.5.2.1 Motori s unutarnjim izgaranjem

Ovi motori pretvaraju kemijsku energiju goriva (pohranjenog u spremniku goriva) u mehaničku. Motori s unutarnjim sagorijevanjem su snažni, ali i teški, te u proračun težine letjelice ubacuju komponentu promjenjive mase goriva koje sagorijeva za vrijeme leta. Razmatraju se prvenstveno za letjelice HALE i MALE karakteristika te za helikoptere. Turbo-fan i turbo-prop sustavi primjenjuju se prvenstveno za veće HALE i MALE letjelice, čije karakteristike leta i veća konstruktivna masa zahtijevaju i veću snagu motora.

Manje i srednje velike letjelice MALE i LALE karakteristika leta, poput letjelice Penguin C (UAV Factory) prikazane na Slici 2.16, koriste pretežno klipne motore.

### 2.5.2.2 Električni motori

Pogonski sustavi s električnim motorima koriste se za većinu (~ 96 %) komercijalnih UAV letjelica. [37] Letjelice na električni pogon su lakše, tiše i prihvatljivije za okoliš te omogućavaju bolju upravljivost i manevrabilnost, ali njihovo vrijeme misije i dolet ovise najviše o kapacitetu ugrađene baterije. Danas se za UAV sustave koriste pretežno Litij polimerne (Li-Po) i litij-ionske (Li-ion) baterije. [34]





Slika 2.16 Penguin C (UAV Factory), MALE letjelica trajanja leta do 20 h [38]

Tehnologija za pohranu energije, tj. tehnologija baterija je trenutno najveće ograničenje, ali ujedno i jedan od navažnijih razvojnih potencijala za sustave bespilotnih letjelica. [37] Kao što je to slučaj i kod konvencionalnih zrakoplova s ljudskom posadom, dodavanje veće snage (primjerice više baterija) na letjelicu neće imati linearni učinak produljenja vremena leta i doleta. Također, zbog niže specifične energije baterija (u usporedbi sa specifičnom energijom goriva kod motora s unutarnjim izgaranjem), ovi se sustavi ugrađuju pretežno na manje letjelice. Nakon određenog reda veličine letjelice velika masa baterije čini uporabu ovog sustava nepraktičnim.

### 2.5.2.3 Ostale konfiguracije pogona [37]

Tehnologije solarnih ćelija, gorivih ćelija te hibridnih benzinsko-električnih pogona još uvijek su slabije zastupljene na širem tržištu zbog specifičnih tehnoloških zahtjeva i, posljedično, veće cijene. Hibridni benzinsko-električni pogon predstavlja dodatni izazov za male letjelice zbog većeg prostora za instalaciju pogona. Odličan koncept rješenja takvog hibridnog pogona je letjelica Yeair s 4 rotora (uspješan berlinski start-up projekt na Kickstarteru) prikazana na Slici 2.17



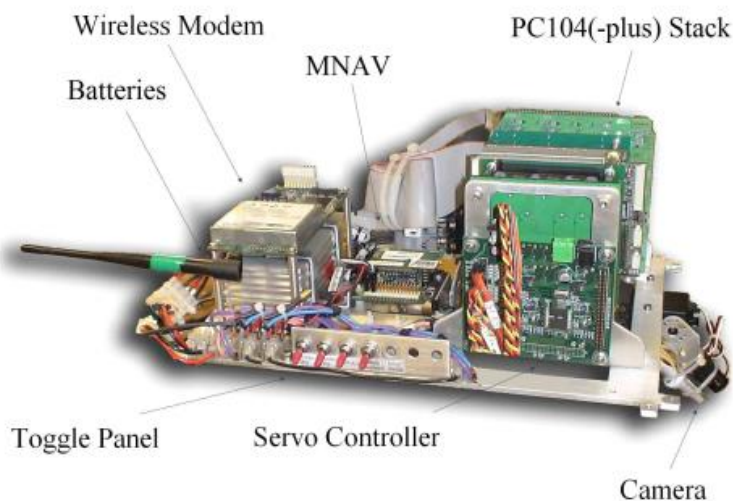
Slika 2.17 Letjelica Yeari s četiri rotora i hibridnim pogonom (prototip) [39]

Efikasnost solarnih ćelija u samom početku razvoja tehnologije iznosila je tek oko 10 %, danas se međutim postižu vrijednosti od oko 46 % i snage od  $175 \text{ W/m}^2$ . Za postavljanje takvog pogona na bespilotnu letjelicu potrebna je velika površina za fotonaponske module – logično, projektanti i stručnjaci odlučili su se za površinu krila. Tehnologije solarnih i gorivih ćelija razmatraju se za pogon velikih HALE letjelica koje bi se koristile kao mobilni wi-fi sateliti za proširenje i podršku postojećoj infrastruktura. Logično, mnogi su veliki svjetski igrači zainteresirani za razvoj ovih tehnologija (Facebook i prototip HALE letjelice Aquila [40]), međutim te su tehnologije još uvijek u razvoju i još neko vrijeme će ostati u onom gornjem, profesionalnom sloju tržišta namijenjenom velikim (pretežno IT i telekomunikacijskim) kompanijama, te neće biti predmet razmatranja u nastavku ovog rada.

Odabir pogonskog sustava problem je optimizacije dva suprotstavljena zahtjeva: snage i težine pogona, te izravno utječe na performanse trajanja leta i dometa. [34] Profil misije, tj. namjena letjelice ključan je faktor i pri odabiru pogona letjelice: mora li letjelica nositi terete na dulje udaljenosti? Koliki je traženi domet komunikacijskog (upravljačkog) signala? Odgovori na ova pitanja uvjetuju odabir pogona: motori s unutarnjim sagorijevanjem su snažni, mogu osigurati veći dolet, nosivost i dulju istrajnost letjelice ali su istovremeno teški i bučni, što ih često čini nepovoljnim izborom za misije nadzora i izviđanja. Električni su pogonski sustavi su općenito tiši (izuzev buke propelera), ali su zbog niske specifične energije baterija ograničeni u performansama i istrajnosti.

### 2.5.3 Avionika<sup>6</sup> bespilotne letjelice i korisni teret (senzori) [1], [15], [41], [42]

Avionika bespilotne letjelice sastoji se iz ugrađenog letnog računala, komunikacijskog sustava (podatkovna veza) putem kojeg je bespilotna letjelica povezana sa zemljanom kontrolnom jedinicom, navigacijskim senzorima (letjelice s minimalnim stupnjem autonomije moraju imati barem GPS senzore) te sustavima za lansiranje i povrat letjelice. Ovisno o vrsti letjelice, složenosti misije i zahtjeva obrade prikupljenih podataka te zahtijevanom stupnju autonomije, kontrolna jedinica može biti cijela složena zemljana kontrolna stanica ili upravljačka aplikacija koju je moguće pokrenuti putem pametnog telefona. Na Slici 2.18 prikazano je letno računalo s procesorom (PC104), navigacijskom jedinicom koja sadrži osnovne navigacijske senzore (MNAV), baterijama i modemom za bežični prijenos podataka na upravljačku stanicu. Većina bespilotnih sustava koji imaju funkciju autopilota imaju osnovni navigacijski par GPS (*Global Positioning System*) i INS (*Inertial Navigation Systems*) senzora. Međutim, što je veća autonomija letjelice, veći je i stupanj fuzije ostalih senzora (modularnih ili integriranih) s osnovnom avionikom letjelice.



Slika 2.18 Dizajn upravljačkog letnog sustava male letjelice s pogonskom baterijom [15]

<sup>6</sup> Elektronički sklopovi zrakoplova. Uključuju komunikaciju, navigaciju, zaslone i upravljanje cjelokupnim sustavom

Korisni teret letjelice predstavljaju svi ostali senzori potrebni za obavljanje misije za koju je letjelica namijenjena te bilo koji drugi korisni teret potreban za obavljanje misije (npr. spremnik s pesticidom za prskanje usjeva).

Bespilotne letjelice upotrebljavaju elektro-optičke senzore (optički, termo-grafički i infracrvene kamere, multispektralne i hiperspektralne kamere), radare (RADAR – *Radio Detection and Ranging*), optičke radare (LIDAR – *Light Detection and Ranging*), laserske radare (LADAR - *Laser Detection and Ranging*) te senzore čestica kakve se koriste u istraživanjima i mjerenjima okoliša (mjerenje emisija štetnih plinova, elektromagnetskih emisija, para, kvalitete zraka, vode, i sl.).

Kako bi se iz prikupljenih podataka dobila svrhovita analiza stanja okoliša, potrebno je podatke obraditi na odgovarajući način. Stoga svi moderni sustavi bespilotnih letjelica uključuju i softver za obradu dobivenih podataka (zbog zahtjeva na procesor, napajanje te posljedično tomu i masu letjelice, ovaj je softver najčešće instaliran na zemljanoj stanici), bez kojeg prikupljeni podaci nemaju gotovo nikakvu vrijednost.

*Zračne fotografije* mogu se geometrijski korigirati (metodom zvanom ortofotogrametrija ili ortofoto) prema karti područja – čime se omogućava precizno mjerenje udaljenosti. Druga tehnika za precizno mjerenje okoliša pomoću fotografija jest fotogrametrija - tehnika pomoću koje se fotografije postavljaju u slojeve koji se preklapaju na način da se ista značajka vidi iz dvije perspektive, pretvarajući tako podatke u „oblake podataka“ ili 3D slike. Ova tehnika omogućava izračun udaljenosti, mjerenja volumena i precizni 3D prikaz objekata. Za potrebe nadzora i mapiranja (GIS - *Geographic Information System*) koristi se i digitalni elevacijski model terena, tzv. DEM (*Digital Elevation Model*) pomoću kojega se može precizno mapirati 3D model terena zajedno s pripadajućim objektima (drveće, zgrade, infrastrukture i sl.). [42]

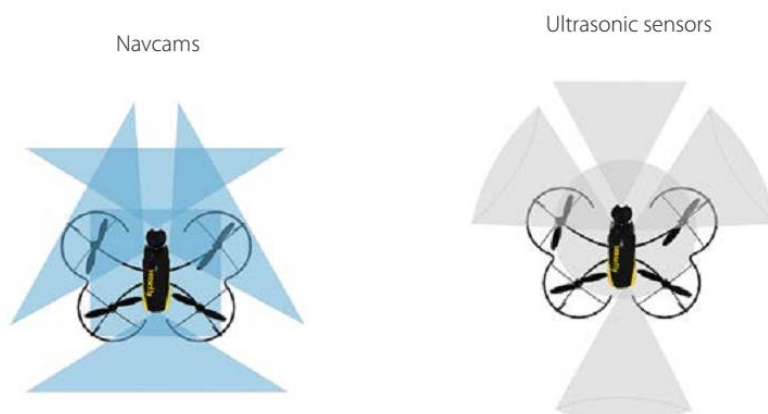
*Optički* senzori su integralni dio svih modernih bespilotnih letjelica. Koriste se za misije nadzora (državne službe, šumarstvo), detekcije i nadzora požara i poplava, precizne poljoprivrede, pregleda plinskih i naftnih postrojenja i infrastruktura, pregleda građevina i postrojenja, pregleda kritičnih infrastruktura, u građevinskoj industriji te za mapiranje terena. Kamere i fotoaparati visoke rezolucije bilježe podatke u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra. Podaci s kamera koriste se za brzo pregledavanje stanja okoliša, nadzor i prikupljanje

podataka u realnom vremenu. Pomoću preciznih digitalnih fotoaparata visoke rezolucije (HD – *High Definition*) snimaju se precizne fotografije okoliša, koje se potom spremaju u memoriju letnog računala ili podatkovnom vezom šalju na zemljanu stanicu. [41]

*Termografički i infracrveni* (IR – *Infra Red*) senzori služe za otkrivanje zračenja u infracrvenom elektromagnetskom spektru i mjerenje toplinskih otisaka. Njihova uporaba je značajna u misijama spašavanja te u misijama geoloških i rudarsko-naftnih mjerenja (mjerenja naznaka vulkanskih erupcija, detekcija podzemnih požara ugljena i sl.). *Hiperspektralne i multispektralne kamere* omogućavaju snimanje i kombiniranje podataka iz različitih dijelova elektromagnetskog (EM) spektra: hvataju vidljivu svjetlost (crvenu, zelenu i plavu), toplinu (infracrven i dio EM spektra) te manji dio ultraljubičastog (UV) dijela spektra. Koriste se za atmosferska mjerenja, praćenja stanja okoliša, kvalitete vode i sl. *Optički i laserski radari* (LIDAR/LADAR) koriste tehnologiju radara (procjene udaljenosti objekta pomoću mjerenja vremena povrata signala koji se reflektira od objekta), samo što umjesto impulsa radio signala koriste svjetlosni i laserski snop. Ovi se senzori koriste za topografska mjerenja, mjerenja u geologiji i rudarstvu, za nadzor ledenjaka, oceanografiju, poljoprivredu, kopneni nadzor i sl. [1], [4],

Zahvaljujući trendu fuzije senzora i sve većoj količini podataka koju je moguće obraditi na samoj letjelici u realnom vremenu, bespilotne letjelice postižu sve veći stupanj autonomije - planiranje putanje, ispravak putanje, izbjegavanje sudara, kooperativne zadatke s drugim vozilima i letjelicama, itd. Na Slici 2.19 prikazana je letjelica Albris (SenseFly) koja zahvaljujući ugrađenim navigacijskim sensorima i ultrasoničnim sensorima ima povećanu situacijsku svjesnost, zahvaljujući čemu se letjelica može dovoljno približiti strukturi koju je potrebno pregledati, uz istovremenu manevrabilnost i povećanu autonomnost.

Očekivani daljnji napredak tehnologije u ovom polju (povećanje brzine procesora, brzine prijenosa podataka, bolje upravljanje prikupljenim podacima u realnom vremenu, fuzija podataka dobivenih sa senzora, razvoj softverskih rješenja za modeliranje i vizualni prikaz podataka) dodatno će smanjiti masu avionike i korisnog tereta i povećati razinu autonomije letjelice, uz istovremeno smanjenje tržišne cijene gotovog rješenja.



Slika 2.19 Povećana situacijska svjesnost bespilotne letjelice Albris, tvrtke SenseFly [43]

## 2.6 Materijali [7], [44]

Slično kao i kod letjelica s ljudskom posadom, materijal letjelice (i komponenti letjelice) odabire se na temelju procjene i proračuna operativnih (dinamičkih) strukturalnih opterećenja (prilikom lansiranja, slijetanja, zbog inercije, izvođenja manevara, opterećenja pogonskog sustava i sl.). Međutim kod bespilotnih letjelica strukturalna čvrstoća i izdržljivost konstrukcija igraju mnogo manju ulogu nego kod letjelica s ljudskom posadom.

Kompozitni materijali zbog svoje dostupnosti, lake obrade i oblikovanja, velike čvrstoće, male težine igraju glavnu, gotovo univerzalnu ulogu u konstrukciji današnjih bespilotnih letjelica.

Konstrukcija komponenata letjelice (trupa, krila) izrađuje se oblikovanjem iz polistirena (PS), poliuretana (PUR), polivinil-klorida (PVC), aluminijskog saća ili balsa drveta.<sup>7</sup> Potom se komponenta presvlači oplatom iz kompozitnih laminata (sa staklenim ili ugljičnim vlaknima), kevlara ili aluminijsa. To je tzv. „sendvič“ konstrukcija, u kojoj oplata komponente nosi

<sup>7</sup> Balsa drvo je lako drvo koje se od samih početaka avio-modelarstva koristi za izradu okvira trupa i krila letjelice. Još uvijek se koristi u kućnim radinostima i za jeftinije letjelice. Međutim, sveprisutni kompozitni materijali i sada već raširene tehnike 3D printanja gotovo su u potpunosti izbacile ovaj materijal iz uporabe u serijskoj proizvodnji UAV letjelica.

cjelovito opterećenje. Noseće oplata međusobno su rastavljene ispunom, materijalom male specifične težine, koji prenosi opterećenje s jedne oplata na drugu

Pored primjene armiranih materijala u izradi oplata veliku primjenu su našle "Sendvič konstrukcije". Zadatak ispune je da prenese opterećenje s jedne na drugu oplatu, dok sama oplata, tj. oplata primaju cjelokupno opterećenje i stoga moraju imati povećanu otpornost na smično i torzijsko opterećenje te na izvijanje. Čvrstoća „sendvič“ konstrukcije ovisi tako gotovo u potpunosti o svojstvima materijala nosive oplata.

Za konstrukciju komponenata koje moraju podnijeti visoka temperaturna opterećenja koriste se čelici i legure titana.

## 2.7 Modularnost sustava [37]

Značajna karakteristika današnjih komercijalnih bespilotnih letjelica njihova je modularnost – ne samo modularnost u smislu mogućnosti postavljanja senzora za različite namjene na istu letjelicu, već i u smislu modularne izrade osnovnih konstrukcijskih elemenata letjelice kako bi oni bili prenosivi i lako zamjenjivi u slučaju kvara ili oštećenja letjelice (primjerice zbog pada ili loše izvedenog manevra slijetanja). Većina današnjih manjih bespilotnih sustava isporučuje se rastavljena i složena u lako prenosivi kofer, kao što je prikazano na Slici 2.20.



Slika 2.20 Letjelica Atlasus koja se isporučuje rastavljena u prenosivom koferu [45]

### 3 ANALIZA KONFIGURACIJA BESPILOTNIH LETJELICA I PREGLED TRŽIŠTA

#### 3.1 Komercijalna uporaba bespilotnih letjelica [7], [17] [46], [47]

U onom trenu kada neku inovaciju prestanemo smatrati višom i prosječnim korisnicima nedostupnom tehnologijom, već komoditetom svakodnevne upotrebe, sve značajke tog proizvoda postaju iskoristive - u smislu mogućnosti prenošenja (uređaja i podataka) i umrežavanja s drugim uređajima. Tehnologije pametnih telefona i računarstva u oblaku (*cloud computing*) te razvoj koncepta Internet of Things<sup>8</sup> danas omogućavaju brzo prenošenje, obradu i interpretaciju podataka snimljenih bespilotnom letjelicom, a bespilotne letjelice svakodnevno pronalaze nove namjene. Prodor potrošačkih i komercijalnih UAV na *mainstream* tržište nije samo neizbježan, već se događa upravo sada: bespilotne letjelice su logična meta za iskorištavanje potencijala razvoja tehnologije senzora i komunikacijskih sustava.

Bespilotni sustavi pronašli su svoju primjenu u mnogim granama civilnog i komercijalnog sektora. Državne službe koriste bespilotne letjelice u misijama spašavanja, za nadzor i upravljanje prometom, za reagiranja u katastrofama i velikim nesrećama, akcije spašavanja, nadzor i zaštitu mora, nadzor velikih skupova, za nadzor kopnenih i morskih granica, za pomoć u policijskim akcijama, nadzor šumskih požara, nadzor lavina i sl. Znanstveno-istraživački sektor i sektor visoke tehnologije koristi bespilotne sustave za praćenje i prikupljanje meteoroloških podataka i podataka o kvaliteti zraka, vode i ostalih parametara okoliša, te za proširivanje postojeće telekomunikacijske infrastrukture i povezivanje satelitskih i zemljanih signala. U komercijalno-profesionalnom sektoru UAV sustavi koriste se za nadzor velikih gradilišta, inspekciju građevina, infrastruktura, dalekovoda, naftovoda, daljinska istraživanja, arheološka istraživanja, transport tereta, protupožarstvo, šumarstvo,

---

<sup>8</sup> *Internet of Things (IoT)* ili „Internet stvari“ je koncept međusobnog povezivanja i komunikacije (razmjene podataka) raznovrsnih uređaja putem mreže i podataka u oblaku (*cloud*) – primjerice upravljanje kućnim sensorima putem pametnog telefona.



urbano planiranje, istraživanja nalazišta nafte, plina i minerala, u poljoprivredi (praćenje usjeva, precizna poljoprivreda) te u profesionalnoj filmskoj i fotografskoj industriji.

Najraširenija komercijalna primjena ovih letjelica je za nadzor i snimanje terena za naknadnu obradu slika. Jedan komercijalni primjer takvog uspješnog mapiranja terena jest projekt mapiranja cestovne infrastrukture koje su 2013. godine za vladu SAD-a izvršili meksička tvrtka za nadzor Skylab u suradnji s proizvođačem softvera za 3D mapiranje i podršku bespilotnim letjelicama DroneDeploy: zajedničkim su snagama mapirali preko 1000 km cestovne infrastrukture. Za mapiranje je korišteno 5 letjelica Phantom III Professional kineske tvrtke DJI. Tvrtka DroneDeploy je obradila preko 120000 dobivenih snimki – i ugovaratelju isporučila rezultat: ortofoto i digitalni model terena (DSM, *Digital Surface Model*), prikazan na Slici 2.1 [42].



Slika 3.1 Mapirana fotografija ceste (lijevo) i ortomozaik<sup>9</sup> i DSM model (desno) [42]

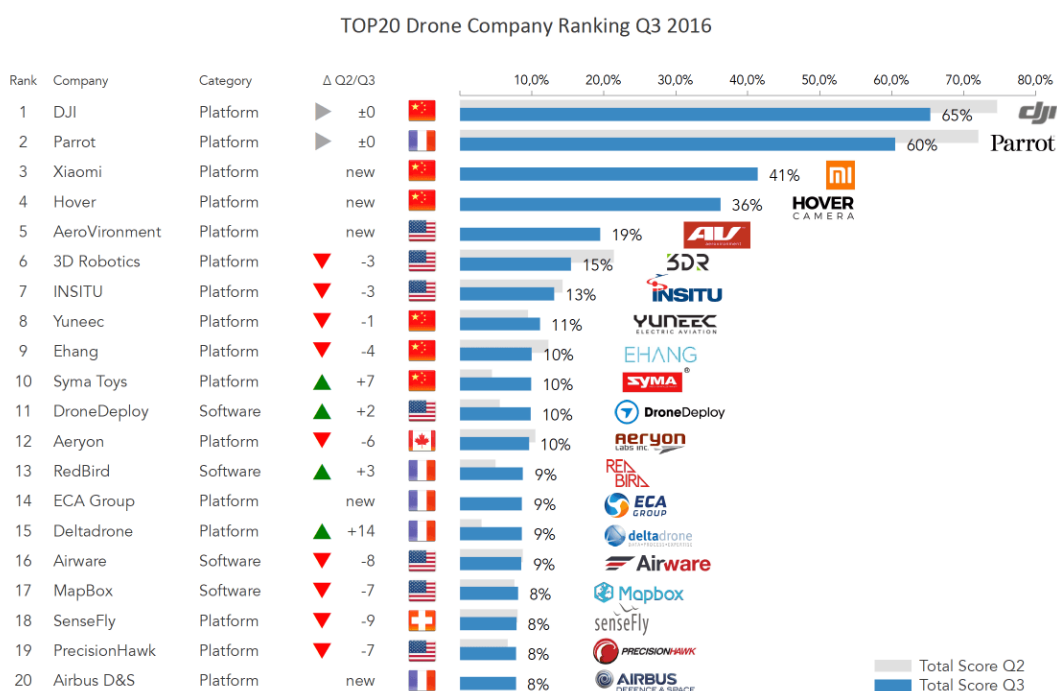
U poljoprivredi se bespilotne letjelice koriste za precizno zaprašivanje usjeva (DJI Agras MG-1, ZEROTECH Guardian-Z10 i japanska Yamaha RMAX ) te za snimanje i ortofotogrametriju polja usjeva. Problem za šire komercijalno korištenje letjelica većeg dometa i istrajnosti leži u legislativi: manji poljoprivrednici u pravilu još ne koriste potpuni

<sup>9</sup> Ortomozaik – veća slika složena od više geometrijski ispravljenih (ortorektificiranih) slika

potencijal bespilotnih letjelica zbog zakonskih ograničenja leta unutar vidnog polja (VLOS) koje je na snazi u velikom broju država (Slika 2.8 u poglavlju 2.4 Zakonski okviri).

Prvi korisnik dronova u građevinskoj industriji bila je građevinska kompanija Bechtel: 2013. godine udružili su se s tvrtkom Skycatch kako bi koristeći bespilotne letjelice prikupili podatke o tehnologiji i stanju (kvaliteti zraka, temperaturi, itd.) na jednom od najvećih crpilišta prirodnog plina u Australiji. Otada je na stotine kompanija u građevinskom, energetskom i naftnom sektoru prepoznalo vrijednost brzog i preciznog prikupljanja podataka pomoću dronova. [48]

Vodeće tvrtke na tržištu danas (Slika 3.2) nude cjelovita rješenja bespilotnih sustava, od upravljačkih aplikacija za tablete i pametne telefone (čime se eliminira potreba za proizvodnjom skupih kontrolera i zemljanih stanica) do integriranih CAD/CAM sustava (npr. Autodesk, Skycatch, DroneDeploy) za obradu prikupljenih podataka. Prikupljeni podaci se obrađuju „u oblaku“ i razmjenjuju s drugim sustavima u realnom vremenu.



Slika 3.2 Vodećih 20 tvrtki na tržištu bespilotnih letjelica u trećem kvartalu 2016 [49]

Bespilotne letjelice su složeni sustavi koji mogu sadržavati raznovrsnu senzorsku opremu i korisni teret. Ova je industrija stoga tijesno povezana s industrijom i razvojem senzora te uključuje i velik lanac nabave za širok raspon tehnologija ključnih za razvoj bespilotnih sustava (sustavi padobrana, pogonski sustavi, baterije, navođenje, navigacija, senzori, oprema za zemaljsku kontrolu, oprema za prikupljanje, prijenos i obradu podataka, kamere i video sustavi...), tržištem usluga koje se nude za razne industrije, a za koje se upotrebljavaju bespilotne letjelice (inženjering, poljoprivreda, dostava, pregled i inspekcija struktura, simulacija i obuka...) te s tržištem softvera koji se razvija za upravljanje letjelicama i obradu prikupljenih podataka.

Ne treba zanemariti ni onaj segment tržišta koji je trenutno u najvećoj ekspanziji: dronovi za rekreacijsku uporabu (tvrtka Parrot je samo 2015. godine prodala više od 1,5 milijuna dronova za zabavu [17]). Razvoj senzora i kamera, minijaturizacija mikroprocesora, rast podržavajućeg tržišta softvera i modularnih komponenata – sve to utječe na brisanje ionako tankih granica između običnih igračaka i letjelica za profesionalnu komercijalnu upotrebu.

### **3.2 Odluka o odabiru letjelice za specifičnu namjenu**

Bespilotne su letjelice sustavi čiji dizajn počiva na optimizaciji karakteristika i performansi na način da one odgovaraju specifičnoj namjeni letjelice. Ne postoji jednoobrazno rješenje za odabir bespilotne letjelice za sve namjene.

Odluka o odabiru započinje razmišljanjem o namjeni/misiji letjelice koja definira zahtjeve na karakteristike leta (istrajnost, dolet, visinu leta, manevrabilnost) – koje potom određuju ostale konstruktivne značajke sustava (konfiguracija VTOL/HTOL, vrsta pogona, stupanj autonomnosti). Sve ove značajke u međusobnoj su sprezi: odabir letjelice za specifičnu namjenu je složen proces koji zahtijeva analizu i usporedbu značajki konfiguracije, pogona, avionike, klastera senzora i podržavajućeg softvera u jedno optimalno rješenje specijalizirano za određenu namjenu.

### 3.2.1 Razmatranja o komercijalnim konfiguracijama letjelica [1], [7]

Letjelice koje se koriste u znanstveno-istraživačke svrhe (prikupljanje podataka o okolišu, klimatska istraživanja, modeliranje i analiza zagađenja i sl.) tehnološki su zahtjevne, velike, i sposobne nositi veći korisni teret (napredne senzore). Uz to, zahtjev za istrajnošću i velikom visinom leta ove letjelice tipično svrstava u HALE kategoriju s pogonom na solarne ili gorive ćelije. Ovo su letjelice visoke tehnologije, kakve su još daleko od upotrebe na komercijalnom tržištu.

U komercijalnom sektoru, jedna od najčešćih i najlogičnijih primjena bespilotnih sustava je za mapiranje i nadzor terena (katastarska razdioba terena, nadzor lokacija za smještaj zgrada, izrada topografskih i hidrografskih karti terena) i volumetrijske proračune naprednim fotogrametrijskim<sup>10</sup>, ortofoto<sup>11</sup> i DEM<sup>12</sup> metodama. Zahtjevi dulje istrajnosti, uz srednje veliku visinu leta, uvjetuju da te letjelice najčešće spadaju u kategoriju MALE letjelica s fiksnim krilima, kakva je primjerice letjelica Penguin C (Slika 2.16).

Za primjenu u preciznoj poljoprivredi potrebne su letjelice koje mogu nositi veću količinu korisnog tereta (pesticide/herbicide i sustave za njihovu aplikaciju, napredne EO senzore) i imati vrlo preciznu navigaciju i veliku manevrabilnost – obično se za ovu primjenu odabiru veće VTOL letjelice. Nadzor usjeva moguće je obaviti i dobro odabranim manjim VTOL ili HTOL LALE/LASE sustavima (ovisno o željenoj površini i kvaliteti slike). Za nadzor šuma i šumskih požara potrebne su letjelice koje mogu pokriti veće područje u jednom letu (tipično letjelice MALE karakteristika s fiksnim krilima) i sposobne nositi napredne elektro-optičke senzore (infracrvene i hiperspektralne). Iste karakteristike (s drugim sensorima) zahtijevaju se i za letjelice koje se koriste za nadzor mora (primjerice naftnih mrlja i zagađenja). Većina komercijalnih sustava letjelica s fiksnim krilima cjenovno raspoloživih na tržištu pripada komercijalnim letjelicama MALE te LASE/LALE skupina, tj. tipu sustava bespilotnih

---

<sup>10</sup> Fotogrametrija je tehnika koja koristi fotografiju za precizna mjerenja okoliša slaganjem slojeva slika i sagledavanja iste značajke iz dvije perspektive. Ovom metodom izračunavaju se udaljenosti i volumeni

<sup>11</sup> Geometrijski ispravljena zračna fotografija – korigirana prema karti

<sup>12</sup> Digital Elevation Model – digitalna ili 3D prezentacija površine terena iz podataka visine terena za mapiranje visina objekata i drveća

letjelica koje je moguće lansirati iz ruke ili s jednostavne lansirne rampe, kratkog do srednjeg doleta, visine leta i istrajnosti, opremljenih senzorima specijaliziranim za njihovo područje gospodarske upotrebe.

U građevinskim inspekcijama kritičnih infrastruktura (npr. brana ili visokih građevina, naftovoda ili željeznica), za pregled nepristupačnih terena i za akcije spašavanja poželjno je imati manevribilnu i malenu letjelicu sa sposobnošću vertikalnog polijetanja/slijetanja (VTOL, najčešće multirotor letjelice) s višim stupnjem autonomije i svjestnosti prostora, sposobnu prema potrebi nositi i infracrvene senzore. Ove letjelice imaju širok raspon izvedbi, ovisno o namjeni i profilu misije, ali se najčešće koriste na malim visinama leta. Upravljanje za većinu ovih letjelica zakonski je ograničeno na upravljanje unutar granice vidnog polja (VLOS). Za primjene koje zahtjevaju upravljanje izvan vidnog polja (BLOS) potrebno je ishoditi potrebne dozvole od strane zakonodavnih tijela nadležnih u državi u kojoj će se letjelica koristiti. Stoga se letjelice veće istrajnosti (pretežno sustavi s fiksnim krilima), kakve su potrebna za primjene u šumarstvu i poljoprivredi, koriste većinom od strane vlada, državnih institucija i velikih kompanija.

Odabir letjelice nije nimalo jednostavan proces: mnogo međusobno ovisnih kriterija, ograničenja zakonske regulative specifična za pojedine države, dinamično i zahtjevno tržište usluga i podržavajućih sustava – sve to treba uzeti u obzir pri odabiru letjelice za uporabu u civilnom sektoru.

## 4 VIŠEKRITERIJSKO ODLUČIVANJE I SUSTAVI POTPORE ODLUČIVANJU

### 4.1 Višekriterijsko odlučivanje [50], [51]

Donošenje odluka postupak je koji je ključan za svaki poslovni (i životni) proces. Što je problem složeniji (što više međuovisnih kriterija sadrži), to je teže donijeti odluku. Ljudska intuitivna prosudba i na njoj temeljen proces donošenje odluka bez pravilnih matematičkih alata proces je koji je daleko od optimalnog i daje to lošije rezultate što je problem složeniji i što je razina stresa osobe koja donosi odluku veća.

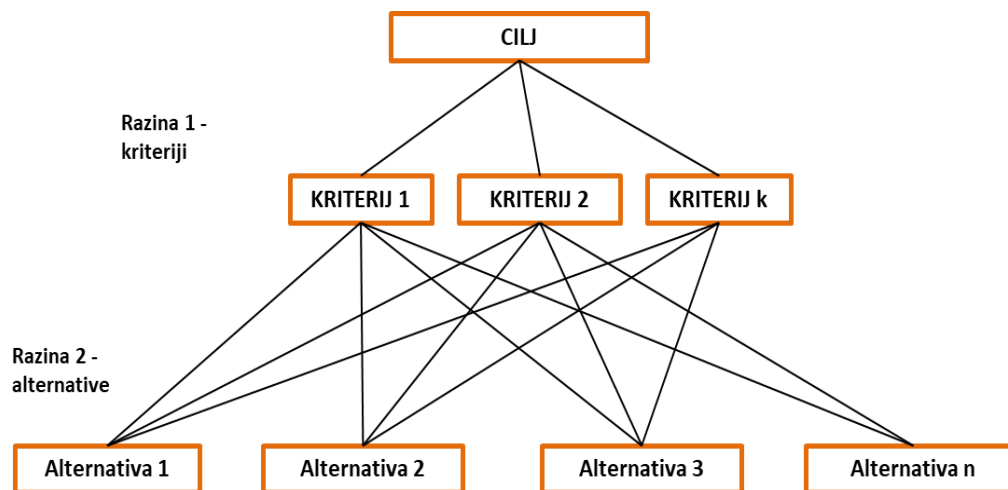
Kroz povijest organiziranog rada i upravljanja težilo se alatima za uklanjanje ljudskog faktora iz ove jednadžbe: discipline poput statistike, ekonomije i istraživanja rada razvile su različite matematičke metode i modele za racionalno donošenje odluka. Proces apstraktnog prikaza stvarnog sustava te dekonstrukcije i formaliziranja problema naziva se *modeliranje*. [50] Modeliranjem se postiže apstraktna i predodžba stvarnog sustava koja teži pojednostavljenju problema temeljem pretpostavki, uz istovremeno zadržavanje osnovnih poveznica između elemenata odluke, bez nepotrebnih detalja. Matematički gledano, modeli se sastoje od varijabli i specifikacija interakcija između varijabli. S točke gledišta donošenja odluka, model donošenja odluka sastoji se od tri komponente: mjere važnosti ponuđenih opcija (kriterija odabira), mjere važnosti raspoloživih alternativa te mjere nesigurnosti preko varijabli koje utječu na proces donošenja odluka.

Primjer jedne takve metode višekriterijalne analize je i analitičko-hijerarhijski proces – AHP metoda (eng. AHP - *Analytic Hierarchy Process* ), metoda koju je 80-ih godina prošlog stoljeća razvio Thomas L. Saaty [51].

## 4.2 Analitičko-hijerarhijski proces – AHP metoda [51], [52], [53]

Analitičko-hijerarhijski proces (AHP) je strukturirana tehnika za organizaciju i analizu kompleksnih odluka. Za uporabu te metode potrebno je problem razložiti u sljedeće faze: [53]

1. Definiranje problema
2. Strukturiranje hijerarhije donošenja odluke od vrha prema dolje – s ciljem odluke postavljenim na vrhu (Slika 4.1), nakon kojeg slijedi razina kriterija, te alternative na posljednjoj razini stabla. Složeniji AHP procesi mogu uključivati podciljeve i podkriterije na razinama između prikazanih i mogu biti mnogo složeniji od prikazane strukture
3. Izrada usporednih matrica za usporedbu u parovima na svakoj razini hijerarhijske strukture te usporedne procjene relativne važnosti elemenata na nižim razinama strukture u odnosu prema elementima s više razine strukture. Ovim postupkom se izračunavaju lokalni prioriteti (težine) kriterija, podkriterija i alternativa
4. Sintetiziranje lokalnih prioriteta u ukupne prioritete alternativa i određivanje konačnog rješenja te analiza osjetljivosti



Slika 4.1. Strukturiranje hijerarhije donošenja odluke AHP metodom [51]

Psiholozi tvrde [54] kako ljudski mozak može istodobno uspoređivati po dvije alternative – što se više taj broj povećava, povećava se i pristranost prosudbe i nekonzistentnost postupka. Stoga se AHP metoda temelji na međusobnoj usporedbi *parova elemenata*. Za izradu tih

usporedbi potrebna nam je brojčana skala pomoću koje se ocjenjuje važnost ili prevaga jednog elementa nad drugim prilikom matričnog uspoređivanja. U Tablici 4.1 [51] prikazana je Saatyjeva skala relativne važnosti, stupnjevana brojčanim veličinama od 1 do 9; gdje 1 predstavlja najmanje važan element, a broj 9 element od najveće važnosti za odluku. Ovim se postupkom, prilagođenim ljudskoj prirodi odlučivanja i procesa dodjeljivanja važnosti (usporedbom između po dva elementa) kvantificira subjektivna vrijednost „važnosti“ elementata u procesu (kriterija i alternativa). Neparnim brojevima ljestvice pridružene su osnovne vrijednosti, dok parni brojevi opisuju njihove međuvrijednosti. Moguće je koristiti i decimalne međuvrijednosti za preciznije izražavanje razlike u važnosti između elemenata.

Tablica 4.1 Saatyjeva skala relativnih važnosti s opisom značenja [51]

| <b>Intenzitet važnosti</b> | <b>Definicija</b>                    | <b>Objašnjenje</b>   |
|----------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>1</b>                   | <b>Jednako važno</b>                 | Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju.  |
| <b>3</b>                   | <b>Umjereno važnije</b>              | Na temelju iskustva i procjena, daje se umjerena prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu.   |
| <b>5</b>                   | <b>Strogo važnije</b>                | Na temelju iskustva i procjena, strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu.  |
| <b>7</b>                   | <b>Vrlo stroga, dokazana važnost</b> | Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu, njezina dominacija dokazuje se u praksi.   |
| <b>9</b>                   | <b>Ekstremna važnost</b>             | Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu, potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću.  |
| <b>2, 4, 6, 8</b>          | <b>Međuvrijednosti</b>               |  |
| <b>1,1 – 1,9</b>           | <b>Decimalne vrijednosti</b>         | Pri usporedbi aktivnosti koje su po važnosti blizu jedna drugoj, potrebne su decimalne vrijednosti kako bi se preciznije izrazila razlika u njihovoj važnosti. |

AHP metoda omogućuje i praćenje konzistentnosti procjena u svakom trenutku postupka uspoređivanja u parovima pomoću indeksa konzistencije. Pomoću indeksa konzistencije



$CI = \frac{\Lambda_{max} - n}{n-1}$  (gdje je  $n$  broj kriterija, a  $\Lambda_{max}$  konstanta za izračun indeksa konzistentnosti) izračunava se omjer konzistencije  $CR = \frac{CI}{RI}$ , gdje je  $RI$  slučajni indeks (indeks konzistencije za matrice reda  $n$  slučajno generiranih usporedbi u parovima) koji se koristi prema već izračunatim vrijednostima iz Tablice 4.2. [54]

Tablica 4.2 Vrijednosti RI slučajnih indeksa [54]

|      |   |   |      |      |      |      |      |     |      |      |
|------|---|---|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| $n$  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   | 9    | 10   |
| $RI$ | 0 | 0 | 0,52 | 0,89 | 1,11 | 1,25 | 1,35 | 1,4 | 1,45 | 1,49 |

Usporedba AHP metodom zasniva se na četiri aksioma: [51]

- Aksiom recipročnosti. Ako je element  $A$   $n$  puta značajniji od elementa  $B$ , tada je element  $B$   $1/n$  puta značajniji od elementa  $A$ .
- Aksiom homogenosti. Usporedba ima smisla jedino ako su elementi usporedivi
- Aksiom zavisnosti. Dozvoljava se usporedba među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na element višeg nivoa, tj. usporedbe na nižem nivou zavise od elementa višeg nivoa.
- Aksiom očekivanja. Svaka promjena u strukturi hijerarhije zahtjeva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.

Kriteriji mogu biti *kvalitativni* i *kvantitativni*. Važnost kvalitativnih kriterija prosuđuje se pojedinačno i subjektivno, jer nije moguće točno prosuditi o važnosti jednog kvalitativnog kriterija naspram drugom. Moguće je okvirno znati koliko je jedan kriterij važniji od drugog u i sukladno tome procijeniti njegovu važnost, koja je kod kvantitativnih kriterija diskretna vrijednost. Isto vrijedi za sve razine hijerarhijskog stabla: kriterije, podkriterije i alternative. Kvalitativni kriteriji u problemu određivanja letjelice mogu biti, primjerice, razina buke, upravljivost, autonomnost, konfiguracija ili vrsta pogona, dok su kvantitativni kriteriji predstavljeni diskretnim veličinama poput duljina trajanja leta, snage motora, težine ili cijene. AHP metoda je prilagođena ljudskom načinu razmišljanja i procjene i već godinama dokazivana u praksi. Apsolutna skala važnosti za usporedbu i uspoređivanje u parovima

olakšavaju i ubrzavaju proces donošenja odluka i tako smanjuju vrijeme i troškove. Međutim, u konačnici je ipak čovjek taj koji donosi odluku: određivanje važnosti elemenata je potpuno subjektivan proces, iako potpomognut organiziranim i kvalitativnim informacijama.

Kod kompleksnih zadataka, gdje postoji veliki broj međuovisnih kriterija i potkriterija, struktura problema postaje sve složenija, a zahtijevani broj usporedbi parova jako velik, što produljuje i otežava proces donošenja odluke. Razvoj računalnih i informacijskih sustava koji se odvio uporedo s razvojem metoda višekriterijskog odlučivanja omogućio je (logičnu) implementaciju tih metoda u softverska rješenja, koja potrebne analize i usporedbe mogu izvršiti pomoću vlastitih samostalnih softvera za analizu ili pomoću integriranih računalnih okruženja za kompleksno donošenje odluka. Takvi se računalni sustavi i programi nazivaju sustavi za potporu odlučivanju (eng. *Decision Support Systems*, DSS) [55]

### 4.3 Sustavi za potporu odlučivanju – DSS [50], [55]

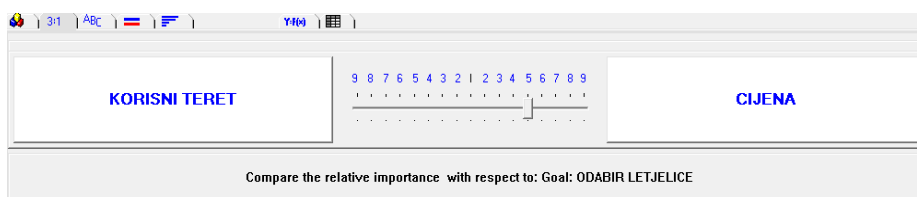
Od svojih ranih začetaka (70-ih godina prošlog stoljeća) do danas ovi su se sustavi proširili u različite grane poslovanja, upravljanja, proizvodnje, inženjerskih djelatnosti, vojske i medicine. Posebnu vrijednost pokazuju u situacijama kada je količina raspoloživih informacija tolika da „preplavljuje“ osobu koja treba donijeti odluku i matematički model čini presloženim (prevelik broj usporedbi) – ovdje DSS sustavi nadomještaju taj logičko-kognitivni ljudski nedostatak inteligentnim i sustavnim dohvaćanjem informacija i relevantnog znanja, potpomažući tako proces strukturiranja odluka.

DSS sustavi također potpomažu proces višekriterijskog odabira između dobro definiranih alternativa i izgradnju formalnih pristupa rješavanju problema. Jedan takav razvijeni sustav za računalno potpomognuto donošenje odluka koji se temelji na primjeni AHP modela jest softverski paket *Expert Choice*, pomoću kojeg je u nastavku izvršen postupak odabira bespilotne letjelice.

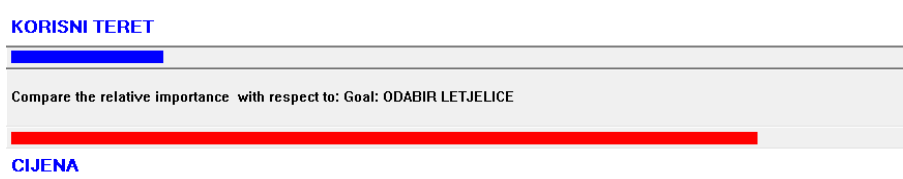
#### 4.4 Softverski paket Expert Choice [56], [54]

Expert Choice jedan je od najpoznatijih alata za višekriterijalno odlučivanje na tržištu, koji se temelji na analizi pomoću AHP metode. Izradili su ga Thomas Saaty i Ernest Forman 1983. godine. Program omogućuje formiranje problema i njegovo strukturiranje bez ograničenja na kompleksnost strukture. Omogućeno je zadavanje i uspoređivanje važnosti različitih kriterija i alternativa na nekoliko načina. Vrlo je lako sistematiziranje informacija, provedba analiza rezultata ili prosudba. U programu je moguće izvršiti i *what-if*<sup>13</sup> analize i analize osjetljivosti, odnosno ispitivanje promjene ulazne vrijednosti nekog elementa (primjerice, važnosti kriterija) na izlaznu vrijednost (odabir alternative).

Expert Choice je intuitivan program s jasnim grafičkim analizama rezultata koji u potpunosti prati postavke AHP metodologije: nakon postavljanja cilja i unosa kriterija, kriteriji se uspoređuju po važnosti. Program nudi tri načina usporedbe važnosti elemenata: numerički (Saatyjeva skala relativne važnosti, Slika 4.2), grafički (Slika 4.3) i opisni (opis riječima koliko je koji element usporedbe važniji ili manje važan od drugog).



Slika 4.2 Numerička usporedba važnosti elemenata u programu Expert Choice



Slika 4.3 Grafička usporedba važnosti elemenata u programu Expert Choice

U ovom je Završnom radu istraživanje provedeno u verziji programa *Expert Choice 11*.

<sup>13</sup> *what-if* (što-ako) analiza – proces promjene vrijednosti ili težine elemenata analize kako bi se utvrdilo kakav je utjecaj tih elemenata na konačni rezultat

## 5 ODABIR BESPILOTNE LETJELICE PRIMJENOM AHP METODE

Pravilan odabir bespilotne letjelice za unaprjeđenje poslovanja kompanije može doprinijeti znatnom poboljšanju i ubrzanju poslovnih i industrijskih procesa (nadzora, mjerenja, inspekcija i sl.), što vodi do uštede resursa i povećanja učinkovitosti poslovnih procesa tvrtke – a time i do njene konkurentnosti na tržištu.

U ovom je poglavlju prikazan je proces donošenja odluke o bespilotnoj letjelici za uporabu u komercijalne svrhe (poljoprivreda, šumarstvo, pregled građevina) donesen metodom odlučivanja u analitičko-hijerarhijskom procesu (AHP – *Analytical Hiyerarchical Process*) pomoću računalnog alata za podršku odlučivanju (DSS - *Decision Support System*), sotverskog paketa *Expert Choice 11*.

### 5.1 Analiza komercijalno dostupnih letjelica

Proces donošenja odluke o tipu i konfiguraciji letjelice koja bi odgovarala specifičnoj namjeni (traženje letjelice koja odgovara karakteristikama leta i misije predmetne letjelice) je složen proces višekriterijskog odlučivanja. Dizajn bespilotne letjelice u pravilu nailazi na slične optimizacijske probleme kao i dizajn letjelice s ljudskom posadom, uz vlastite projektne specifičnosti. Primjerice, pri projektiranju bespilotne letjelice nije potrebno voditi računa o sigurnosti putnika, već samo o sigurnosti i sigurnom povratku same letjelice i nošenih senzora. U Tablici 5.1 dana je analiza 10 različitih komercijalnih letjelica koje su danas u široj uporabi. Iz tablice je vidljivo su zahtjevi manevaribilnosti i istrajnosti često suprotstavljeni konstrukcijskim rješenjima tih zahtjeva: konfiguracije se tako dijele na letjelice s rotorima (letjelice veće manevaribilnosti) i letjelice s fiksnim krilima (letjelice veće istrajnosti).

Letjelice s rotorima (DJI Matrice 600, Yuneec Typhoon H, SenseFly Albris, Shiebel Camcopter S-100, Service Drone Eagle V2) imaju sposobnost vertikalnog polijetanja i slijetanja, što je bitna karakteristika za primjenu u građevniškoj industriji ili za brzi pregled i snimanje situacije na terenu. Takve letjelice (izuzev Shiebelovog Camcoptera) u pravilu su male i manevaribilne, s četiri do osam rotora koje pokreću električni motori. Upravljanjem

brzinom vrtnje rotora mogu se postići precizni manevri potrebni za pregled nepristupačnih struktura, kakve su npr. brane, a u svrhu prikupljanja što kvalitetnijih i jasnijih zračnih snimki.

Tablica 5.1 Analiza letjelica dostupnih na komercijalnom tržištu

| Model (tvrtka)                           | Konfiguracija | MTOW    | Korisni teret | Max. visina | Istrajnost | Pogon      | Primjena  | Cijena (USD) |
|--|---------------|---------|---------------|-------------|------------|------------|---|--------------|
| Lancaster 5 (Precision Hawk) [18]        | fiksna krila  | 3,55 kg | 1,15 kg       | 2500 m      | 45 min     | električni | poljoprivreda, energija i rudarstvo, osiguranje i hitne reakcije, nadzor okoliša  | 25000        |
| Matrice 600 (DJI) [19]                   | heksakopter   | 15,1 kg | 6 kg          | LOS*        | 16-35 min  | električni | industrija, građevina, pregled kritičnih objekata   | 5000         |
| Typhoon H (Yuneec) [57]                  | kvadrokopter  | 1,95 kg | integriran    | LOS         | 25 min     | električni | zračna fotografija i snimanje   | 3500         |
| UX5 (Trimble) [58]                       | fiksna krila  | 2,5 kg  | integriran    | 5000 m      | 50 min     | električni | poljoprivreda, mapiranje  | 51000        |
| DT18 (Delair-Tech) [59]                  | fiksna krila  | 2 kg    | integriran    | 3000 m      | 90 min     | električni | mapiranje, modeliranje i pregled energetskih vodova, terena, itd.   | 37700        |
| Albris (SenseFly) [43]                   | kvadrokopter  | 1,8 kg  | integriran    |             | 22 min     | električni | pregled građevina i struktura   | 15000        |
| eBee Plus (SenseFly) [60]                | fiksna krila  | 1,1 kg  | integriran    | LOS*        | 59 min     | električni | nadzor, mapiranje, poljoprivreda  | 25000        |
| Penguin BE (UAV Factory) [61]            | fiksna krila  | 21,6 kg | 6,6 kg        | 6000 m      | 110 min    | električni | precizna poljoprivreda, transport tereta, znanstvena istraživanja   | 17700        |
| Camcopter S-100 (Shiebel) [62]           | helikopter    | 200 kg  | 50 kg         | N/A***      | 6 h        | MSU1**     | pregled naftovoda, poljoprivreda, laserskon skeniranje iz zraka, šumarstvo, film, 3D mapiranje, prikupljanje atmosferskih uzoraka | N/A***       |
| Multirotor G4 Eagle (Service Drone) [63] | oktokopter    | 5 kg    | 2,5 kg        | LOS*        | 30 min     | električni | transport tereta, nadzor  | N/A***       |

\* Line of Sight - upravljanje unutar granica vidnog polja  
 \*\* Motor s unutranjim izgaranjem  
 \*\*\* N/A - nije poznato

Ove letjelice u pravilu imaju određeni stupanj autonomije u smislu izbjegavanja sudara i osnovne situacijske svjesnosti, no upravljanje njima je ograničeno na granicu vidnog polja (LOS). Ograničenje kapaciteta baterija uvjetuje i kratku istrajnost leta (od 10 min do 1 h) i smanjenu nosivost korisnog tereta. Shiebelova letjelica Camcopter S-100 je bespilotni helikopter s klipnim motorom, težine 200 kg, nosivosti 50 kg i trajanja leta do 6 h sa srednjim opterećenjem, koji svojim karakteristikama znatno odskaka od ostalih prikazanih letjelica. Vrlo veliku MTOW i istrajnost leta omogućava motor s unutarnjim izgaranjem – sve ostale letjelice u ovoj analizi koriste električni pogon s baterijama.

Letjelice s fiksnim krilima (Precision Hawk Lancaster 5, Trimble UX5, Delair-Tech DT18, SenseFly eBee Plus, UAV Factory Penguin BE) nemaju sposobnost vertikalnog polijetanja i slijetanja (VTOL), što znači da je za njihovo polijetanje potrebno ili lansiranje (katapult ili iz ruke) ili pista, a za slijetanje neki sustav za povrat letjelice (padobran) ili pista za slijetanje (po preprogramiranom slijedu slijetanja). Od predstavljenih letjelica s fiksnim krilima jedino Lancaster 5 ima klasičnu konfiguraciju krila, ostale su letjelice u konfiguraciji letećeg krila ili delta krila. Električni pogon letjelica uvjetuje i njihovu nosivost i istrajnost u zraku, koja je ipak, zbog konstrukcijskih razloga, općenito veća za konfiguracije s fiksnim krilima nego za multirotor sustave (50 – 110 min), što tim letjelicama omogućava prikupljanje podataka sa šireg područja nadzora. Također, letjelice s fiksnim krilima često posjeduju viši stupanj autonomije (potpuno predprogramirani let) i zahvaljujući svojoj produljenoj istrajnosti u zraku i sposobnosti leta izvan vidnog polja operatera, najčešći su izbor za misije mapiranja i nadzora.

Svaka konfiguracija ima svoje prednosti i nedostatke. Sustav s fiksnim krilima može obići šire područje leta i ostati u zraku dulje ali ima specifične zahtjeve polijetanja i slijetanja koji mogu značajno smanjiti praktičnost primjene te konfiguracije u nekim situacijama. S druge strane, klasični multirotor sustavi često ne nude dovoljno veliku istrajnost leta i snagu dovoljnu za nošenje potrebnih senzora.

Zanimljivo rješenje ovog problema ponudila je tvrtka Plurato iz Hrvatske [64]. Letjelica Plurato Skycam je oktokopter na električni pogon koja se koristi za profesionalno snimanje iz zraka (za naknadnu obradu podataka sa zračnih fotografija) ima očekivano projektirano

trajanje leta od oko pola sata s ugrađenim baterijama. Međutim, pomoću patentiranog i inovativnog sustava pametne namatalice ova letjelica može, spojena kabelom na izvor napajanja, ostati u zraku praktički neograničeno dugo, što joj omogućava primjenu u svim poljima nadzora (požara, većih površina, događanja, infrastruktura, gradilišta, objekata, poljoprivrednih imanja) i inspekcije (vjetrenjača, plinovoda, naftovoda, dalekovoda, rafinerija, električnih stupova, mostova, brana, i sl.). Ograničavajući faktor ove letjelice ipak ostaje njena fizička povezanost sa zemljanim stanicama.

## 5.2 Kriteriji za odabir bespilotne letjelice

U ovom poglavlju opisani su cilj odabira, kriteriji i moguće alternative za analizu u softverskom paketu *Expert Choice*. Cilj ovog procesa je odabrati optimalnu komercijalnu letjelicu s obzirom na njene karakteristike i zadane kriterije koja ne bi bila ograničena samo na jednu specifičnu namjenu, već bi se mogla koristiti za različite misije.

Iz Tablice 5.1 izbačene su letjelice za koje nije bilo dovoljno podataka za analizu (Camcopter S-100 i Service Drone Multirotor Eagle G4) te letjelice koje su svojim karakteristikama slične drugim letjelicama u Tablici 5.1. Za daljnju su analizu odabrane po dvije reprezentativne HTOL i VTOL konfiguracije (ukupno 4 alternative), prema kriterijima konfiguracije (VTOL/HTOL), maksimalne težine pri polijetanju (koja uključuje korisni teret – senzore), istrajnosti leta, maksimalne visine leta (koja sugerira razinu autonomnosti), vrste korisnog tereta (integrirani ili modularni) i cijene sustava, prikazane u Tablici 5.2.

Tablica 5.2 Karakteristike letjelica kao kriteriji za odabir alternative

| Model (tvrtka)  | Lancaster 5<br>(Precision Hawk) | Matrice 600<br>(DJI) | UX5<br>(Trimble) | Albris<br>(SenseFly) |
|---|---------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| <b>Konfiguracija</b>  | HTOL                            | VTOL                 | HTOL             | VTOL                 |
| <b>MTOW (kg)</b>  | 3,55                            | 15,1                 | 2,5              | 1,8                  |
| <b>Korisni teret**</b>  | 0.32                            | 0,4                  | 0                | 0                    |
| <b>Maks. visina (m)</b>   | 2500                            | LOS*                 | 5000             | LOS*                 |
| <b>Istrajnost (min)</b>   | 45                              | 25                   | 50               | 22                   |
| <b>Cijena (USD)</b>   | 25000                           | 5000                 | 51000            | 15000                |
| * Line of Sight - upravljanje unutar granica vidnog polja                   |                                 |                      |                  |                      |
| **Korisni teret: omjer mase korisnog tereta i MTOW. Integrirani senzori - 0 |                                 |                      |                  |                      |

### **5.2.1 Konfiguracija**

Konfiguracija letjelice uvjetovana je njenom namjenom: trebamo li letjelicu koja može vertikalno poletjeti i sletjeti (VTOL) i ima dobru manevaribilnost, ali kratko trajanje leta (multirotor konfiguracije), ili letjelicu koja može nositi složenije senzore i pokriti veće površine u jednom preletu (konfiguracije s fiksnim krilima - HTOL)? Mala prednost u analizi (3 na Saatyjevoj skali) dana je sposobnosti vertikalnog polijetanja i slijetanja.

### **5.2.2 Maksimalna težina pri polijetanju (MTOW)**

Letjelice koje mogu nositi snažne i precizne senzore teže su, veće i skuplje, a manje letjelice često ne mogu ponijeti zahtijevani korisni teret.

### **5.2.3 Istrajnost leta**

Trajanje leta u izravnoj je vezi s masom letjelice, korisnog tereta i korištenom vrstom pogonskog sustava. Letjelice na električni pogon u pravilu imaju kraću istrajnost leta od letjelica s motorima s unutarnjim sagorijevanjem, a letjelice s rotorima manju istrajnost leta od letjelica s fiksnim krilima.

### **5.2.4 Maksimalna visina leta**

Većina komercijalnih sustava letjelica s rotorima ograničena je na uporabu unutar vidnog polja (LOS, do 122 m prema FAA<sup>14</sup>), dok su letjelice s fiksnim krilima projektirane za veću istrajnost i veću maksimalnu visinu leta. Ovo je važno za odabir letjelice koja mora imati širi pregled područja (nadzor šumskih požara, poplava, mora i obale i sl.)

### **5.2.5 Cijena**

Troškovi nabave ili projektiranja ovakve letjelice za njenu komercijalnu uporabu važan su kriterij odluke o uvođenju novog sustava u poslovanje tvrtke. Komercijalno dostupne letjelice na tržištu nude gotova i cjelovita rješenja za prikupljanje i obradu podataka od strateške važnosti za tvrtku: od same platforme, preko sustava upravljanja, do softvera za obradu

---

<sup>14</sup> Federal Aviation Agency

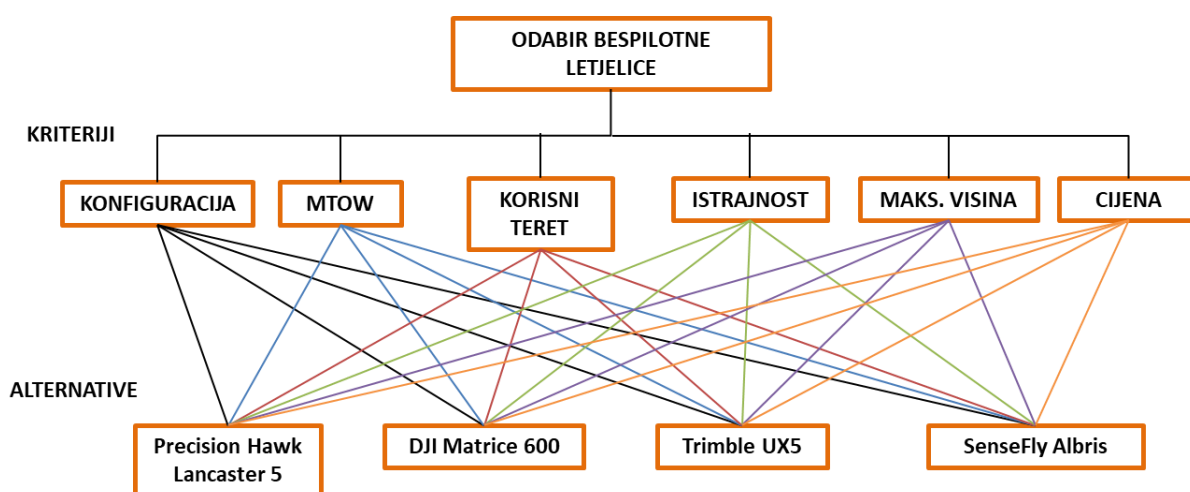


podataka. U ovom radu predstavljena su takva, gotova rješenja, koja su u pravilu modularna i nadogradiva.

### 5.2.6 Korisni teret

Senzori na bespilotnoj letjelici osnova su njene funkcionalnosti: što više složenijih senzora letjelica može ponijeti, to je prikladnija za obavljanje složenijih zadaća i raznovrsnijih misija. Kriterij je izračunat prema omjeru korisnog tereta koji letjelica može nositi i omjeru njene maksimalne težine pri polijetanju. Za letjelice koje imaju integrirane senzore (bez mogućnosti zamjene), ova vrijednost u tablici je 0.

Na Slici 5.1 dan je shematski prikaz međuovisnosti kriterija i alternativa. Iz daljnje su analize zbog nedovoljno podataka (cijena) izostavljene letjelice Camcopter S-100 i Multirotor G4 V2 Cargo, te letjelice koje su svojim karakteristikama bile slične ovima predstavljanim u analizi u nastavku.



Slika 5.1 Prikaz kriterija i alternativa

Prije samog procesa analize potrebno je provesti ponderiranje kriterija po važnosti. Kriterij od najveće važnosti pri odabiru je *trajanje leta (istrajnost)* – poželjno je što dulje trajanje leta radi pokrivanja što većeg područja i prikupljanja što većeg broja podataka. Sljedeći kriterij po

važnosti je *cijena* sustava: rezultati prikupljeni pomoću bespilotnog sustava moraju biti upotrebljivi i komercijalno isplativi. Poželjno je da je *korisni teret* letjelice (tj. oprema pomoću koje se prikupljaju podaci s terena) modularan, tj. da se na letjelici prema potrebi može izvršiti zamjena senzora (u svrhu prikupljanja drugog tipa podataka) - iako mnoge današnje letjelice imaju senzore potrebne za izvršavanje projektirane zadaće integrirane u sklop avionike (čime se smanjuje težina letjelice i s njom povezani konstrukcijski zahtjevi pogona). Prednost se daje mogućnosti zamjene senzora i pritom većoj nosivosti u odnosu na MTOW letjelice. Veća *visina leta* omogućava širi pregled područja a u tom se kriteriju ogleda i autonomnost letjelice: autonomne letjelice, sposobne pratiti predprogramirane zadatke pomoću podataka prikupljenih sa senzora u realnom vremenu (povećana situacijska svjesnost) nemaju ograničenje djelovanja unutar vidnog polja (LOS).

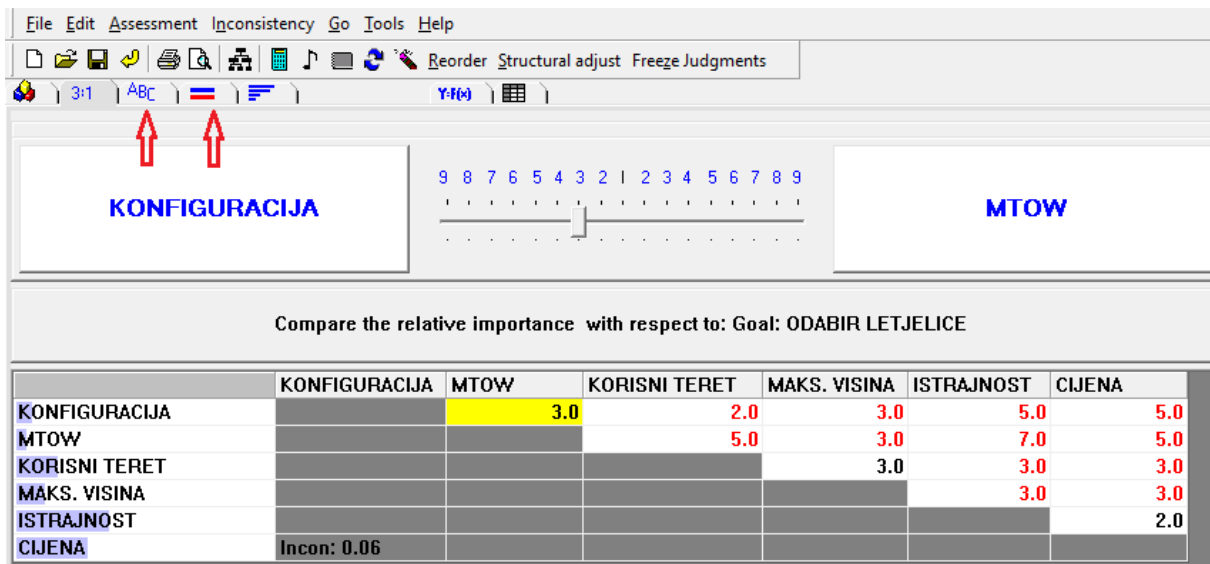
*Konfiguracija letjelice* (fiksna ili rotirajuća krila) određuje mogućnosti polijetanja, slijetanja i manevriranja (VTOL/HTOL) te samim time i područje primjene letjelice (pregled i inspekcija građevina ili nadzor i mapiranje terena). *Maksimalna masa letjelice pri polijetanju (MTOW)* određuje mogućnost letjelice da prenosi složenije i teže senzore i opremu, ali trend minijaturizacije senzora i softvera za analizu zračnih fotografija ovaj kriterij stavlja na najniže mjesto na ljestvici važnosti: danas i lake letjelice (težine manje od 5 kg), kakve su se prije smatrale igračkama, mogu nositi integriranu profesionalnu opremu.

Temeljem navedenog kriteriji za odabir letjelice ponderirani su kako slijedi, s najvišim ponderom pod brojem 1, a najslabijim pod brojem 6:

1. Istrajnost
2. Cijena
3. Korisni teret
4. Maks. visina leta
5. Konfiguracija (HTOL/VTOL)
6. MTOW

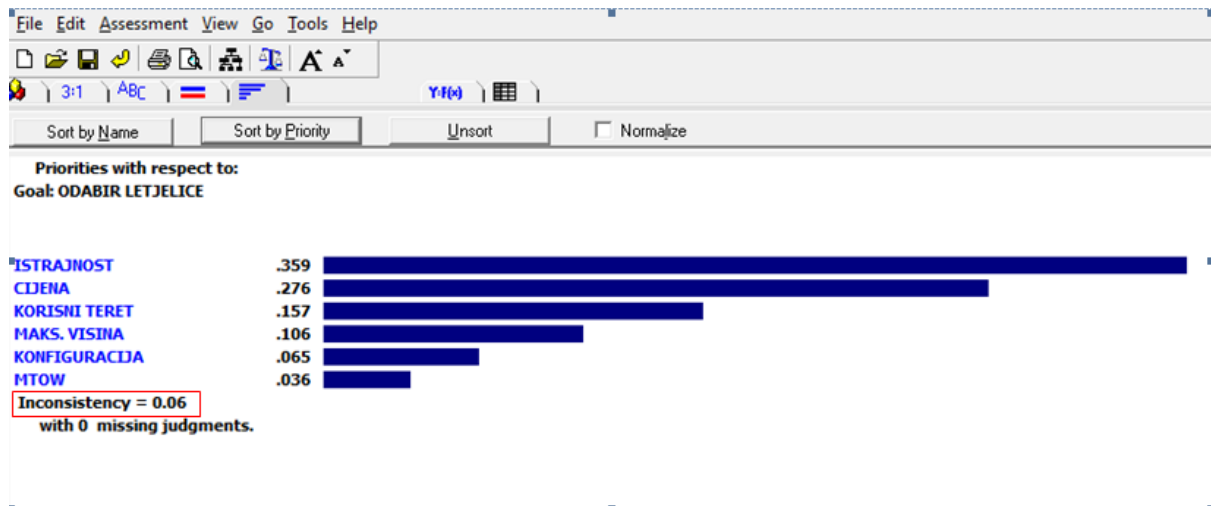
U programski paket Expert Choice prvo su unešeni kriteriji za odabiti i ponderirani prema svojoj važnosti. Proces vrednovanja je subjektivan i u softveru *Expert Choice* može se izvesti

pomoću brojčanih vrijednosti Saatyjeve skale (Slika 5.2). Istu usporedbu moguće je izvršiti i grafičkim ili opisnim putem, klikom na kartice obilježene crvenim strelicama na Slici 5.2



Slika 5.2 Usporedba važnosti kriterija pomoću Saatyjeve skale

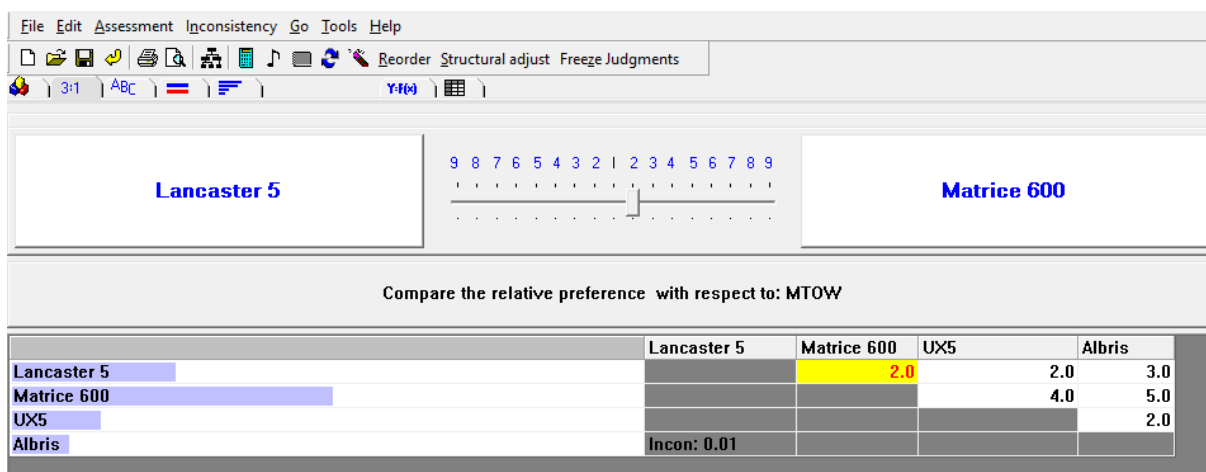
Potupak ponderiranja kriterija je subjektivan i uvjetuje konačnu odluku. Poredak kriterija prema njihovoj važnosti prikazan je na Slici 5.3.



Slika 5.3 Poredak kriterija prema važnosti

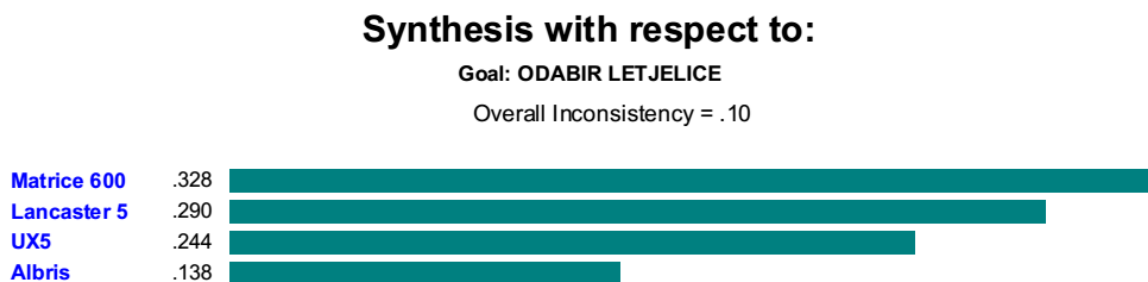
Iz Slike 5.3 vidljivo je da je vrijednost indeksa konzistentnosti 0,06, što predstavlja inkonzistentiju od 5 % koja je manja od 10 %. To znači da je model težina kriterija (tj. postupak usporedbe kriterija) konzistentan i dobro strukturiran.

Potom se u program unose moguće alternative (4 letjelice, tj. alternative) koje se potom međusobno procjenjuju s obzirom na kriterije i na vrijednosti tih kriterija navedene u Tablici 5.2. Postupak usporedbe alternativa s obzirom na određeni kriterij prikazan je na Slici 5.4.



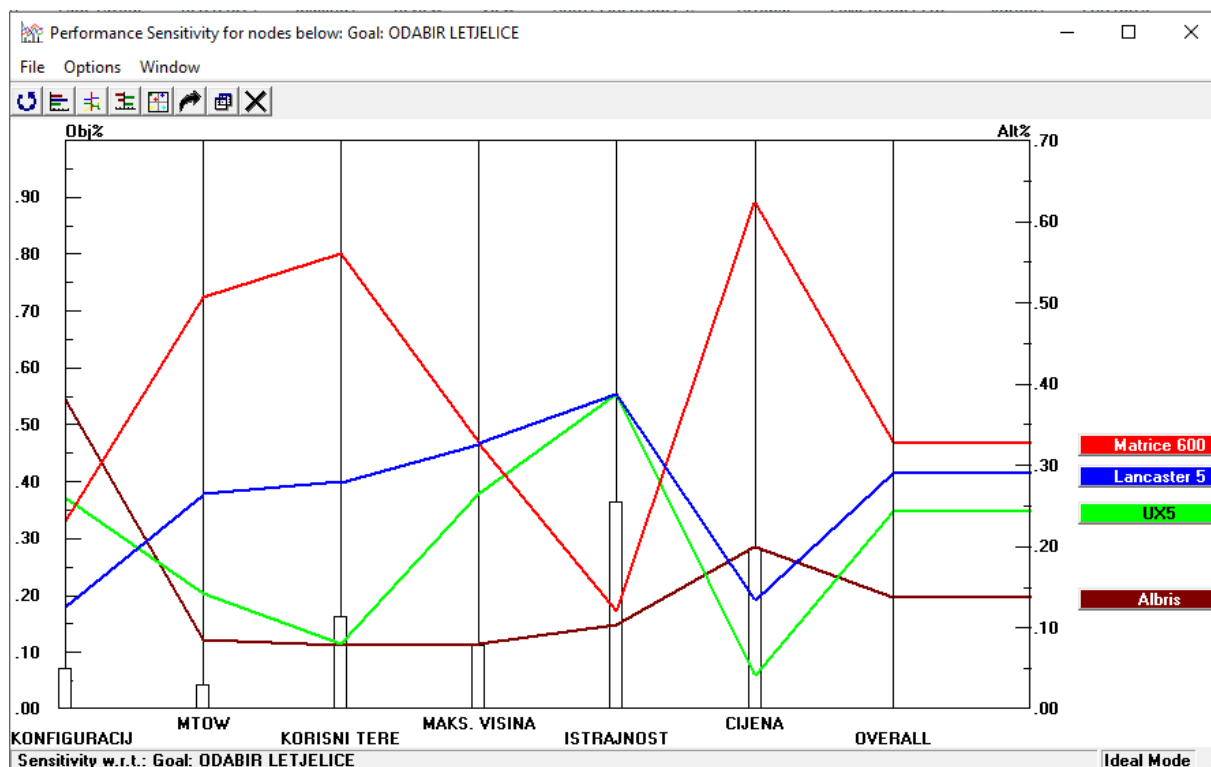
Slika 5.4 Postupak rangiranja alternativa s obzirom na kriterij (prikaz s obzirom na MTOW)

Sintezu rezultata u programu *Expert Choice* moguće je izvršiti ili za cijeli model ili parcijalno. Odabirom opcije „Synthesize, With Respect to Goal“ rezultati se analiziraju s obzirom na konačni cilj: odabir najpovoljnije letjelice. Rezultati su prikazani na Slici 5.5



Slika 5.5 Prikaz rezultata rangiranja alternativa

Prema Slici 5.5, najpovoljnija letjelica s obzirom na navedene kriterije je heksakopter kineske tvrtke DJI Matrice 600. Grafički prikaz rezultata i utjecajnosti pojedinih kriterija (analiza osjetljivosti) prikazan je na Slici 5.6.

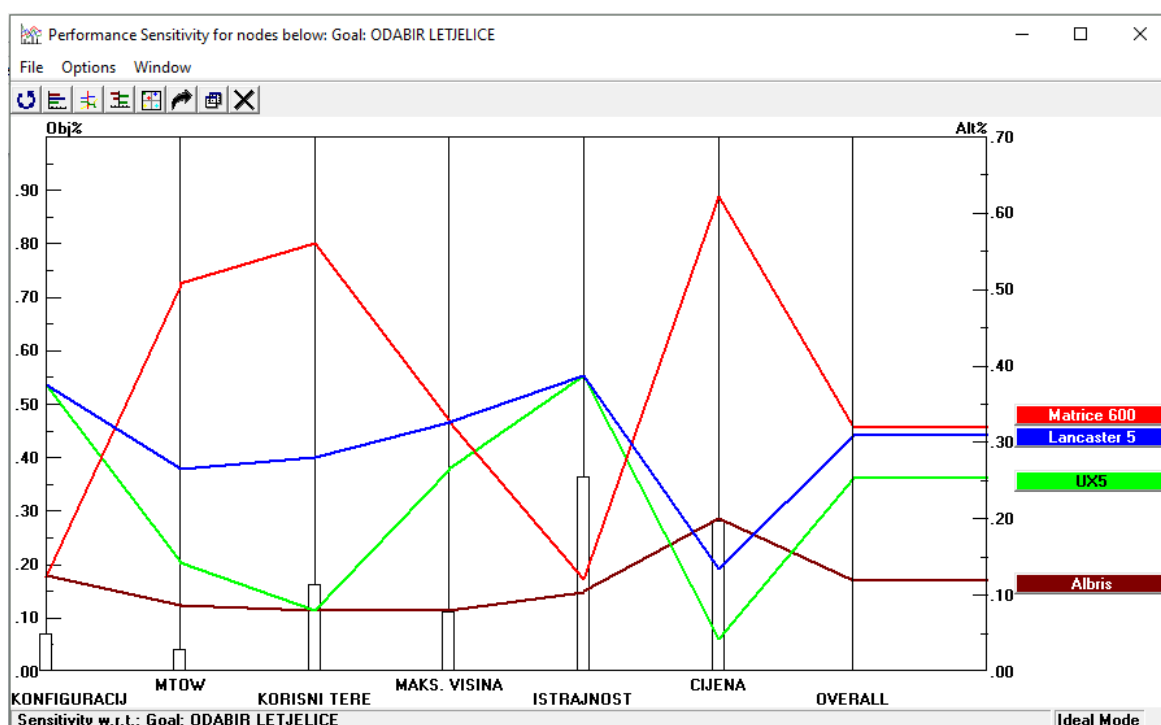


Slika 5.6 Analiza dobivenih rezultata

Letjelica Matrice 600 tvrtke DJI od ostalih je bolja po svim kriterijima osim po istrajnosti: to je manevrabilna letjelica s iznenađujućim snažnim pogonom: prazne težine 9,6 kg, ova letjelica može nositi 6 kg dodatnog tereta. Od presudne je važnosti i mogućnost dodavanja i zamjene korisnog tereta. Na taj se način ova letjelica može koristiti za različite namjene, primjerice za inspekciju građevina, ali i za traženje preživjelih nakon katastrofa i nesreća ili nadzor podzemnih požara ugljena (IR senzor). Jedini ograničavajući faktor ove letjelice je njena istrajnost: s punim opterećenjem u letu može izdržati 18 minuta, a bez dodatnog korisnog tereta može letjeti do 36 minuta. Cijena ovog uređaja čini ga ipak najpovoljnijim izborom:

ova je letjelica pet puta jeftinija od letjelice s fiksnim krilima Lancaster 5 (prema podacima iz Tablice 5.1)

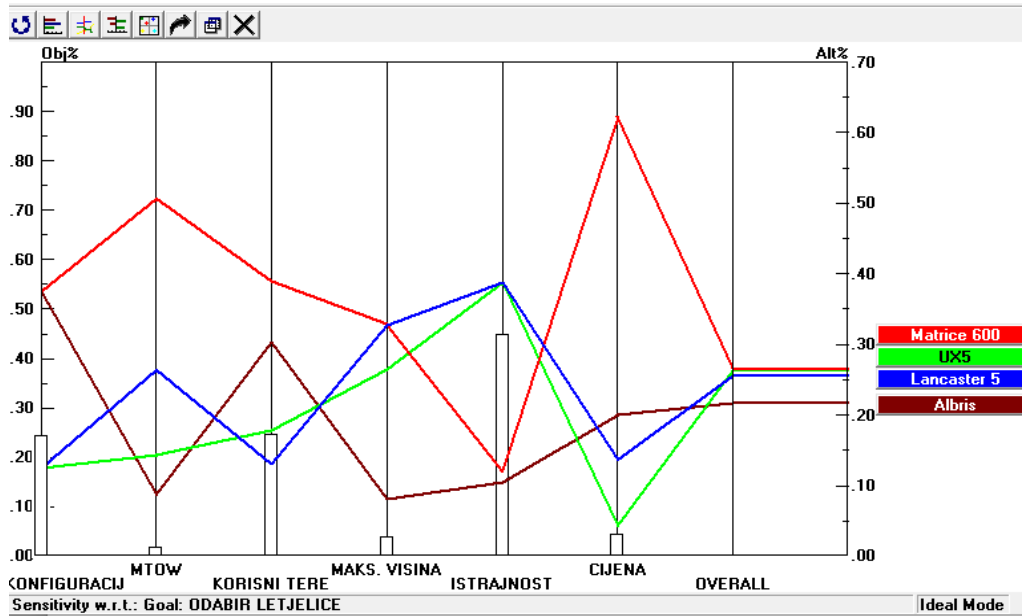
Ova je analiza izvršena tako da je pri odabiru konfiguracije mala prednost dana konfiguraciji s rotirajućim krilima, zbog njene sposobnosti vertikalnog polijetanja i slijetanja. Kada bismo trebali letjelicu za nadzor velikih površina i dulje istrajnosti, prednost bi imale letjelice HTOL karakteristika. Na Slici 5.7. prikazani su rezultati s promijenjenim težinama važnosti za kriterij konfiguracije: ista prednost (3 na skali) dana je HTOL letjelicama.



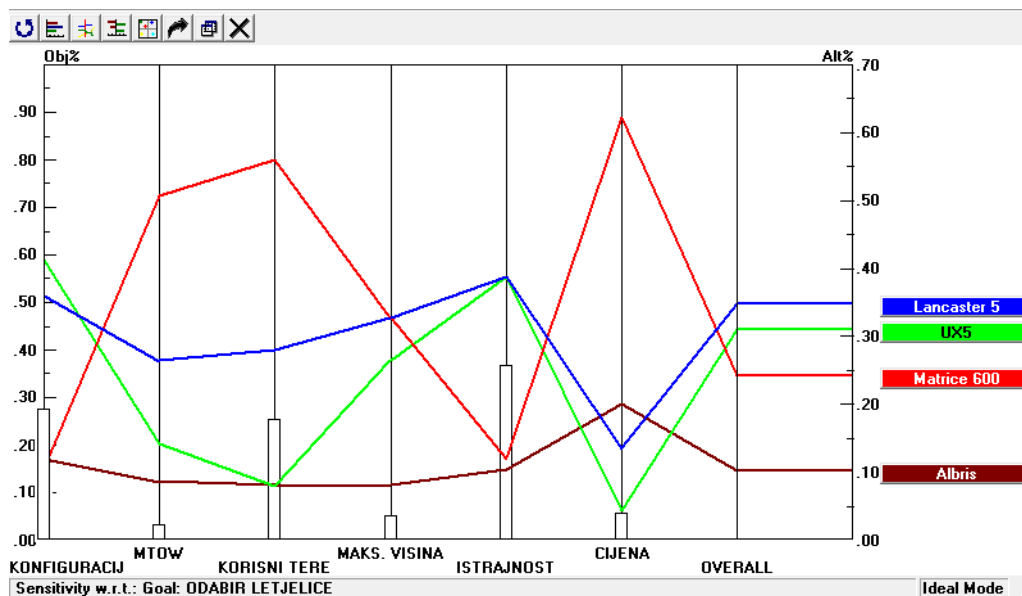
Slika 5.7 Analiza rezultata s promijenjenim odnosom alternativa i konfiguracije (preferira se HTOL)

Vidljivo je kako je zahvaljujući niskoj cijeni i mogućnosti nošenja tereta letjelica Matrice 600 ipak ostala prvi odabir, a poredak ostalih alternativa ostao je jednak. To je stoga što konfiguracija nije ocijenjena kao jedan od bitnijih kriterija. Kada bi se promijenila važnost tog kriterija, rezultati bi bili posve drugačiji. Na Slici 5.8 prikazani su rezultati odabira letjelice za promijenjene važnosti kriterija, s tim da je prednost (3 na Saatyjevoj skali) u odabiru konfiguracije dana VTOL konfiguracij. Prikazani graf dokazuje zašto je DJI Matrice 600

pobjednik i ove odluke s promijenjenim kriterijima: zbog mogućnosti nošenja modularnog korisnog tereta i manevaribilnosti. Na drugom mjestu nalazi se letjelica UX5 s fiksnim krilima, koja zbog svoje velike cijene u prijašnjoj kalkulaciji nije igrala značajnu ulogu.



Slika 5.8 Prikaz rezultata s promijenjenom važnosti kriterija



Slika 5.9 Prikaz rezultata s promijenjenim odnosom kriterija i alternativa

Ako se na ovako ponderirane kriterije (dakle s konfiguracijom kao bitnijim kriterijem, npr. ako će se odabrana letjelica koristiti za specifičnu misiju koja zahtjeva veliku istrajnost) odluči primijeniti promjena preference konfiguracije letjelice iz VTOL u HTOL, rezultat je drugačiji, kako je prikazano na Slici 5.9 Alternativa koja je ocijenjena najboljom u ovom slučaju postaje letjelica s fiksnim krilima, Precision Hawk Lancaster 5.



## 6 ZAKLJUČAK

Bespilotne letjelice nisu više stvar budućnosti – tehnologija koja je dugo bila rezervirana isključivo za vojni i znanstveno-istraživački sektor postala je dostupna širokim potrošačkim masama, zahvaljujući minijaturizaciji i razvoju tehnologije senzora, baterija, napretku komunikacijske tehnologije, smanjenju cijene postojećih ultralakih materijala te razvoju podržavajućih softverskih rješenja.

Velike tvrtke i državne službe koriste ove letjelice za inspekciju i nadzor (kritičnih infrastruktura, šuma, granica, događanja), za poljoprivredu (nadzor usjeva, zaprašivanje) i mapiranje te za 3D i volumetrijsku analizu terena i građevina. Za prikupljanje podataka potrebnih za te analize nekada je trebalo utrošiti sate ili dane terenskog rada – a danas ti isti podaci mogu biti prikupljeni u samo nekoliko minuta, i prikazani na zaslonu mobilnog telefona. Zbog toga ova tehnologija postaje sve privlačnija i dostupnija i manjim igračima na tržištu: građevinskim tvrtkama, poljoprivrednicima i foto-profionalcima.

Razgranato i tijesno međusobno povezano tržište podržavajućih sustava, platformi, senzora, softvera i opreme privlači uvijek nove ideje proizvođača sustava bespilotnih letjelica koji nude sve jednostavnija i jeftinija cjelovita rješenja za prikupljanje i obradu podataka iz zraka, modularna, prenosiva i spremna za korištenje. Jedan od većih izazova za razvoj ove industrije ostaje zakonodavstvo i regulacije civilnog zrakoplovstva: sigurnost i već uspostavljena pravila gustog zračnog prometa ne smiju se ugrožavati nekontroliranim letovima bespilotnih letjelica, stoga je let unutar vidnog polja još uvijek glavna stavka većine civilnih zakonskih odredbi (uz izuzetak državnih službi).

Odabir nove tehnologije od presudne je važnosti za svaku tvrtku: uspjeh ili neuspjeh ulaganja odredit će njen poslovni uspjeh ili pad. Proces donošenja takvih odluka je složen proces višekriterijalnog odlučivanja, za čije rješavanje postoje razvijeni matematički modeli (npr. AHP metoda) i softverski alati (npr. *Expert Choice*).

Odabir tipa sustava bespilotne letjelice za komercijalnu uporabu dodatno će zamrsiti ionako već složeni proces donošenja poslovne odluke. Kriteriji za odabir idealne letjelice ne samo da su međusobno ovisni, već su često i suprotstavljeni (konfiguracija letjelice, njena nosivost, modularnost, istrajnost u zraku, vrsta pogona i cijena). Stoga je odabir letjelice prema njenim karakteristikama potrebno izvršiti prema njenoj specifičnoj namjeni.

## LITERATURA

- [1] K.P., Vachtsevanos Valavanis, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles.*: Springer , 2015.
- [2] A.C., Ambrosia, V.G., Hinkley, E. A Watts, "Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 1671-1692 , 2012.
- [3] Law Library of Congress: (2016) *Regulation of Drones.*
- [4] K., Boedecker, H., Froehlich, A Wackwitz, "Drone Business Development Guide," Drone Industry Insights, <https://www.droneii.com/drone-business-development-guide> , 2016.
- [5] B. Ivezić, "Po Hrvatskoj leti 6500 dronova, u biznisu 340 tvrtki," Poslovni dnevnik, <http://www.poslovni.hr/tehnologija/po-hrvatskoj-leti-6500-dronova-u-biznisu-340-tvrtki-326131> (svibanj 2017.)
- [6] "Precizna poljoprivreda Belja u svjetskom vrhu uz pomoć bespilotnih letjelica" . <http://krugoval.net/2016/03/precizna-poljoprivreda-belja-u-svjetskom-vrhu-uz-pomoc-bespilotnih-letjelica/> (svibanj 2017.)
- [7] P.G., Gleason, T.J. Fahlstrom, *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.: Wiley, 2012.
- [8] Hewitt-Sperry Automatic airplane. . [https://en.wikipedia.org/wiki/Hewitt-Sperry\\_Automatic\\_Airplane](https://en.wikipedia.org/wiki/Hewitt-Sperry_Automatic_Airplane) (svibanj 2017.)
- [9] *Global Hawk* – Performance and Specifications <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/aircraft/GlobalHawk/performance.html> (svibanj 2017.)
- [10] J Jordán, "Drone Attacks Campaign In Yemen," Journal of the Spanish Institute of Strategic Studies, vol. 1, 2013. (svibanj 2017.)
- [11] *NASA Aemstrong Fact Sheet. Prototype, Helios* <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-068-DFRC.html> (lipanj

- 2017.)
- [12] *Museum of Flight: Aerosonde* <http://www.museumofflight.org/aircraft/insitu-areosonde-laima> (lipanj 2017.)
- [13] *Yamaha R-MAX* [https://en.wikipedia.org/wiki/Yamaha\\_R-MAX](https://en.wikipedia.org/wiki/Yamaha_R-MAX) (lipanj 2017.)
- [14] *DJI Phantom 4 PRO* <http://www.dji.com/phantom-4-pro> (lipanj 2017.)
- [15] G., Dias, J.: Cai, "A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends," *Unmanned Systems*, vol. 2, pp. 1-25.
- [16] M. Arjomandi, "Classification Of Unmanned Aerial Vehicles," MECH ENG 3016, Aeronautical Engineering, University of Adelaide, Australia.
- [17] A., Yang, M, Dean, P Uerkwitz, "Drone Industry Report: "I"s In The Sky," Oppenheimer Equity Research Industry Update, 2016.
- [18] *Precision Hawk*, <http://www.precisionhawk.com/agriculture> (lipanj 2017.)
- [19] *DJI Matrice 600*, <https://www.dji.com/matrice600> (lipanj 2017.)
- [20] Hui-Min Huang, "Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS)," <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/isd/ks/ALFUS-BG.pdf> (lipanj 2017.)
- [21] *First Person View FPV*.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/First-person\\_view\\_\(radio\\_control\)#cite\\_note-FPV\\_Goggles\\_For\\_Drones\\_And\\_Experience\\_The\\_Thrill\\_Of\\_Flying-1](https://en.wikipedia.org/wiki/First-person_view_(radio_control)#cite_note-FPV_Goggles_For_Drones_And_Experience_The_Thrill_Of_Flying-1) (rujan 2017.)
- [22] PWC - Powerdrone Solutions, "Clarity from above - PwC global report on the commercial applications of drone technology," 2016.
- [23] Federal Aviation Administration. FAA: *Modernization and Reform Act of 2012 – FMRA, Section 333*, [https://www.faa.gov/uas/media/Sec\\_331\\_336\\_UAS.pdf](https://www.faa.gov/uas/media/Sec_331_336_UAS.pdf) (lipanj 2017.)
- [24] Federal Aviation Administration. *FAA: Section 333: Petitions granted*. .  
[https://www.faa.gov/uas/beyond\\_the\\_basics/section\\_333/](https://www.faa.gov/uas/beyond_the_basics/section_333/) (lipanj 2017.)
- [25] Federal Aviation Administration, "Summary Of Small Unmanned Aircraft Rule (Part

- 107)," 2016. (lipanj 2014.)
- [26] *Rezolucija Europskog parlamenta o sigurnoj upotrebi zrakoplovnih sustava na daljinsko upravljanje (RPAS), opće poznatih kao bespilotne letjelice, u civilnom zrakoplovstvu (2014/2243(INI)).*  
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P8-TA-2015-0390+0+DOC+XML+V0//HR> (lipanj 2017.)
- [27] *EUROCONTROL. Regulatory framework creates three different categories based on operational parameters,* <https://www.eurocontrol.int/news/regulatory-framework-creates-three-different-categories-based-operational-parameters> (lipanj 2017.)
- [28] *Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into European Aviation System.* (2013, June)  
[https://www.sesarju.eu/sites/default/files/European-RPAS-Roadmap\\_Annex-1\\_130620.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/European-RPAS-Roadmap_Annex-1_130620.pdf) (lipanj 2017.)
- [29] Croatian Civil Aviation Agency, *Jedinstveno europsko nebo.* .  
[http://www.ccaa.hr/hrvatski/jedinstveno-europsko-nebo\\_127/](http://www.ccaa.hr/hrvatski/jedinstveno-europsko-nebo_127/) (lipanj 2017.)
- [30] *Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova, NN 49/2015.,* [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_05\\_49\\_974.htm](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_05_49_974.htm) (lipanj 2017.)
- [31] *First Person View,*  
[https://en.wikipedia.org/wiki/First-person\\_view\\_\(radio\\_control\)#cite\\_note-FPV\\_Goggles\\_For\\_Drones\\_And\\_Experience\\_The\\_Thrill\\_Of\\_Flying-1](https://en.wikipedia.org/wiki/First-person_view_(radio_control)#cite_note-FPV_Goggles_For_Drones_And_Experience_The_Thrill_Of_Flying-1)  
(srpanj 2017.)
- [32] Oscar Liang: *Types of Multirotor.* . <https://oscarliang.com/types-of-multicopter/>  
(srpanj 2017.)
- [33] K., Ekström, J Bergman, "Modeling, Estimation and Attitude Control of an Octorotor Using PID and L1 Adaptive Control Techniques," pp. 29-40, 2014.
- [34] J: Schömann, *Doktorska dizertacija: Hybrid-Electric Propulsion Systems for Small Unmanned Aircraft,* , Technischen Universität München, Ed. 2014.
- [35] Bell Eagle Eye Tiltrotor UAV.

- . <http://www.naval-technology.com/projects/belleagleeyeuav/> (srpanj 2017.)
- [36] *Hipersfera.* . <https://hipersfera.hr/> (srpanj 2017.)
- [37] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems - UAVs Design, Development And Deployment.*: Wiley, 2010.
- [38] *Penguin C UAS.* <http://www.uavfactory.com/product/74> (srpanj 2017.)
- [39] *Yeair,* <https://yeair.de/specs/> (srpanj 2017.)
- [40] *Facebook unveils 42m wingspan Aquila UAV.* .  
<https://www.flightglobal.com/news/articles/facebook-unveils-42m-wingspan-aquila-uav-415331/> (srpanj 2017.)
- [41] *Integration of GPS/INS/vision Sensors to Navigate Unmanned Aerial Vehicles.* .  
[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/166.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/166.pdf) (srpanj 2017.)
- [42] B., Snow, C. McNeil: *The Truth about Drones in Mapping and Surveying.* .  
[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/166.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/166.pdf) (srpanj 2017.)
- [43] *SenseFly Albris.* .  
[https://www.sensefly.com/fileadmin/user\\_upload/sensefly/documents/brochures/albriss-brochure-en.pdf](https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/documents/brochures/albriss-brochure-en.pdf) (srpanj 2017.)
- [44] J., Balachandra, A., Karelia D. Challa, "Material Selection For Unmanned Aerial Vehicle," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 5, no. 8, pp. 34-40, August 2014.
- [45] *Atlasus UAV,* <http://atlasus.com.tr/Atlas/UAV> (srpanj 2017.)
- [46] *INEA Consulting, "Global Commercial and Civil UAV Market Guide 2014-2015,".*
- [47] *Drone Analyst: Commercial Drones: Current State Of The Industry.* .  
<http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/UASReno2015/Snow.pdf>
- [48] C Snow. *The Truth about Drones in Construction and Infrastructure Inspection.* .  
[http://droneanalyst.com/wp-content/uploads/2016/12/TheTruthAboutDrones\\_Construction.pdf](http://droneanalyst.com/wp-content/uploads/2016/12/TheTruthAboutDrones_Construction.pdf) (srpanj 2017.)
- [49] *Drone Industry Insights. TOP20 Drone Company Ranking Q3 2016.* .

- <https://www.droneii.com/top20-drone-company-ranking-q3-2016> (srpanj 2017.)
- [50] M.J., Flynn, R.R Druzdzel, *Decision Support Systems*, 2nd ed.: Encyclopedia of Library and Information Science, 2002.
- [51] N. Begićević, *Doktorska dizertacija: Višekriterijalni modeli odlučivanja u strateškom planiranju uvođenja e-učenja.*: FOI. Varaždin, 2008.
- [52] *AHP Method*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic\\_hierarchy\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_hierarchy_process) (kolovoz 2017.)
- [53] T.L Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Int. J. Services Sciences*, vol. 1, no. 1, 2008.
- [54] A., Ashraf, L. Ishizaka, "Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations," *ORInsight*, no. 22, pp. 201-220, 2009.
- [55] *Decision Support Systems Resources*, <http://dssresources.com>
- [56] M.B. Barfod: *Graphical and technical options in Expert Choice for group decision making*, 2014.  
[http://orbit.dtu.dk/files/104238680/DTU\\_Transport\\_Compndium\\_Part\\_3\\_Group\\_decision\\_making](http://orbit.dtu.dk/files/104238680/DTU_Transport_Compndium_Part_3_Group_decision_making) (srpanj 2017.)
- [57] *Yuneec Typhoon H*, <http://us.yuneec.com/typhoon-h-specs> (srpanj 2017.)
- [58] *Trimble UX5*, <http://uas.trimble.com/ux5> (srpanj 2017.)
- [59] *Delair-Tech DT18.*, <http://delair.aero/uav-dt18/> (srpanj 2017.)
- [60] *SenseFly eBee Plus*, <https://www.sensefly.com/drones/ebec-plus.html>
- [61] *Penguin BE Platform* <http://www.uavfactory.com/prodcat/67>
- [62] *Shiebel Camcopter S-100* <https://schiebel.net/products/camcopter-s-100/>
- [63] *Multirotor G4 Eagle* <https://www.multirotor.net/en/products/eagle>
- [64] *Plurato Skycam* <http://skycam.plurato.com/#znacajke>

## **PRILOZI**

I. CD-R disk