

Dronovi u proizvodnom procesu

Čulek, Kristian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:711623>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Kristian Čulek

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Kristian Čulek

Zagreb, 2023.

ZADATAK



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala, autonomni sustavi i računalna inteligencija i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Kristian Čulek** JMBAG: **0246074270**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dronovi u proizvodnom procesu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Drones in a production process**

Opis zadatka:

Lebdeće sprave – dronovi, posljednjih su godina stekli raširenu primjenu u mnogim područjima te se stoga očekuje njihovo još intenzivnije korištenje u proizvodnji.

U radu je potrebno:

1. opisati osnovnu građu i izvedbe dronova te navesti primjere njihove primjene, posebno u vezi proizvodnje i s njom povezanih područja
2. naznačiti mogućnosti za intenzivnije korištenje dronova u proizvodnim procesima, a u svrhu unapređenja tih procesa
3. za neku od mogućnosti iz prethodne točke, predložiti način realizacije.

Zadatak zadan:

20.4.2023.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 12. 7. 2023.
3. rok: 21. i 22.9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

IZJAVA

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici na savjetima i stručnom znanju koje je pružio tijekom izrade završnog rada kao i asistentu Denisu Mliviću na savjetima kako poboljšati rad.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci i razumijevanju za vrijeme studija te djevojci Petri Lacković na pomoći i podršci prilikom pisanja ovog rada kao i tijekom studija.

U Zagrebu, 20. rujna 2023.



Kristian Čulek

SAŽETAK

U sklopu ovog rada predstavljena je građa, kategorizacija i sposobnosti bespilotnih letjelica. Pružan je uvid u izazove s kojima se susreću postrojenja koja se odlučuju za primjenu bespilotnih letjelica u proizvodnim procesima, ali i njihova potencijalna rješenja. Prikazane su trenutne mogućnosti i stanje bespilotnih letjelica u različitim granama industrije. Vlastitim izračunom na temelju stvarnih cijena, karakteristika i mjera napravljena je usporedba dronova i viličara u upravljanju zalihama u skladištima. Daje se osvrt na budućnost bespilotnih letjelica u proizvodnoj industriji posebno u vezi mogućnosti razvijanja njihove autonomnosti.

Ključne riječi: bespilotna letjelica, dron, industrija, skladište

SUMMARY

Within this work, structure, categorization, and capabilities of unmanned aerial vehicles (UAVs) are presented. Insight is provided into the challenges faced by facilities opting for the use of UAVs in manufacturing processes, as well as their potential solutions. The capabilities of UAVs in various industries and their current status within them are showcased. A comparison between drones and forklifts in inventory management in warehouses is made through a calculation based on actual prices, characteristics, and measurements. Finally, it reflects on the future of this technology within manufacturing industry and the possibilities for developing their autonomy.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, industry, warehouse

SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY	IV
POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VII
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA.....	XII
1. UVOD.....	1
2. POVIJEST BESPILOTNIH LETJELICA	2
3. PODJELA DRONOVA	11
4. KONSTRUKCIJA I KOMPONENTE BESPILOTNIH LETJELICA	19
4.1. OKVIR	19
4.2. POGONSKI SUSTAV	19
4.3. TERET	20
4.4. SENZORI	20
4.4. KOMANDE I KONTROLA LETA BESPILOTNIH LETJELICA	21
4.5. KOMUNIKACIJSKE VEZE	23
4.6. LJUDSKI FAKTOR	24
5. BESPILOTNE LETJELICE U PROIZVODNIM PROCESIMA	25
5.1. SPOSOBNOSTI I PRIMJENE	25
5.2. IZAZOVI POVEZANI S UPOTREBOM BESPILOTNIH LETJELICA	29
5.3. UŠTEDE PRI UPORABI BESPILOTNIH LETJELICA U INDUSTRIJI.....	32
5.4. TRENUTNO STANJE IZVEDBE BESPILOTNIH LETJELICA	34

6. PRIMJER REALIZACIJE BESPILOTNIH LETJELICA U PROIZVODNIM PROCESIMA	35
6.1. UPRAVLJANJE ZALIHAMA	35
6.1.1. Faktori za uspješnu primjenu	36
6.2. ANALIZA UPORABE BESPILOTNIH LETJELICA U SKLADIŠTIMA	37
7. BUDUĆNOST UPORABE BESPILOTNIH LETJELICA U PROIZVODNIM SUSTAVIMA	45
7.1. TEHNOLOGIJA RFLY	45
7.2. TEHNOLOGIJA ROJENJA	47
8. ZAKLJUČAK	48
9. LITERATURA.....	50

POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
a_1	komada	broj tereta u jednom jednostrukom redu
d_{zr}	m	odmak regala od bočnih vanjskih zidova
b_2	m	širina pomoćnih prolaza između regala
b_3	m	širina glavnog prolaza
BLOS		eng. <i>Beyond line of sight</i> – izvan vidnog polja
b_{rd}	m	širina dvostrukog regala
B_s	m	širina skladišta
DDOS		eng. <i>Distributed Denial of Service</i> – napadi distribuiranim odbijanjem usluge
eng.		engleski
FAA		eng. <i>Federal Aviation Administration</i> – Federalna uprava za avijaciju
god.		godina
GPS		eng. <i>Global Positioning System</i> – globalni sustav za pozicioniranje
h_{pm}	m	visina paletnog mjesta
h_{vd}	m	put do vrha regala za dron u oba smjera
h_{vv}	m	put do vrha regala za viličara u oba smjera
l	m	duljina

LED		eng. <i>Light Emitting Diode</i> – svjetleća dioda
LiDAR		eng. <i>Light detection and ranging</i> – svjetlosno zamjećivanje i klasifikacija
LOS		eng. <i>Line of sight</i> – vidno polje
L_r	m	duljina skladištenja u redovima
l_r	m	duljina regala
L_s	m	duljina skladišta
m	kg	masa
MIT		<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
n_1		broj dvostrukih regala
n_2		broj jednostrukih regala
$n_{pmš}$		broj paletnih mjesta po širini
n_r		broj regala po jednom redu
n_s		broj stajanja
p.n.e.		prije nove ere
Q		broj paletnih mjesta
Q_s		broj stajanja
RFID		eng. <i>Radio-Frequency Identification</i> – radio frekvencijska identifikacija
S		faktor sigurnosti
SAD		Sjedinjene Američke Države
SAM		eng. <i>Surface-to-Air Missile</i> – raketa zemlja-zrak (u protuzračnoj obrani)
t	s	ukupno vrijeme ciklusa obilaska svih paletnih mjesta
t_1	s	vrijeme potrebno za obilazak skladišta u horizontalnom smjeru

t_2	s	vrijeme potrebno za obilazak skladišta u vertikalnom smjeru
t_d	s	vrijeme potrebno kako bi dron obišao sva paletna mjesta
t_v	s	vrijeme potrebno kako bi viličar obišao sva paletna mjesta
TDMA		eng. <i>Time Division Multiple Access</i> – višekratni pristup s vremenskim dijeljenjem
UAV		eng. <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> – bespilotna letjelica
	USD	američki dolar
v	m/s	brzina
v_{hd}	m/s	brzina drona u horizontalnom smjeru
v_{hv}	m/s	brzina viličara u horizontalnom smjeru
v_{vd}	m/s	brzina drona u vertikalnom smjeru
v_{vv}	m/s	brzina viličara u vertikalnom smjeru
VTOL		eng. <i>Vertical Takeoff and Landing</i> – vertikalno polijetanje i slijetanje
x	m	prijeđeni put za obilazak svih paletnih mjesta

POPIS SLIKA

Slika 1. Golub pogonjen parom [2].....	2
Slika 2. Moderna rekonstrukcija goluba pogonjenog parom [1].....	3
Slika 3. Zračni vijak, kako ga je zamislio Leonardo Da Vinci [5].....	4
Slika 4. Moderna rekonstrukcija Zračnog vijka [4]	4
Slika 5. Prvo zračno bombardiranje, od strane Austrije na Veneciju, nacrt balona i bombe [8]6	
Slika 6. <i>Queen Bee</i> – prva uspješna bespilotna letjelica [11].....	7
Slika 7. Radioavion iz drugog svjetskog rata [12]	7
Slika 8. <i>AQM-34 Lightning Bug</i> [13]	8
Slika 9. Dron <i>Cepelin</i> [17]	11
Slika 10. Dron s više rotirajućih elemenata [19].....	12
Slika 11. Dron s fiksnim krilima [20]	13
Slika 12. Jednorotorni dron (helikopter) [21].....	13
Slika 13. Dron s fiksnim krilima i vertikalnim uzlijetanjem [22]	14
Slika 14. Dron <i>Black hornet nano</i> [25]	16
Slika 15. Dron iz teške kategorije [26].....	17
Slika 16. Dron iz kategorije velikih dronova – <i>RQ-4 Global Hawk</i> [27]	18
Slika 17. Pokretni sustav gimbal [28]	20
Slika 18. Mobilna kontrolna stanica [29]	21
Slika 19. Ručno lansiranje bespilotne letjelice <i>Raven RQ-11</i> [28]	22
Slika 20. Lansiranje drona pomoću katapultu [28]	22
Slika 21. Dijagram vrsta podatkovnih veza [30].....	23

Slika 22. Podjela sposobnosti bespilotnih letjelica [33].....	27
Slika 23. Dijagram mogućnosti funkcija dronova [33]	28
Slika 24. Skica skladišta.....	39
Slika 25. Skica skladišnog regala [50]	39
Slika 26. Drona za testiranje tehnologije Rfly [47].....	46
Slika 27. Prikaz veličine drona i očitavanje RFID tagova [47].....	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba karakteristika dronova s obzirom na tip krila [18 i 23].....	14
Tablica 2. Cijene, primjene te prednosti i nedostaci dronova ovisno o tipu krila [18 i 23]	15

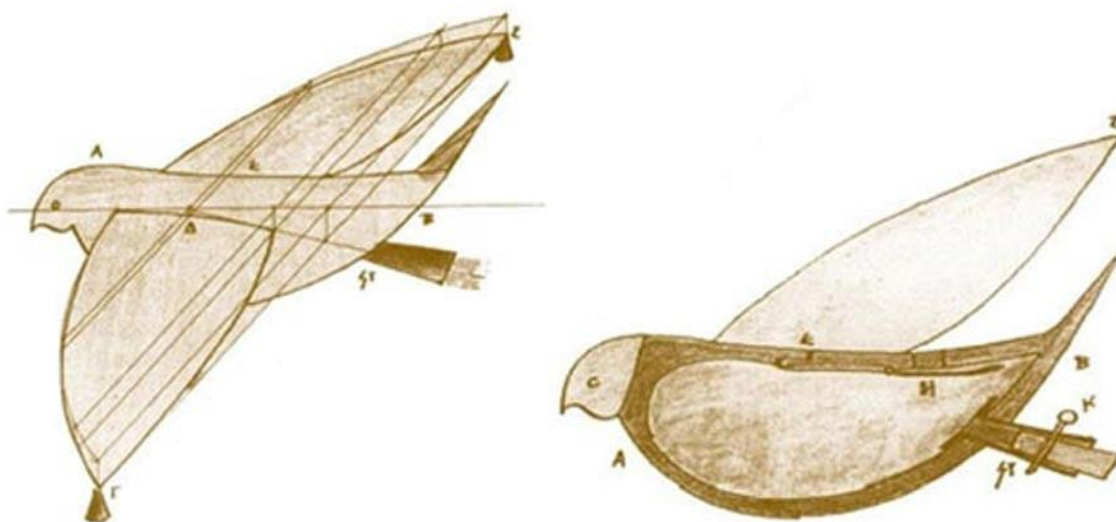
1. UVOD

Po uzoru na vojni sektor, civilni sektor u posljednjih 20 godina uviđa velike potencijale uporabe bespilotnih letjelica – dronova. Postoje brojna teoretska istraživanja o mogućnostima dronova i tehnologijama usko povezanih s njihovom primjenom, neke od njih će biti navedene u daljnjem tekstu rada. S druge strane, istraživanja o njihovoj praktičnoj primjeni u realnim postrojenjima su provedena u mnogo manjoj mjeri. To je dovelo do nesrazmjera između razumijevanja teoretskih mogućnosti dronova i potrebe za njihovom stvarnom primjenom. Unaprjeđenjima u raznim tehnologijama i padom njihovih cijena otvorila su se vrata ka implementaciji dronova u raznim industrijama, te u posljednjih 10 godina mnoštvo kompanija kreće u faze testiranja uporabe bespilotnih letjelica u proizvodnim procesima. Mnogi su uspjeli u ovome, ali također mnoga postrojenja još su u testnim fazama ispitivanja funkcionalnosti i ekonomičnosti uporabe bespilotnih letjelica.

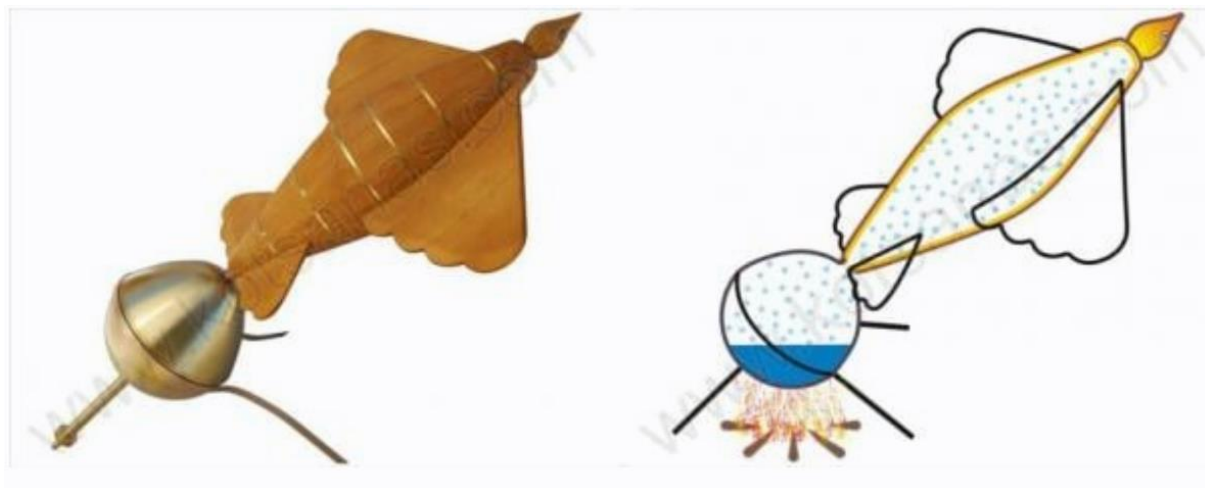
U prvom dijelu ovog rada bit će predstavljena povijest bespilotnih letjelica kojom se pruža kontekst i šira slika uporabe i razvoja bespilotnih letjelica. Potom će bespilotne letjelice biti kategorizirane po njihovoj vrsti, veličini, pogonu, dometu i nosivosti, kako bi se prikazale njihove sposobnosti za daljnju uporabu i implementaciju u postojeća proizvodna postrojenja. Nadalje će se opisati komponente te objasniti funkcije bespilotnih letjelica s podjelom prema omjeru analitičkih i fizičkih sposobnosti. Također, predstaviti će se izazovi te trenutne i moguće implementacije koje bi mogle dovesti do optimiranja proizvodnih procesa kao i do ekonomskih dobitaka. U vezi toga, posebno, dat će se izračun isplativosti uporabe dronova kod upravljanja zalihama u postrojenju u odnosu na tradicionalan način pomoću viličara-komisionera. Završno će biti dan osvrt na neke od implementacijskih mogućnosti za dronove u proizvodnji očekivanih u budućnosti.

2. POVIJEST BESPILOTNIH LETJELICA

Let ptica intrigirao je ljude od samih početaka. Od kako čovječanstvo postoji, postoji i želja za letom. Kako je lakše krenuti manjim koracima, prve stvari koje su se mogle dignuti u zrak bile su upravo bespilotne – nisu imale osobu koja bi upravljala njima. Najraniji zapisi o bespilotnim letjelicama pojavljuju se u antičkoj Grčkoj od strane grčkog filozofa Archytasa koji je živio između 428. i 347. godina p.n.e.. On je osmislio i proizveo "letećeg goluba" (Slika 1.) pogonjenog na vodenu paru. Ime je dobio po svojem šupljem cilindričnom obliku s po jednim krilom sa svake strane, nalik istoimenoj ptici. Spremnik s vodom (bojler) se nalazio na mjestu repa sa stražnje strane naprave (Slika 2.). Rastom tlaka u bojleru i prilikom postizanja kritičnog potrebnog tlaka, "golub" bi bio lansiran u zrak i lebdio. Prema zapisima, mogao je letjeti više stotina metara u daljinu. [1 i 2]



Slika 1. Golub pogonjen parom [2]



Slika 2. Moderna rekonstrukcija goluba pogonjenog parom [1]

Ideja o bespilotnim letjelicama se zasebno razvijala kod više civilizacija, te je tako primjerice u Kini, general Zhuge Liang (180.–234.) koristio papirnate balone u svrhu zastrašivanja protivnika na ratnim poljima. [3]

Ideja o bespilotnim letjelicama je također intrigirala i Leonarda Da Vinci (1452.–1519.) koji je radio na nacrtima prvih prototipova helikoptera sa zračnim vijkom (Slika 3.) koji bi tlačio zrak te postizao uzgon. Moderna istraživanja su pokazala da je konstrukcija imala potencijala, ali za njen uspješni let bila je potrebna upotreba laganih i čvrstih materijala te primjena aerodinamičnih znanja za postizanje većeg uzgona. To je ostvareno modernom rekonstrukcijom letjelice koja je umjesto jednog imala četiri zračna vijka (Slika 4.). [4 i 5]



Slika 3. Zračni vijak, kako ga je zamislio Leonardo Da Vinci [5]

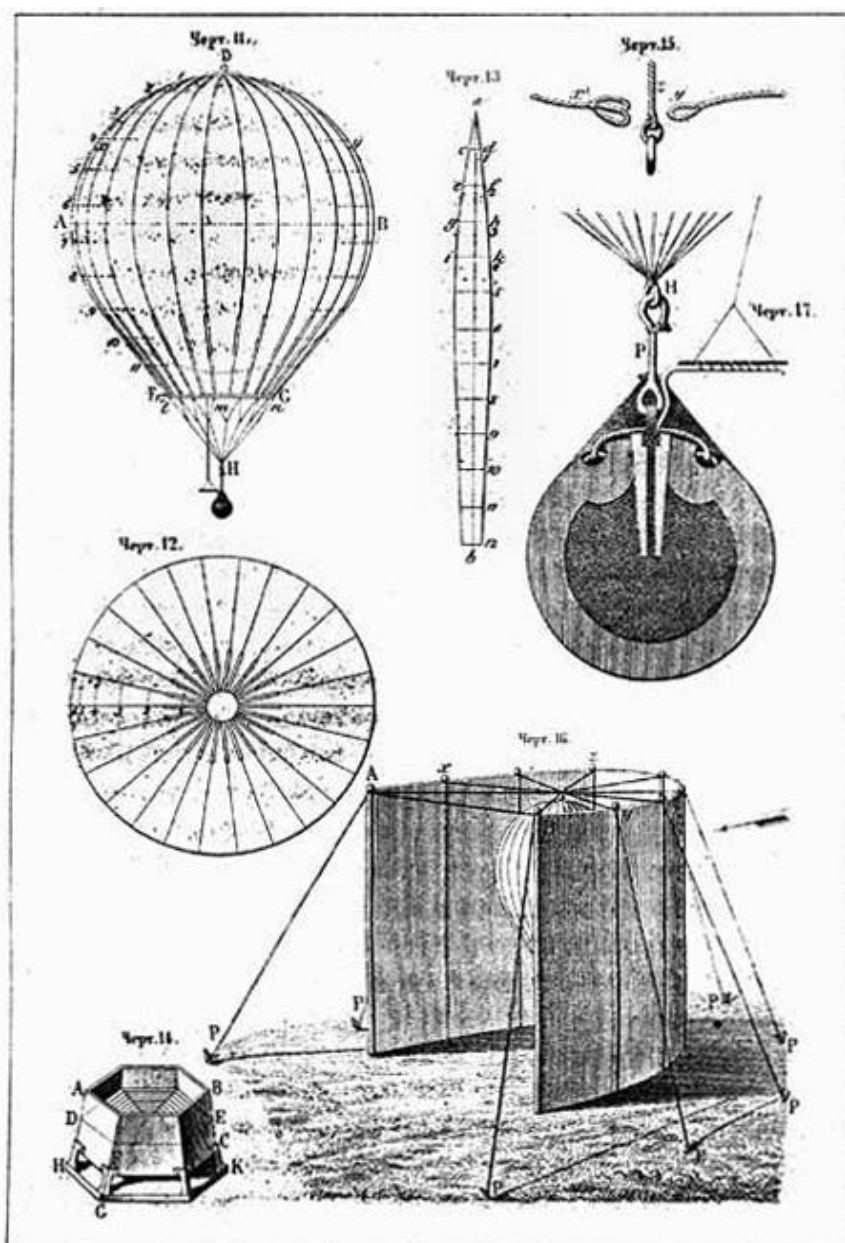


Slika 4. Moderna rekonstrukcija Zračnog vijka [4]

Prva uporaba bespilotnih letjelica u vojne svrhe s ciljem nanošenja štete bila je bombardiranje Venecije od strane Austrije 22. kolovoza 1849. godine. Bombe su bili papirnati baloni, proizvedeni u 200 primjeraka, promjera šest metara s ovjesnim kuglastim spremnikom od lijevanog željeza ispunjenog barutom (Slika 5.). Težile su 25 kg, a radile su na principu

tempiranog vremenskog upaljača da ispuste teret točno u određeno vrijeme iznad grada. Priprema opreme i balona trajala je šest mjeseci, a efikasnost napada je na kraju bila upitna radi nemogućnosti točnog tempiranja izbacivanja bombi te upravljanja smjerom kretanja balona. [6 i 7]

Let je kroz razvoj civilizacije uvijek ostao na istoj, visokoj, razini zanimanja ako nije i narastao, ali svi izumi imaju isti problem, kako je viđeno i na primjeru bombardiranja Venecije, a to je nemogućnost daljinskog upravljanja. Prva osoba koja je uspješno riješila ovaj problem bio je Nikola Tesla. Godine 1893. uspješno je proveo eksperiment daljinskog upravljanja objekta putem radio valova [9], pune dvije godine prije nego što je Guglielmo Marconi uspješno pomoću prijemnika poslao poruku u Morseovom kodu na veće udaljenosti. Nikola Tesla nije stao samo na tome, nego je već 1898. godine na sajmu daljinski upravljao brodićem na jezeru. Nadalje, 1900. godine ovu tehnologiju upotrebljava na letećem balonu te uspješno upravlja njime tijekom leta. Time je otvorio vrata prema daljnjem razvoju bespilotnih letjelica.



Slika 5. Prvo zračno bombardiranje, od strane Austrije na Veneciju, nacrt balona i bombe [8]

Prva prava bespilotna letjelica zapravo je bila modificirani hidroavion konstruiran 1931. godine od strane britanske Kraljevske mornaričke zračne službe, zvan *Fairey Queen*. Let je trajao svega par sekundi, ali nakon dvije dodatne iteracije i godinu dana kasnije, ovaj dron, sada zvan *Queen Bee* (Slika 6.) uspijeva završiti testni let te u kasnijim testovima čak uspijeva sletjeti na brod po olujnom vremenu. [9 i 10]



Slika 6. Queen Bee – prva uspješna bespilotna letjelica [11]

Daljinski upravljani avioni, zvani *radioavioni* (Slika 7.), koristili su se u drugom svjetskom ratu od strane američke vojske na pacifičkoj fronti protiv Japana kao i pri iskrcavanju u Normandiji, za bombardiranje visokovrijednih meta daleko iza njemačkih linija. Da su se ovi dronovi pokazali kao uspješni, ukazuje činjenica da je tijekom drugog svjetskog rata 15 374 aviona modificirano da rade kao bespilotni radioavioni. [11]



Slika 7. Radioavion iz drugog svjetskog rata [12]

Prije, ali i tijekom 2. svjetskog rata bespilotne letjelice primarno su bile korištene kao bombarderi ili kao same rakete, no napretkom tehnologije nakon 2. svjetskog rata, odnosno razvojem kamera, počinje sve veća uporaba bespilotnih letjelica u svrhe izviđanja. Prvi takav primjer bio je *YQ-1B*, visoko leteći izviđački radioavion. U sljedećim desetljećima, posebno

tijekom Vijetnamskog rata (od 1950-ih do 1970-ih godina), shvaćaju se dodatni potencijali bespilotnih letjelica te počinje njihovo korištenje s ciljem zavaravanja radara. Svrha letjelica bila je da imitiraju signal bombardera *B-52* te da rakete zemlja-zrak SAM ciljaju njih kako bi se smanjile štete u floti aviona *B-52*. Kako bi uspješno imitirali povratni signal nije bilo nužno da letjelice slične bombarderima već su samo morale na sebi imati reflektore postavljene na određeni način. S obzirom na to da su bespilotne letjelice bile mnogo manje i jeftinije za proizvodnju, ova se metoda pokazala učinkovitom. Ipak, kako se rezolucija radara unaprjeđivala, postajalo je teže imitirati velike bombardere *B-52*, te 70-ih godina prestaje korištenje bespilotnih letjelica u ove svrhe. [3]

U području izviđanja, tehnologija nastavlja napredovati. *AQM-34 Lightning Bug* (Slika 8.) je najdulje korišten model bespilotne letjelice, a prvi put se pojavila 1950-ih te su korištene sve do 2003. godine. Mogla je letjeti do visine od 15 000 metara brzinom većom od jednog maha. Pokazala se vrlo uspješnom te je sudjelovala u svim većim operacijama američke vojske, a radi svoje cijene i u manje bitnim misijama. [3]



Slika 8. *AQM-34 Lightning Bug* [13]

Nakon što je savladan bespilotni let, u letjelicama je počeo rasti broj senzora raznih drugih namjena, povećavajući opseg i zahtjevnost protoka podataka. Senzori za izviđanje su tako počeli biti u koliziji s opremom za upravljanje letom jer se procesorska snaga, koja je isprva isključivo bila korištena za let, sada morala dijeliti sa sensorikom za izviđanje. Nadalje, rasle su i smetnje i blokiranje signala od strane protivnika, kao i potreba za autonomnim

upravljanjem od strane računala u avionu kako bi se smanjio broj padova letjelica uzrokovanih greškom ljudskih operatora. 1970-ih godina dolazi do naglog razvoja računalne tehnologije čime se otvaraju vrata za rješavanje nastalih problema. Bepilotne letjelice počinju biti opremljene kamerama i senzorima s mogućnošću komunikacije u realnom vremenu, značajno povećavajući svoje taktičke sposobnosti. Ovakve letjelice su prvi puta korištene krajem 1970-ih godina od strane Izraela u sukobu sa Sirijom koja je bila opremljena sovjetskim projektilima zemlja-zrak (SAM). Svrha bespilotnih letjelica u ovom sukobu je bila praćenje protivničkih trupa (pješačije i tenkova) u realnom vremenu te dojavljivanje prikupljenih podataka u bazu s ciljem postizanja bržih i preciznijih reakcija Izraela s maksimalnim učincima što se na kraju pokazalo vrlo efikasnim. Također, služili su i kao mamci za prijevremenu aktivaciju projektila SAM čime se povećavala šansa da se izbjegne velika šteta na ostalim avionima, ali su se isto tako i nepotrebno trošili projektili Sirije. S obzirom na visoku cijenu tih raketa u odnosu na bespilotne letjelice, te akcije su bile isplative za Izrael. Nadalje, bespilotne letjelice su sakupljale odašiljane signale od SAM-a kako bi se mogle pratiti njihove kretnje i adekvatno reagirati. Također, praćenjem tih signala mogli su ustanoviti točnu lokaciju SAM-ova te ih neutralizirati. Dodatno, mala veličina bespilotnih letjelica te njihova jedinstvena aerodinamička konfiguracija otežavala je njihovo detektiranje i praćenje od strane sirijskih radarskih sustava, ali također borbeni avioni uslijed svoje velike brzine nisu mogli pouzdano i s dosljednošću uočiti te male bespilotne avione. Do ovog sukoba se vjerovalo u sposobnost ovih letjelica, ali nakon njega i postignutih rezultata njihov utjecaj je nedvojben u velikom broju polja uporabe te započinje utrka na svjetskoj razini s ciljem bržeg i boljeg razvoja bespilotnih letjelica. [3 i 14]

Tijekom 80-ih i 90-ih godina nastavlja se rast i upotreba bespilotnih letjelica, ali se također javlja i opozicija prema njima s obzirom na to da se ulažu velika financijska sredstva u konkurentnu nabavu aviona i obuku pilota. Isto tako, više pozicije u zračnim snagama se biraju po godinama u službi upravljanja raznim avionima zbog čega je upotreba bespilotnih letjelica podcjenjivana i mnogima je njihova upotreba smetala. To dovodi do privremenog i djelomičnog usporavanja razvoja bespilotnih letjelica. [3]

Daljnijim napretkom tehnologije i padom cijena računalnih sustava, 2000-ih godina više se ne može negirati isplativost, smanjenje rizika i efikasnost bespilotnih letjelica koje sada javnost naziva dronovi te počinje njihova ekskluzivna uporaba u dugim izviđačkim misijama, kao na primjer u Iraku i Afganistanu nakon napada 11. rujna 2001. godine. [3]

Tehnologija bespilotnih letjelica, kao i većina tehnologija nakon uspjeha u vojnoj industriji, počinje se upotrebljavati i u civilnom sektoru. [15] Tako je prva licenca za privatnu uporabu dronova u civilnom sektoru izdana 2005. godine od strane Federalne uprave za avijaciju (*Federal Aviation Administration – FAA*) u Sjedinjenim Američkim Državama. U početku je komercijalno prihvaćanje bilo minimalno zbog visoke cijene dronova, ali s vremenom postaju pristupačniji padom cijena i napretkom mikrokontrolera i pametnih mobitela koji služe kao ekran i upravljač u jednom. 2010-e godine se gledaju kao zlatno doba dronova jer dolazi do masovne upotrebe u privatne i industrijske svrhe, dok se u 2020-im godinama položaj dronova samo ojačava. Jedina trenutna mana dronova je njihov domet tj. trajanje leta, ako pogon drona ovisi o električnim baterijama. [15]

3. PODJELA DRONOVA

Dronovi se mogu pojaviti u raznim oblicima i veličinama, a prva i osnovna podjela dronova je prema postizanju uzgona [16]:

- Aerostati: letjelice ispunjene plinom lakšim od zraka, to su najčešće letjelice u obliku balona ili cepelina (Slika 9.)
- Aerodini: letjelice teže od zraka koje su pogonjene rotacijom lopatica ili mlaznim pogonom.



Slika 9. Dron Cepelin [17]

Aerodini se dijele na:

- nepogonjene
- pogonjene.

Pogonjeni se dijele na:

- ljudski pogonjene
- motorne.

Motorni se pak prema tipu krila dijele kako slijedi [18]:

- Dron s više rotirajućih elemenata (Slika 10.) – prednost im je lakše manevriranje te manje potrebnog prostora za uzletjeti i sletjeti, manji su i jeftiniji. Mane su im kraće trajanje baterije te manji domet i manja brzina leta.



Slika 10. Dron s više rotirajućih elemenata [19]

- Dron s fiksnim krilima (Slika 11.) – prednost im je veća brzina leta, veći domet, veća stabilnost u letu, mogućnost prijenosa većeg tereta, mana im je da su skuplji, potrebno je više treninga za adekvatno upravljanje te im je potrebno više mjesta za uzlijetanje i slijetanje.



Slika 11. Dron s fiksnim krilima [20]

- Jednorotorni dronovi (helikopteri) (Slika 12.) – prednosti im je veliki kapacitet prijenosa tereta, a mana je visoka cijena.



Slika 12. Jednorotorni dron (helikopter) [21]

- Dronovi s fiksnim krilima i vertikalnim uzlijetanjem (Slika 13.) – prednost im je veliki kapacitet prijenosa tereta, velika brzina i domet, mana im je cijena te potrebni trening pilota.



Slika 13. Dron s fiksnim krilima i vertikalnim uzlijetanjem [22]

Tablica 1. Usporedba karakteristika dronova s obzirom na tip krila [18 i 23]

Karakteristika	Fiksna krila	Rotacijska krila	Hibrid
Učinkovitost energije	Visoka	Niska	Visoka
Sustav letenja	Kompleksan	Jednostavan	Kompleksan
Slijetanje	Konvencionalno	Vertikalno	Vertikalno
Autonomija	Da/Ne	Da	Da/Ne
Lebdenje	Ne	Da	Da
Napajanje	Baterija, gorivo	Baterija	Baterija, gorivo
Teret, kg	1000	50	10
Masa, kg	0,1–400 000	0,01–100	1,5–65

Tablica 2. Cijene, primjene te prednosti i nedostaci dronova ovisno o tipu krila [18 i 23]

Vrsta UAV-a	Cijena, kUSD	Primjene	Prednosti	Nedostaci
Fiksno krilo	20–150	Pregledi područja	Veliko područje pokrivenosti, dugo trajanje leta, velika brzina	Zahtjevno polijetanje i slijetanje, visoka cijena
Rotacijsko krilo (helikopter)	20–150	Dostava tereta, inspekcija	Lebdenje, veliki teret	Visoka cijena
Rotacijsko krilo (multicopter)	3–50	Fotografiranje, snimanje filmova, inspekcija	Dostupnost, niska cijena	Kratko trajanje leta, mali teret

Sljedeća podjela dronova jest prema izvoru energije [18 i 24]:

- Električna baterija – prednosti su da dronovi mogu biti maleni a i time lagani, mana im je mali domet i kraće trajanje leta te mogućnost zapaljenja.
- Benzin – prednost im je u brzom punjenju, duljem trajanju leta, većoj brzini leta, mogućnosti prijenosa više tereta. Mana im je da moraju biti veći, glasnjiji su i potencijalno zapaljivi.
- Vodikove ćelije – prednost je u brzom punjenju, relativno velikom dometu i trajanju leta, mana im je da se brzo zagrijavaju i neefikasni su u iskorištavanju te energije.
- Solarne ćelije – prednost je u mogućnosti punjenja tijekom leta čime im se povećava domet i isplativost te su lagane. Mana im je da i dalje domet leta nije na adekvatnoj razini.

S obzirom na kapacitet prijenosa tereta, dronovi se dijele na: [18]

- Vrlo lagani dronovi – teže do 11 grama, mogućnost teretnog kapaciteta im je do 100 grama, koriste se u svrhe nadziranja okoline (Slika 14.).
- Lagani dronovi – mase do jednog kilograma, mogućnost teretnog kapaciteta im je do 300 grama, koriste se u svrhe nadziranja i fotografiranja.

- Srednje teški dronovi – teže do 600 kilograma, mogućnost teretnog kapaciteta im je do 150 kilograma, koriste se u vojne svrhe i fotografiranje.
- Teški dronovi – teže preko 600 kilograma, mogućnost teretnog kapaciteta im je preko 1000 kilograma, koriste se u borbene svrhe te prijenos industrijskih tereta (Slika 15.).



Slika 14. Dron *Black hornet nano* [25]



Slika 15. Dron iz teške kategorije [26]

S obzirom na veličinu, dronovi se dijele na [18]:

- Vrlo mali dronovi – do 150 mm po duljini, promjer rotora do 51 mm, teže do 0,2 kg, koriste se u vojne svrhe i nadziranja,
- Mali dronovi – do 300 mm po duljini, promjer rotora do 152 mm, teže do 1 kg, koriste se u svrhu industrijskih inspekcija i za fotografiranje,
- Dronovi srednje veličine – do 1200 mm po duljini, promjer rotora do 640 mm, teže do 20 kg, koriste se u slične svrhe kao i mali dronovi,
- Veliki dronovi – preko 120 cm po duljini, promjer rotora preko 64 cm, teže preko 20 kg, koriste se u vojne svrhe i dulja nadziranja, također se koriste i u logističke svrhe kao što su

dostave u raznim granama industrije uključujući profesionalna snimanja u filmovima (Slika 16.).



Slika 16. Dron iz kategorije velikih dronova – RQ-4 Global Hawk [27]

Konačno, prema dometu dronovi se dijele na [18]:

- Dronove vrlo malog dometa – mogu letjeti do 5 km, maksimalno trajanje leta je 1 sat, koriste se u rekreacijske svrhe,
- Dronove malog dometa – mogu letjeti do 50 km, maksimalno trajanje leta je 6 sati, koriste se u svrhe nadziranja i fotografiranja,
- Dronove kraćeg dometa – mogu letjeti do 150 km, maksimalno trajanje leta je 12 sati, koriste se u svrhe duljih nadziranja i mapiranja,
- Dronove srednjeg dometa – mogu letjeti do 650 km, maksimalno trajanje leta je 24 sata, koriste se u vojne svrhe i nadziranje,
- Dronove velikog dometa – mogu letjeti do preko 650 km, trajanje leta je veće od 24 sata, koriste se u vojne svrhe, meteorološke svrhe, geografska mapiranja.

4. KONSTRUKCIJA I KOMPONENTE BESPILOTNIH LETJELICA

U današnje doba najčešći naziv u javnosti za bespilotnu letjelicu je dron, ali bolji naziv za koji se stručnjaci zalažu jest daljinski upravljana letjelica, jer je za njen uspješan rad u svakoj fazi neophodan ljudski čimbenik, koji ne smije biti zanemaren. Ipak, zbog kratkoće, u ovom radu će se često rabiti naziv *dron*.

Osnovne komponente svakog drona jesu: okvir, pogonski sustav, koristan teret, senzori, sustav kontrole leta i rada s teretom, sustav komunikacije te ljudi. U ovome poglavlju će svaka pojedina komponenta bespilotnih letjelica biti objašnjena. [18 i 23]

4.1. OKVIR

Okvir predstavlja osnovnu konstrukciju bespilotne letjelice te ovisno o pogonskom sustavu može poprimati razne oblike s ciljem poboljšanja aerodinamike, postizanja uzgona i slično. Također, okvir štiti od vremenskih uvjeta te predstavlja granicu između vanjske atmosfere i unutarnjih komponenti sustava [28]

4.2. POGONSKI SUSTAV

Pogonski sustav najviše utječe na konstrukciju i oblik letjelice. Kako je navedeno u točki 3., ovaj sustav može biti temeljen na električnoj energiji iz baterija ili solarnih ćelija, čime dron onda radi tiše ali je mogućnost prijenosa tereta manja, kao i domet. Drugi sustav je baziran na fosilnim gorivima te dronovi s njime imaju veću brzinu, domet, te mogu prenijeti više tereta, ali su bučniji i većih dimenzija. [28 i 18]

4.3. TERET

Koristan teret predstavljaju svi dodaci na letjelici osim okvira i pogonskog sustava kao što su baterija i motor. Беспilotne letjelice su najčešće konstruirane i proizvedene sa specifičnim teretom i uporabom na umu jer ti čimbenici imaju velike utjecaje na performanse letjelice. Teret koji беспilotna letjelica prenosi uključuje sve: od paketa do raznog materijala i opreme potrebnih radnicima za obavljanje specifičnih zadataka poput boja i alata za nanošenje boje, te uređaja posebnih funkcija (senzori). [28]

4.4. SENZORI

Senzori obuhvaćaju sve elemente potrebne za orijentaciju drona u prostoru i za obavljanje vizualnih zadataka. Neki od njih su optičke kamere, infracrvene kamere, elektrooptičke kamere, radar, LiDAR, laserski označivači udaljenosti, razni čitači kao što su oni za RFID tagove i barkodove. Ugradnjom senzori mogu biti fiksirani ili na posebnom elementu, zvanom pokretni sustav *gimbal*, koji omogućuje pomicanje senzora po određenim osima. Također, nužna je uporaba elemenata za smanjivanje vibracija tijekom leta kako bi podaci dobiveni od senzora bili relevantni (Slika 17.). [28]



Slika 17. Pokretni sustav gimbal [28]

4.4. KOMANDE I KONTROLA LETA BESPILOTNIH LETJELICA

Upravljanje leta kod bespilotnih letjelica vrši se na daljinu. Njihov rad može biti u potpunosti autonoman što znači da letjelica može poletjeti, obaviti zadatak te sletjeti potpuno samostalno bez ljudskog upliva. S druge strane, upravljanje letjelica može biti u potpunosti kontrolirano od strane operatora koji izvodi sve akcije. U današnje doba određene razine autonomnosti su dostupne i u komercijalnim dronovima te ih se može lako programirati da se kreću zadanim putanjama ili da miruju u zraku.

Kako bi se osigurala sigurnost u režimu rada *autopilot*, postoje redundantne tehnologije s ciljem izbjegavanja nesreće, zvane "izgubljena veza" [28]. Ako dođe do gubitka veze s kontrolom leta postoji više metoda kako bi se veza ponovo uspostavila, a neke od njih su vraćanje na zadnju poznatu lokaciju gdje je postojao signal, penjanje na višu visinu, nastavak leta istom putanjom ili pokušaji uspostavljanja drugačije vrste veze. [18 i 23]

Iako su letjelice autonomne, kontrolne stanice su sastavni dio sustava kontrole leta (Slika 18.) od koje dolaze sve potrebne komande, od kud se letjelice programiraju prije leta te gdje se letjelice servisiraju. Ove stanice se mogu sastajati od jednog kontrolora koji samo nadzire let, pa sve do više stotina kontrolora ovisno o veličini operacije.



Slika 18. Mobilna kontrolna stanica [29]

Određene vrste bespilotnih letjelica, kao što su letjelice VTOL (eng. *Vertical Takeoff and Landing* – vertikalno polijetanje i slijetanje), imaju vrlo jednostavan proces polijetanja i slijetanja za koji im je dovoljan samo ravan teren. Spram njih, druge letjelice se mogu lansirati bacanjem iz ruke (Slika 19.) te same mogu sletjeti, a za neke su potrebni posebni katapult (Slika 20.) kako bi se postigla adekvatna brzina za uzlet te slijeće pomoću nategnutog kabela i kuke na letjelici kako bi se dron mogao zaustaviti na kraćim stazama. Za najveće dronove su čak potrebne prave piste do 3 km duljine kako bi mogli poletjeti i sletjeti. [28]



Slika 19. Ručno lansiranje bespilotne letjelice *Raven RQ-11* [28]

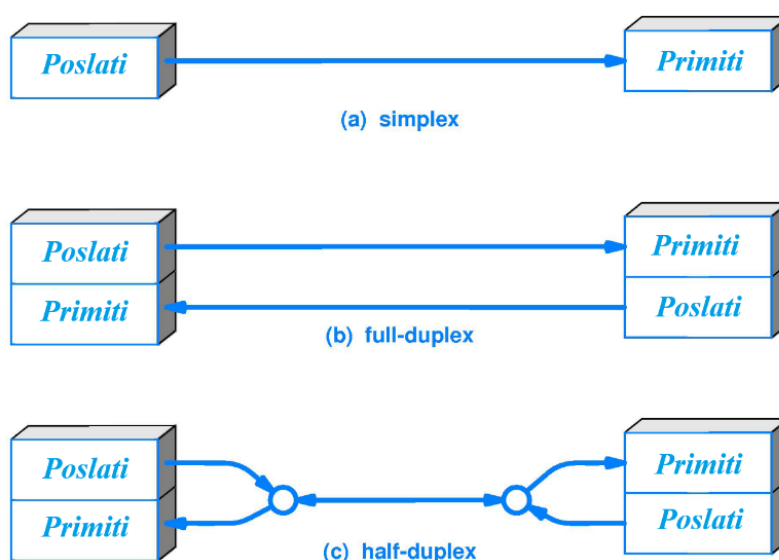


Slika 20. Lansiranje drona pomoću katapulta [28]

4.5. KOMUNIKACIJSKE VEZE

Komunikacijskom vezom ostvaruje se povezanost između letjelice i komandne stanice na tlu ili sa satelitom. Kada se signal šalje od komandne stanice ili satelita prema letjelici to se naziva dolazna veza (eng. *Uplink*), a kada se signal šalje u suprotnom smjeru to se naziva odlazna veza (eng. *Downlink*). Također postoji više vrsta podatkovnih veza o kojima ovisi brzina slanja informacija između dva objekta, a te veze mogu biti (Slika 21.) [30]:

- **Simplex:** komunikacija u jednom smjeru
- **Poluduplex:** komunikacija u oba smjera, ali ne istovremeno
- **Puni duplex:** istovremena komunikacija u oba smjera.



Slika 21. Dijagram vrsta podatkovnih veza [30]

Ova veza može biti u vidnom polju (eng. *line of sight* – LOS) ili dalje od vidnog polja (eng. *beyond line of sight* – BLOS). Komunikacija u vidnom polju označava radio vezu s dometom nešto manjim od 10 kilometara što se može povećati korištenjem opreme s automatskim pozicioniranjem za najbolji signal. Komunikacija ovim putem je brza jer je direktna bez posrednika. Veza dalje od vidnog polja (BLOS) je komunikacija pomoću satelitske veze ili vozila s relejnim prijenosnikom koji onda šalje signal prema letjelici. Ovakva komunikacija ima neograničeni domet, ali je vremensko odstupanje od slanja naredbe do njenog primanja mnogo veće i može biti i nekoliko sekundi. To može predstavljati problem u nekim ključnim situacijama, ali kako tehnologija napreduje, vremensko odstupanje se smanjuje te je ova metoda sve više u uporabi. [28]

4.6. LJUDSKI FAKTOR

Ljudski faktor je jedan od najbitnijih, ako i ne najbitniji elemenat kod bespilotnih letjelica, jer je potreban u svim fazama njihove uporabe. Igra veliku ulogu u polijetanju, kontroli leta, slijetanju, te održavanju i programiranju letjelice. Utjecaj ljudskog faktora se može umanjiti povećanjem autonomnosti bespilotne letjelice, ali to svejedno ne umanjuje njegov značaj. Kao što je ostvaren napredak u razvoju autopilota u slučaju komercijalnih aviona, tako se očekuje i za autonomnost bespilotnih letjelica te je samo pitanje vremena kada će se ona i postići. Time će ljudski faktor u upravljanju biti sve manji, ali će i dalje autonomni sustavi biti konstruirani i programirani od strane inženjera. [23 i 28]

5. BESPILOTNE LETJELICE U PROIZVODNIM PROCESIMA

5.1. SPOSOBNOSTI I PRIMJENE

U današnje vrijeme, upotreba dronova u industrijskim postrojenjima u svrhu proizvodnje ili podrške tijekom proizvodnje je tek u svojim začetima. Civilno tržište bespilotnih letjelica u 2022. godini bilo je vrijedno oko 15 milijardi USD od kojih je 25 % pripadalo granama s industrijskim primjenama, a od tih 25 % je samo 1,5 % pripadalo proizvodnim granama. [31]

Trenutno se dronovi koriste primarno na otvorenim prostorima gdje im je omogućeno brzo i sigurno letenje bez prepreka. Nasuprot tome, let u zatvorenom može biti relativno opasan zbog velikog broja prepreka kao što su vrata, dizalice, kabeli ili drugi objekti na putanjama kretanja drona. Tako sigurnost leta u zatvorenom prostoru u znatnoj mjeri ovisi o vještini pilota koji upravlja letjelicom, a ako se upotrebljava autonomno, potrebni su mnogobrojni senzori koji mogu znatno povisiti cijenu, između ostalog jer se u zatvorenom prostoru za upravljanje letjelicom ne može koristiti sustav navigacije GPS (eng. *Global Positioning System* – globalni sustav pozicioniranja). Također valja napomenuti da korištenje dronova u zatvorenim prostorima ima svoje prednosti sa zakonske strane jer takva uporaba ne spada pod sferu državnih zakona, te nema utjecaja vremenskih neprilika, dok uporaba dronova na otvorenom zahtijeva određene dozvole i obraćanje pažnje na vremenske neprilike koje mogu dodatno zakomplicirati korištenje dronova. [32]

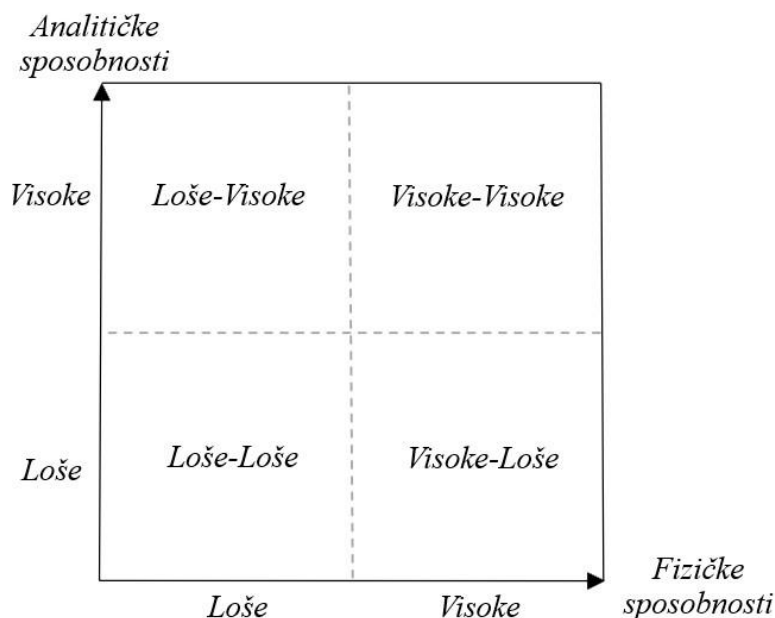
U posljednjem desetljeću tehnologija je znatno napredovala te su time i pale cijene, posebno električnih baterija, raznih naprednih tehnologija za sigurno letenje te senzora za interakciju s okolinom. Time se razvio veliki nesrazmjer između trenutnih mogućnosti dronova za industrijske svrhe i stvarnih upotreba u njima, posebno u proizvođačkim granama. U nastavku će se opisati mogućnosti dronova za primjenu u proizvodnji te kako dronovi mogu

pridonijeti smanjenju troškova proizvodnje, povećanju sigurnosti na radnim mjestima te skraćanju ciklusa rada. [33]

Kada se govori o mogućnostima dronova u svrhu pomaganja u postrojenjima, treba uzeti u obzir njihove analitičke sposobnosti spram fizičkih sposobnosti. Ovaj omjer se može podijeliti na četiri kategorije (Slika 22.) [33]:

1. **Niska analitička i niska fizička sposobnost:** Bepilotne letjelice s niskom analitičkom sposobnošću ograničene su na prikupljanje ulaznih podataka bez značajne obrade podataka. Obično se koriste za osnovne zadatke poput jednostavnog fotografiranja ili snimanja. Takve bepilotne letjelice nemaju sposobnost pretvaranja ulaznih podataka u druge oblike informacija i imaju ograničene fizičke funkcionalnosti osim letenja.
2. **Visoka analitička i niska fizička sposobnost:** Bepilotne letjelice s visokom analitičkom sposobnošću izvrsne su u obradi ulaznih podataka i njihovom pretvaranju u različite oblike podataka ili informacija. Primjerice, bepilotni sustavi opremljeni termalnim kamerama mogu primiti ulazne podatke i proizvesti termografske slike temperature zračenja. Međutim, i dalje imaju ograničene fizičke sposobnosti te se uglavnom koriste za analizu podataka.
3. **Niska analitička i visoka fizička sposobnost:** Bepilotne letjelice s niskom analitičkom sposobnošću, ali visokom fizičkom sposobnošću, obavljaju namjenske fizičke zadatke, povrh samog letenja. Mogu premještati razne predmete, kao što je dostava paketa ili prijenos alata i materijala radnicima na teže dostupnim mjestima. Ove bepilotne letjelice tako su manje usmjerene na analizu podataka, a više na fizičke operacije.
4. **Visoka analitička i visoka fizička sposobnost:** Bepilotne letjelice s visokom analitičkom i fizičkom sposobnošću su svestrane i napredne. Ne samo da učinkovito obrađuju ulazne podatke, već imaju sposobnost obavljanja fizičkih zadataka. To uključuje premještanje i dostavu predmeta te izvođenje fizičkih operacija tijekom leta, kao što su prskanje kemikalija ili popravljjanje ogrebotina na teže dostupnim mjestima, vršenje određenih popravaka na naftovodima, izvođenje radova lakiranja i bojenja raznih struktura.

Ova kategorizacija pomaže razumjeti raspon sposobnosti koje različite bespilotne letjelice mogu posjedovati, od osnovnog prikupljanja podataka do složene analize podataka i različitih fizičkih operacija.



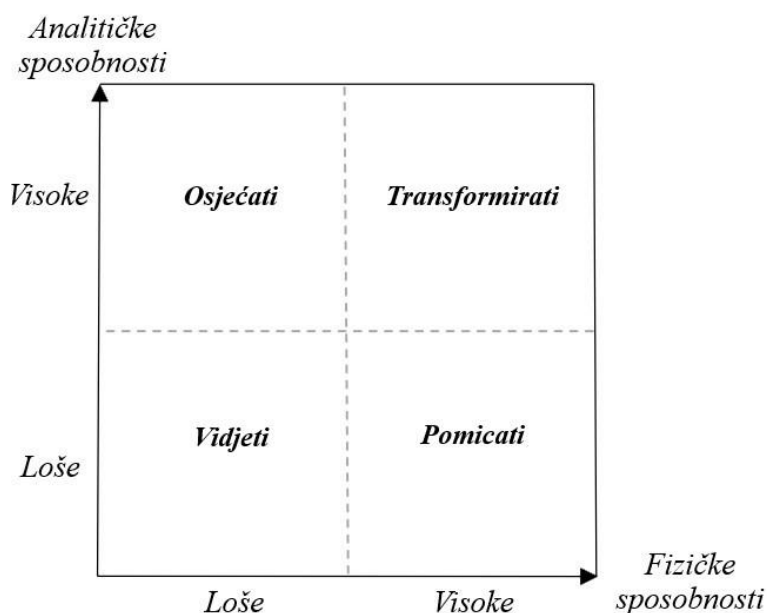
Slika 22. Podjela sposobnosti bespilotnih letjelica [33]

Sposobnosti bespilotnih letjelica u industriji proizvodnje mogu se sažeti u četiri glavne kategorije (Slika 23.) [33]:

1. **Vidjeti:** Ova sposobnost uključuje prikupljanje vizualnih podataka, često u obliku slika i videozapisa. U proizvodnji se koristi za zadatke kao što su vizualna inspekcija opreme poput plinskih plamenika, silosa, kotlova, spremnika i cjevovoda. Bespilotne letjelice s vizualnim sposobnostima koriste se i za video nadzor u smislu sigurnosti na radnom mjestu na dinamičnim lokacijama gdje nije moguće koristiti tradicionalne kamere te je onda moguće adekvatno i brzo reagirati, a također mogu pratiti i je li sve usklađeno s propisima.
2. **Osjećati:** Sposobnost *osjećanja* uključuje prikupljanje podataka i njihovo pretvaranje u strukturirane informacije bez potrebe za dodatnim fizičkim operacijama. U proizvodnji to uključuje termalne inspekcije, detekciju plinova, praćenje buke radi prepoznavanja opasnosti u naftnoj, plinskoj i petrokemijskoj industriji, nedestruktivne testove kao što su mjerenje debljine i otkrivanje korozije opreme, brojenje ciklusa, praćenje zaliha, pronalaženje izgubljenih paleta, mapiranje procesa u 3D obliku radi optimiranja rasporeda tvornice te neometanog protoka materijala i robe.

3. **Pomicati:** Беспилотне летјелце са способношћу *pomicanja* могу хватати и преносити објекте или обављати физичке операције попут прсканја. У производњи се користе за унутарлогистичке операције, као што су достава лаких компонената и резервних дијелова, те задатке попут бојења опреме и зграда или прсканја пјене током пожара.
4. **Transformirati:** Ова способност комбинира могућности *vidjeti*, *osjećati* и *pomicati*. Укључује прикупљање података и њихово претварање у информације док истовремено обавља физичке операције. Примјери укључују беспилотне летјелце које детаљно прегледавају опрему и обављају једноставне поправке с монтираним алатима, или се користе у управљању складиштима за прикупљање и сортирање нарудџби. Тренутно су ови примјери технички слоџени и економски неоствариви, али показују потенцијал за будућност, посебно у подручјима попут управљања складиштима с обзиром на пораст е-тргованја у посљедњих 10 година.

Наведене четири способности илустрирају разнолик спектар задатака које беспилотне летјелце могу обављати у индустрији и производњи, од прикупљања и анализе података до аутоматизације одређених физичких операција. У наредним годинама очекују се велики напредци у овим пољима ради све већих тежњи и притисака према оптимирању производних процеса.



Slika 23. Dijagram mogućnosti funkcija dronova [33]

5.2. IZAZOVI POVEZANI S UPOTREBOM BESPILOTNIH LETJELICA

U prethodnim dijelovima rada navedene su karakteristike bespilotnih letjelica te njihove mogućnosti, no potrebno je posebno razmotriti i postojeće razloge i izazove zbog kojih još nije došlo do većeg stupnja integracije dronova u proizvodne procese. U ovome poglavlju istaknut će se neki od glavnih izazova pri implementacijama bespilotnih letjelica u proizvodnim procesima.

1. **Tehnički izazovi:** Uključuju ograničenja u tehnologiji baterija, što utječe na trajanje leta i kapacitet (koristan teret). Većina dronova u industrijskim postrojenjima ne može kontinuirano letjeti duže od pola sata. Tehnički izazovi također uključuju unutarnju navigaciju, pouzdan prijenos podataka, sigurnosne mehanizme, softver za obradu podataka, programiranje i autonomno upravljanje dronovima te smanjenje buke. Dronovi spojeni na kabel za napajanje i prijenos podataka su opcija ali samo ako se kreću okomito na zemlju, no ako su potrebne kompleksnije putanje nužan uvjet za veće prihvaćanje dronova je poboljšane tehnologije baterija. [33]
2. **Operativni izazovi:** Trenutne operacije dronova često zahtijevaju ručno upravljanje unutar vidnog polja, što može dovesti do potencijalnih ljudskih pogrešaka i umora pilota posebno na dužim zadacima. Opcije za autonomne letove zahtijevaju pouzdanu infrastrukturu za navigaciju sa skupom popratnom opremom, let kroz složeno okruženje tvornice može biti izazovno za dronove radi same kompleksnosti unutarnjeg uređenja tvornica i postrojenja. [31 i 32]
3. **Organizacijski izazovi:** Potrebni su vještii piloti dronova koji ne samo da mogu upravljati dronovima, već i razumjeti specifične proizvodne zadatke. Često se događaju ljudske pogreške, koje predstavljaju veći problem od tehničkih problema. Razvoj uvjerljivog poslovnog plana za usvajanje dronova i upravljanje podacima prikupljenih dronovima također može biti izazovno. Potrebne su odlične organizacijske vještine da se teoretske vremenske i ekonomske uštede pretvore u realne. [33]
4. **Zakonodavni izazovi:** Propisi o korištenju dronova se još uvijek razvijaju i znatno variraju između zemalja. Letenje izvan vidnog polja (BLOS) zabranjeno je na mnogim

mjestima, što ograničava opseg primjene dronova. Dinamična priroda tehnologije dronova i sigurnosni problemi otežavaju proces regulacije. Trenutno se zakoni primarno fokusiraju na javna područja na otvorenom, dok privatna pogotovo na zatvorenom, imaju mnogo manje regulacije te u industrijskim postrojenjima u proizvođačke svrhe ne predstavljaju velike prepreke. [33]

5. **Društveni i mentalni izazovi:** Javno mišljenje o dronovima, potaknuto njihovom vojnom upotrebom, može biti negativno. Glavna briga je oko sigurnosti, privatnosti, buci i mogućem kršenju osobnih prava i podataka prilikom snimanja u poduzećima [21]. U slučajevima teških dronova i njihovih tereta pogotovo ako prelijeću direktno iznad radnika zabrinutost za njihovu sigurnost je opravdana. [31 i 32]
6. **Kibernetička sigurnost** se odnosi na rizike zbog oslanjanja dronova na bežičnu komunikaciju i dijeljenje podataka. Rješavanje sigurnosnih problema mora biti najvažniji prioritet za proizvođače kako bi zaštitili osjetljive informacije. Proizvođači dronova često prikupljaju i prenose velike količine podataka putem bežičnih veza. Ovi podaci mogu uključivati osjetljive informacije o lokacijama, operativnim procedurama i tehničkim specifikacijama. Stoga je bitno koristiti enkripciju i druge sigurnosne mehanizme kako bi se zaštitili podaci od neovlaštenog pristupa i krađe. Nadalje, dronovi su izloženi raznim vrstama kibernetičkih napada, uključujući napade DDoS, hakiranje sustava i presretanje komunikacije. Proizvođači moraju implementirati sigurnosne protokole i praćenje kako bi prepoznali i odgovorili na potencijalne napade u realnom vremenu, odnosno kako ne bi došlo do sigurnosnih propusta. Redovito ažuriranje softvera na dronovima ključno je za održavanje sigurnosti. Proizvođači trebaju omogućiti jednostavno i sigurno ažuriranje svoje opreme. Također, svako postrojenje ima sigurnosne mjere u pogledu tko može ulaziti i kako se smije kretati unutar određenih područja postrojenja. Isto tako, bitna je kontrola pristupa dronovima i njihovim sustavima. Implementacija snažnih metoda autentifikacije, kao što su dvofaktorska autentifikacija ili biometrijska verifikacija, može spriječiti neovlašten pristup dronovima, podacima i uređajima. Također je i fizička zaštita dronova neophodna u smislu da se drže na točno određenim mjestima kada nisu u uporabi, odnosno iza sigurnosnih vrata ili u sigurnim prostorijama. Nadalje, osoblje koje rukuje dronovima treba biti svjesno kibernetičkih prijetnji i pridržavati se najboljih praksi u pogledu

sigurnosti. Edukacija i obuka osoblja o sigurnosnim protokolima i postupcima ključni su elementi u zaštiti opreme i povjerljivih informacija [34]

Na kraju valja napomenuti da, iako je dostupnost dronova povećana zbog masovne proizvodnje, prilagođena rješenja za specifične potrebe postrojenja i njihova uspješna implementacija i dalje mogu biti vrlo skupi. To je razlog vrlo ograničene primjene dronova u proizvodnim procesima.

5.3. UŠTEDE PRI UPORABI BESPILOTNIH LETJELICA U INDUSTRIJI

Potencijalne koristi korištenja dronova u proizvodnji mogu se podijeliti u pet osnovnih kategorija ušteta:

1. **Sniženje troškova:** Dronovi imaju potencijal za značajno sniženje proizvodnih troškova. U proizvodnim postrojenjima s čestim kontrolama, dronovi mogu dovesti do značajnih ušteta. Na primjer, upotreba dronova za kontrolu smanjuje potrebu za radom koji zahtijeva mnogo ljudske snage i eliminira potrebu za upotrebom viličara ili ostalih metoda pristupa visokim ili slabo dostupnim mjestima. Primjer iz naftne industrije ilustrira, da je inspekcija koja je prvobitno trajala 700 radnih dana za jednu osobu smanjena na samo 28 radnih dana za jednu osobu, uz uvođenje drona kao alata za pomaganje [33]. Osim toga, dronovi se koriste za brojenje zaliha u velikim skladištima, što rezultira uštedama troškova zamjenom ljudskog rada, smanjenjem ponovnog rada zbog pogrešaka i poboljšanjem stope ispunjenja narudžbi. Tako BMW već u svojim tvornicama upotrebljava dronove u svrhu inventura proizvoda na policama pomoću RFID tehnologije [33]. Od uvođenja dronova udio ljudskih grešaka u inventurama se smanjio za 96 % što je dovelo do skraćivanja vremena držanja proizvoda na stanju u skladištu. Naredni primjer je u kompaniji GE Aviation [33], gdje se dronovi trenutno koriste za inspekciju avionskih motora i turbina tijekom proizvodnje pomoću termalnih kamera montiranih na dronove kako bi se greške detektirale i riješile što prije, čime se eliminira potencijalno opasno penjanje radnika na povišena i skućena mjesta što bi moglo dovesti do ozljeda na radu. [34]
2. **Brzina obavljanja zadataka:** Dronovi mogu ubrzati izvođenja različitih zadataka, posebno onih koji uključuju inspekciju opreme i instalacija do kojih je teško doći. U usporedbi s tradicionalnim metodama koje uključuju postavljanje skela, ljestava i pristup preko užadi, dronovi nude kraća vremena postavljanja i veću pokretljivost. Ta brzina omogućuje češće inspekcije i olakšava brže otkrivanje incidenata poput istjecanja plina. Dronovi se također koriste za upravljanje inventarom velikih količina roba i sirovina, koristeći tehnologiju RFID za skeniranje čime se povećavaju brzina i učinkovitost brojenja zaliha u usporedbi s ručnim skeniranjem. [33]

3. **Poboljšanja sigurnosti:** Sigurnost je značajna prednost upotrebe dronova u proizvodnji. Oni su sposobni zamijeniti ručne ljudske inspekcije u opasnim područjima i za teško dostupnu opremu. Dronovi mogu izvoditi akcije nadziranja postrojenja ili raznih terena kako bi se spriječile ilegalne radnje. Također mogu imati montirane razne senzore za detekciju i otkrivanje kontaminacije raznih štetnih plinova. Neprocjenjivi su u operacijama traženja i spašavanja tijekom izvanrednih situacija kao što su potresi ili velike vremenske nepogode, a isto tako i u velikim proizvodnim postrojenjima ako dođe do neželjenih situacija. Također mogu snimati vježbe za hitne situacije kako bi se poboljšale metode evakuacije ako ikad dođe do nesreće. [33 i 34]
4. **Učinkovito prikupljanje podataka:** Dronovi poboljšavaju učinkovitost prikupljanja podataka i omogućuju prikupljanje podataka koji su ranije bili teško dostupni. Proizvode visokokvalitetne, dosljedne i ponovljive skupove podataka, posebno korisne u operacijama održavanja u procesnim industrijama. Dronovi također mogu koristiti više senzora za prikupljanje podataka, kao što je prije navedeno: RFID čitači, termalne kamere, senzori za detekciju plinova itd. Povećana točnost i količina podataka prikupljena dronovima osnažuju upravljačko donošenje odluka, omogućujući poduzećima da utvrde treba li nešto popraviti, nadopuniti, smanjiti, ponovno pregledati ili ne činiti ništa. Dronovi opremljeni softverima za analizu podataka dodatno poboljšavaju efikasnost postrojenja pružajući donositeljima odluka smislene izvještaje u lako razumljivim formatima. [32 i 33]
5. **Odnosi s javnošću i marketing:** Dronovi se mogu koristiti kao učinkoviti alati za odnose s javnošću i marketing. Pilot-studije i primjene dronova u tvornicama često privlače medijsku pažnju i pokrivenost. Tvrtke koje su rano usvojile tehnologiju dronova mogu iskoristiti ovu medijsku pažnju kako bi se predstavile kao inovativne i usmjerene prema budućnosti. Pozitivna medijska izloženost može povoljno utjecati na napore regrutacije, percepciju javnosti i vrijednost *branda*. U posljednje vrijeme dronovi počinju zamjenjivati predstave vatrometa predstavama jata ili rojeva dronova (eng. *dron swarm shows*) u kojima velik broj dronova opremljenih LED lampicama rade sinkronizirane akcije i poteze kako bi na nebu stvorili neke atraktivne prikaze. [32]

5.4. TRENUTNO STANJE IZVEDBE BESPILOTNIH LETJELICA

Trenutno se dronovi najviše upotrebljavaju bez modifikacija, onako kako se nabave s tržišta, što predstavlja najjeftinije rješenje, ali zato uzrokuje i najmanje uštede. Ipak, i to može biti dovoljno za obavljanje jednostavnijih zadataka u području funkcije *gledanja*, poput primjene obične kamere u operacijama nadziranja postrojenja i praćenja kvarova u postrojenju. Kod funkcije *osjećanja* isto se mogu koristiti obične kamere, ali je potrebna i kompleksnija sensorika koja zahtijeva nadogradnje ili više specijalizirane dronove. *Gledanje* se može unaprijediti dodavanjem posebnih kamera, poput termalnih, za praćenje toplinskih gubitaka u postrojenju ili senzora za detekciju štetnih čestica u zraku ili plinova, kako bi se onda dinamično moglo pratiti postoji li opasnost. Nadalje, mogu se nadodati laserski i ultrazvučni senzori za nedestruktivna ispitivanja materijala, te se mogu nadodati i kamere i senzori za barkôd i RFID očitavanje na visokim policama za koje bi se trošilo mnogo više vremena da se očitavaju ručno od strane radnika s viličarima ili dizalicama. LiDAR skeneri se mogu koristiti za mjerenje raznih volumena. [33]

Trenutni razvitak tehnologija omogućuje lakše unaprjeđenje analitičkih sposobnosti od fizičkih, jer za unaprjeđenje analitičkih potrebno je samo ubrzati obradu podataka letjelica što ne utječe previše na karakteristike građe drona. S druge strane, fizičke sposobnosti letjelica su ograničene zaostalom tehnologijom baterija te nemogućnošću prijenosa velikih tereta. Karakteristika *pomicati* je slabo zastupljena u postrojenjima u zatvorenom jer su dronovi nepotrebni i neisplativi spram fiksiranih kamera i senzora za praćenje specifičnih objekata u postrojenju, također su inferiorniji u smislu prenosivog tereta spram dizalica, AGV-a i viličara. Komponenta *transformirati* je izuzetno teško izvediva za dronove ne samo u industrijskim postrojenjima već i u svim ostalim granama, radi samih tehnoloških i fizičkih ograničenja dronova. Trenutno su u eksperimentalnim fazama ispitivanja za izvedivost i isplativost primjene specijaliziranih dronova u nanošenju premaza za zaštitu od korozije, ali i općenito kod održavanja na udaljenim konstrukcijama kao što su naftovodi ili na teže dostupnim konstrukcijama poput naftnih platforma. [34]

6. PRIMJER REALIZACIJE BESPILOTNIH LETJELICA U PROIZVODNIM PROCESIMA

Kako je navedeno u točki 5., upotreba dronova sa sposobnošću *transformirati* su u sadašnjim postrojenjima malobrojne, a tamo gdje se upotrebljavaju su u fazi testiranja i njihova primjena je funkcionalno i isplativo upitna radi brojnih tehnoloških, sigurnosnih i organizacijskih razloga, kao što je precizno izuzimanje predmeta iz određene količine te njegovo sigurno prenošenje do mjesta rada. Isto tako, dolazi u pitanje veličina i sposobnost drona te njegovo napajanje. [33]

Zbog toga će se u nastavku teksta prikazati primjer iz kategorije sposobnosti *osjećati*, koji je drugi po učestalosti primjenjivanja nakon sposobnosti *vidjeti*. Također je i kompleksniji jer se podaci ne samo prikupljaju, već i obrađuju te šalju u centralnu procesnu jedinicu za daljnju obradu. [33]

6.1. UPRAVLJANJE ZALIHAMA

Nakon što se određeni predmeti i roba proizvedu unutar tvorničkog pogona, potrebno ih je prikladno skladištiti kako bi se osigurao kontinuirani tok materijala bez zagušivanja u cjelokupnom proizvodnom lancu. Ovdje se javlja problematika kod skladištenja robe viličarima te povremenih inventurnih pregleda koji su po ljude iscrpljujući i dugotrajni te ponekad zaustavljaju cijelu aktivnost u skladištu dok se ne obave u potpunosti. S obzirom na to da se taj posao obavlja od strane ljudi, postoji šansa za greškama, a može doći i do nesreća na radu kao na primjer pad radnika s visine.

S ovime na umu, tražena su rješenja kako minimirati vrijeme potrebno za točnu organizaciju robe, minimirati količinu robe na skladištu i ukloniti zastoje, a da je u isto vrijeme

određena roba što prije spremna za isporuku, te smanjiti nesreće na radu. To rješenje su pojedina postrojenja pronašla u dronovima, ali kako bi njihova implementacija bila uspješna određeni faktori moraju biti uzeti u obzir. [33]

6.1.1. Faktori za uspješnu primjenu

Jedan od najbitnijih faktora za ekonomsku isplativost uporabe dronova u svrhu upravljanja zalihama jest količina zaliha i veličina skladišta, a neka mogu biti i površine veće od 1 500 000 m² [35 i 36]. Ovdje postaje jasno da je potreban veliki broj radnika za efikasnu izvedbu i pregled cijelog inventara. U ovome polju dronovi su izvrsni radi svoje brzine leta, pokretljivosti tijekom leta te veličine, a kako tehnologija napreduje ovi elementi samo će se poboljšavati.

Kako je već navedeno u točki 5., brzina i točnost također su ključni faktori. Ako su dronovi pravilno programirani i sustav je adekvatno postavljen, ne može doći do grešaka u upravljanju zalihama. Nadovezujući se na to, potrebno je implementirati funkcionalan sustav upravljanja dronovima te informacijama s adekvatnom obradom tih informacija [37]. Također je bitna cijena softverskog sustava te njegovo održavanje kao i obuka radnika koji bi upravljali tim sustavom i dronovima ako sustav nije autonoman. [31] Iako je autonoman sustav sigurniji i bolji, potrebna su dodatna ulaganja u njegov razvoj za svako postrojenje zasebno. Isto tako bitan faktor je cijena samih dronova i popratne tehnologije kao što su kamere, RFID i barkôd čitači te njihova dugoročna isplativost i održavanje [38]. S druge strane je broj radnika te njihovo osposobljavanje za obavljanje istog posla ručno. Daljnji bitan faktor za uzeti u obzir je sposobnost dronova da neometano obavljaju svoj posao bez ometanja cjelokupnog rada postrojenja, jer imaju mogućnost leta te ne dolazi do zagušivanja uskih prolaza između regala. [34]

Dronovi omogućavaju lakša proširenja pogona jer su lako prilagodljivi i nije potrebno znatno ili uopće povećavati radnu snagu za njihovo upravljanje, što prvenstveno ovisi o autonomnosti sustava [39]. Kako dronovi, popularno rečeno, nemaju radno vrijeme i ne zahtijevaju odmor, oni mogu raditi veći dio vremena bez zastoja, osim za vrijeme održavanja i punjenja baterija. Vrijeme punjenja baterija se može značajno skratiti izmjenjivim baterijama. Dok su jedne baterije u uporabi ostale se pune te se kasnije samo zamjenjuju po potrebi što oduzima minimalnu količinu vremena [40]. Primjenom dronova povećava se vidljivost u lancu

opskrbe pa je lakše uočiti manjak ili višak proizvoda te onda adekvatno reagirati što povećava profitabilnost. [41]

U realnim uvjetima, u skladištima Walmarta upotrebom bespilotnih letjelica kod upravljanja zalihama, ciklus jednog praćenja stanja proizvoda na zalihama, skraćen je s 30 dana kada je obilazak obavljao skladištar, na samo jedan dan primjenom dronova. [42]

Također, u izvješću 2013. godine Walmart iznosi kako su izgubili tri milijarde USD u prihodima radi grešaka u realnim količinama proizvoda na stanju i količini proizvoda prema digitalnim izračunima i procjenama. [43] Nadalje, u izvješćima američka vojska navodi kako su između 2003. i 2011. godine izgubili 5,8 milijardi USD radi netočnih praćenja zaliha materijala, a Američka nacionalna federacija maloprodaje navodi kako se godišnje izgubi oko 45,2 milijarde USD robe radi lošeg praćenja stanja, grešaka te općenito sporosti cijelog tog sustava. [44]

6.2. ANALIZA UPORABE BESPILOTNIH LETJELICA U SKLADIŠTIMA

Prije realizacije upotrebe dronova u proizvodnim okruženjima potrebno je analizirati tehničke mogućnosti i ograničenja te ekonomičnost. U vezi mogućnosti primjene u skladištima, nameće se razmatranje zamjene viličara dronovima. Naime, zbog svojih mogućnosti brže promjene visine, dronovi su u uočljivoj prednosti nad viličarima. Ali pritom, kako je već navedeno u radu, nije bitna samo njihova brzina prikupljanja podataka nego i obrada te točnost.

Kao primjer će se uzeti dron kompanije koja trenutno predvodi u tehnologiji i proizvodnji dronova, *SZ DJI Technology Co., Ltd.* Ova kompanija se bavi razvojem dronova od 2006. godine te zauzima 70 % cijelog tržišta vezanog za prodaju i održavanje dronova. [45]. Dron u pitanju je *DJI Air 3* [46]. Cijena mu iznosi 1139 eura, a može letjeti brzinom od 21 m/s te mu je vertikalna brzina 10 m/s. Trajanje baterije je 46 minuta s mogućnošću brze izmjene kako bi efikasnost bila što veća. Za očitavanje RFID tagova potrebna je dodatna oprema koja košta dodatnih 1000 eura [47]. Za ovaj hardver potreban je i softver kojim bi se omogućilo prikupljanje i obrada podataka. Odabran je softver mađarskog *startupa Aeriu*, osnovanog 2017. i koji trenutno surađuje s IKEA-om u Mađarskoj za uvođenje dronove pri upravljanju zalihama. [48] Cijena softvera iznosi 15 000 eura za implementaciju i obuku radnika te 4 000 eura

mjesečno. Također, treba još uključiti i mjesečnu plaću od 1 300 eura bruto mjesečno za radnika kao operatera drona.

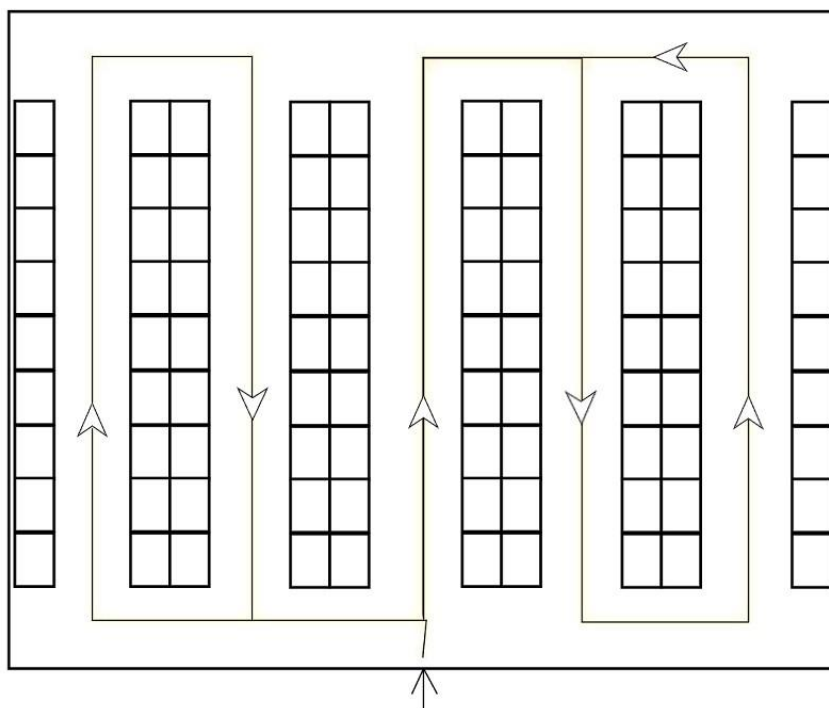
S druge strane cijena visokoregalnog viličara-komisionera (eng. *VNA man-up turret truck, Order picker*) iznosi oko 30 000 eura. [49 i 50]. Ovaj viličar ima mogućnost podizanja radnika na visinu palete kako bi mogao pregledati te ustanoviti sadržaj te palete. Brzina viličara je 3 m/s s brzinom podizanja i spuštanja vilica od 0,6 m/s. Cijena radnika kao skladištara mjesečno iznosi 1200 eura bruto. [51]

Ovime se dobiva da početna cijena implementacije s jednim dronom iznosi: 17 139 eura za dron, s mjesečnim davanjima za radnika i softver od 5300 eura, ukupno za prvu godinu 80 739 eura.

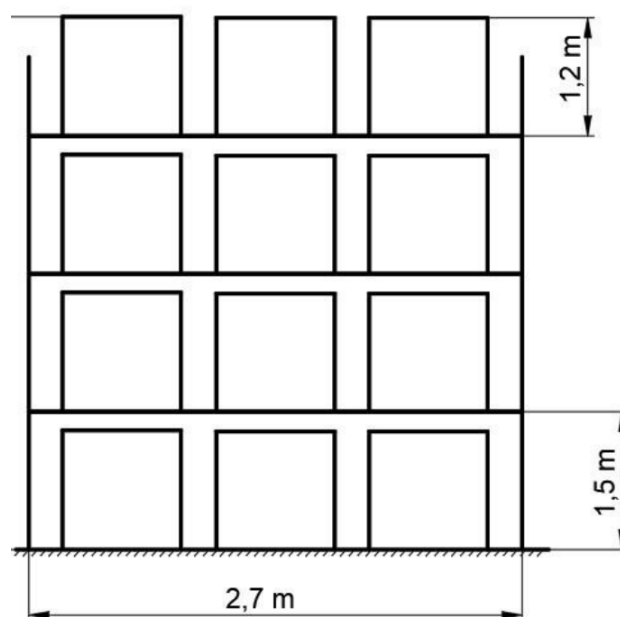
Cijena viličara je 30 000 eura s mjesečnim davanjima za radnika od 1200 eura, cijena za prvu godinu poslovanja iznosi 44 400 eura.

Po ovim inicijalnim izračunima se vidi da je uporaba dronova gotovo dva puta skuplja za prvu godinu. Kasnije u narednim godinama skuplja je čak za četiri i pol puta. Razlog toga je što su troškovi viličara najskuplji u prvoj godini kada je potrebno uložiti u njegovu kupnju te je kasnije potrebno samo financirati plaću skladištara. S druge strane kod primjene drona uz plaću radnika potrebno je financirati i licencu softvera.

Za primjer će biti uzeto skladište dimenzija 30 x 33,2 x 6,5 metara (Slika 24.). Jedan paletni regal je dužine 2,7 metara i širine 1,3 metara za jednostruki te 2,7 metara širine za dvostruki (Slika 25.). Visina paletnog mjesta je 1,5 metara, a regala je 6 metara. Udaljenost od vanjskih zidova je minimalno 0,1 metar. Za širinu prolaza između regala kao i s donje i gornje strane skladišta bit će uzeto 3,2 metara radi veličine viličara-komisionera. U jedan regal stane 12 paletnih mjesta, 3 po širini i 4 po visini.



Slika 24. Skica skladišta



Slika 25. Skica skladišnog regala [50]

Sa zadanim dimenzijama skladišta, određuje se broj regala u jednom redu:

$$n_r \leq \frac{L_s - b_3 - d_{zr}}{l_r} \quad (1)$$

gdje su:

b_3 – širina glavnog prolaza [m]

d_{zr} – odmak regala od bočnih vanjskih zidova [m]

l_r – duljina regala [m]

L_s – duljina skladišta [m]

n_r – broj regala po jednom redu

$$n_r \leq \frac{33,2 - 3,2 - 3,2 - 0,1}{2,7} \leq 9,88 = 9 .$$

Zatim se određuje ukupni broj regala:

$$n_1 \leq \frac{B_s - 2 * d_{zr}}{b_{rd} + b_2} \quad (2)$$

gdje su:

b_2 – širina pomoćnih prolaza između regala [m]

B_s – širina skladišta [m]

b_{rd} – širina dvostrukog regala [m]

d_{zr} – odmak regala od bočnih vanjskih zidova [m]

n_1 – broj dvostrukih regala

$$n_1 \leq \frac{30 - 2 * 0,1}{2,6 + 3,2} \leq 5,14 = 5 .$$

Nakon što je definiran broj regala u jednom redu te broj redova regala u skladištu, određuje se ukupni broj paletnih mjesta u cijelom skladištu:

$$Q = n_1 * 2 * n_r * a_1 \quad (3)$$

gdje su:

a_1 – broj tereta u jednom jednostrukom redu [komada]

n_1 – broj dvostrukih regala

n_r – broj regala po jednom redu

Q – Broj paletnih mjesta

$$Q = 5 * 2 * 9 * 12 = 1080 .$$

Kako bi lakše došli do konačnog potrebnog vremena za obilazak svih paletnih mjesta, put će se rastaviti na horizontalnu i vertikalnu komponentu. Za računanje udaljenost koju je potrebno prijeći kako bi se obišli svi regali u horizontalnom smjeru bit će uzeta S metoda prolaza:

$$\begin{aligned} x &= 15 - 1,3 - 0,1 + 30 + 1,6 + 2,7 + 1,6 + 30 + 1,6 + 2,7 + 1,6 + 30 + 1,6 + 2,7 + 1,6 \\ &\quad + 30 + 1,6 + 2,7 + 1,6 + 30 + 30 + 15 - 1,3 - 0,1 = \\ &= 2 * (15 - 1,3 - 0,1 + 30) + 4 * (1,6 + 2,7 + 1,6 + 30) = 230,8 \text{ m} . \end{aligned}$$

Vrijeme koje je potrebno viličaru da obiđe sva paletna mjesta u horizontalnom smjeru iznosi:

$$t_1 = \frac{x}{v_{hv}} \quad (4)$$

gdje su:

t_1 – vrijeme potrebno za obilazak skladišta u horizontalnom smjeru [s]

v_{hv} – brzina viličara u horizontalnom smjeru [m/s]

x – prijeđeni put za obilazak svih paletnih mjesta [m]

$$t_1 = \frac{230,8}{3} = 76,9 \approx 77 \text{ s} .$$

Izračunato je da ima 9 regala po redu, 10 redova regala od koja su 4 dvostruka i 2 jednostruki, u svakom regalu se nalazi po 3 paletna mjesta po širini što znači da će viličar morati stati:

$$Q_s = n_r * n_2 * 2 * n_{pmš} \quad (5)$$

gdje su:

Q_s – broj stajanja

n_2 – broj jednostrukih regala

$n_{pmš}$ – broj paletnih mjesta po širini

n_r – broj regala po jednom redu

$$Q_s = 9 * 2 * 5 * 3 = 270 .$$

Za svako od tih 270 stajanja radnik se mora dignuti gore s viličarom-komisionerom te pregledati svako paletno mjesto zasebno te se spustiti natrag dolje, što iznosi:

$$h_{vv} = n_s * h_{pm} \quad (6)$$

gdje su:

h_{vv} – put do vrha regala za dron u oba smjera [m]

h_{pm} – visina paletnog mjesta [m]

n_s – broj stajanja

$$h_{vv} = 270 * (1,5 + 1,5 + 1,5) * 2 = 2430 \text{ m} .$$

Vrijeme koje je potrebno radniku da obiđe svako paletno mjesto u vertikalnom smjeru iznosi:

$$t_2 = \frac{h_{vv}}{v_{vv}} \quad (7)$$

gdje su:

h_{vv} – put do vrha regala za viličara u oba smjera [m]

t_2 – vrijeme potrebno za obilazak skladišta u vertikalnom smjeru [s]

v_{vv} – brzina viličara u vodoravnom smjeru [m/s]

$$t_2 = \frac{2430}{0,6} = 4050 \text{ s} .$$

Ukupno potrebno vrijeme za obilazak svih paletnih mjesta dobiva se zbrojem vremena potrebnog za obavljanje rada u horizontalnom smjeru i vremena potrebnog za obavljanje rada u vertikalnom smjeru, koje iznosi:

$$t_v = t_1 + t_2 \quad (8)$$

gdje su:

t_1 – vrijeme potrebno za obilazak skladišta u horizontalnom smjeru [s]

t_2 – vrijeme potrebno za obilazak skladišta u vertikalnom smjeru [s]

t_v – vrijeme potrebno kako bi viličar obišao sva paletna mjesta [s]

$$t_v = t_1 + t_2 = 77 + 4050 = 4127 \text{ s} = 68,8 \text{ min} .$$

Put koji dron mora prijeći kako bi obišao sva paletna mjesta, pod pretpostavkom da leti na visini od 1 metar, iznosi:

$$h_{vd} = n_s * h_{pm} \quad (9)$$

gdje su:

h_{pm} – visina paletnog mjesta [m]

h_{vd} – put do vrha regala za dron u oba smjera [m]

n_s – broj stajanja

$$h_{vd} = 270 * (1,5 + 1,5 + 0,5) * 2 = 1890 \text{ m} .$$

U usporedbi s ovime dron ne mora stajati i ne mora izvoditi posebne akcije kako bi mijenjao orijentaciju kretnji iz vodoravne u vertikalnu te mu je za cjelokupni obilazak potrebno manje vremena nego viličaru. Za vodoravnu brzinu neće biti uzeta maksimalna od 21 m/s nego 15 m/s iz sigurnosnih razloga. Vertikalna brzina je 10 m/s, na ovo potrebno vrijeme bit će dodan

faktor sigurnosti od jedne sekunde po lokaciji kako bi se osiguralo očitavanje RFID tagova, vrijeme potrebno da se obiđu sva paletna mjesta je:

$$t_d = \frac{x}{v_{hd}} + \frac{h_{vd}}{v_{vd}} + S \quad (10)$$

gdje su:

h_{vd} – put do vrha regala za dron u oba smjera [m]

S – faktor sigurnosti

t_d – vrijeme potrebno kako bi dron obišao sva paletna mjesta [s]

v_{hd} – brzina drona u horizontalnom smjeru [m/s]

v_{vd} – brzina drona u vertikalnom smjeru [m/s]

x – prijeđeni put za obilazak svih paletnih mjesta [m]

$$t_d = \frac{231}{15} + \frac{1890}{10} + 1080 * 1 = 1284 \text{ s} = 21,41 \text{ min} .$$

U ovome primjeru se vidi da, iako je upotreba dronova 4,5 puta skuplja od upotrebe viličara, vrijeme potrebno za obilazak svih paletnih mjesta za dron iznosi svega 31,1 % vremena potrebnog viličaru. Također treba uzeti u obzir kako je ovo skladište relativno maleno budući da ima površinu od svega 996 m², a kako je rečeno u točki 6.2., neka skladišta mogu biti veća i od 1 500 000 m² te su vremenske uštede lako uočljive. Također, upotreba dronova ima i ostalih prednosti kako je u prijašnjim dijelovima naglašeno, a to su kontinuirano praćenje proizvoda na stanju, točnost prikupljenih podataka, povećana sigurnost na radu te smanjenje zagušenosti regalnih prolaza.

7. BUDUĆNOST UPORABE BESPILOTNIH LETJELICA U PROIZVODNIM SUSTAVIMA

7.1. TEHNOLOGIJA RFLY

Radio-frekvencijska identifikacija (RFID) je uvedena kako bi se olakšao i unaprijedio posao upravljanja zalihama te je ova tehnologija počela preuzimati ulogu koju su prije njih imali barkodovi. Prednosti RFID tagova [52] su da se mogu očitavati bez direktne linije vida te s veće udaljenosti u usporedbi s barkodovima. Također, mogu pohraniti više informacija te su prilagodljiviji [53]. Unatoč svojim prednostima, imaju i ograničenja, a to je da sustavi očitavanja nisu standardizirani te može doći, u rijetkim slučajevima, do kolizije signala tagova ako su dva RFID taga dovoljno blizu jedan drugom, zbog čega u isto vrijeme pošalju signal i time dolazi do greške unutar RFID čitača. Ipak, postoje razna rješenja za ovaj problem, ali ta rješenja samo smanjuju učestalost pojave grešaka, ali ih ne uklanjaju u potpunosti. Neka od rješenja su aktivno mijenjanje frekvencija usred čitanja i višekratni pristup s vremenskim dijeljenjem (eng. *Time Division Multiple Access – TDMA*), kao metoda dodjeljivanja vremena reagiranja tagovima u svrhu izbjegavanja sukoba.

RFID čitači mogu biti relativno veliki za dronove koji se moraju kretati manjim prostorima, određenom brzinom te imaju fiksno radno vrijeme radi trajanja baterija, koje im masa čitača smanjuje. MIT kao odgovor na predstavljeni problem razvija novi sustav zvan *Rfly* kod kojeg su dronovi opremljeni relejom za prenošenje signala od taga do čitača koji je znatno manji i lakši te letjelice mogu letjeti nesmetano (Slika 26.) [43]. Ovom tehnologijom se uspješno rješava prethodno navedeni problem pojave grešaka tijekom očitavanja RFID tagova. Također omogućava da dronovi imaju svoj RFID tag na sebi te ga odašilju čime se onda sa sigurnošću može odrediti lokacija i vrijeme čitanja svakog taga, a to onda vrijedi i za dronove.

Ispitivanja su trenutno u tijeku u skladištima u državi Massachusetts (Slika 27.), SAD. Rezultati su trenutno obećavajući, a predvodnik ovog projekta govori kako se razne mogućnosti ove tehnologije tek otkrivaju. [44]



Slika 26. Drona za testiranje tehnologije Rfly [47]



Slika 27. Prikaz veličine drona i očitavanje RFID tagova [47]

7.2. TEHNOLOGIJA ROJENJA

Jedna od tehnologija koja bi u budućnosti mogla imati veliki značaj za industriju je tehnologija rojenja dronova (eng. *swarming drones*). Ova ideja je krenula iz promatranja prirode, na primjer kako pčele funkcioniraju i dijele informacije između sebe i kako određene zadatke obavljaju zajedno mnogo efikasnije nego kada ih rade pojedinačno. Isto je također viđeno kod migracija ptica za vrijeme seoba. [54]

Kod dronova ova tehnologija predstavlja visoku autonomnost od operatera gdje su dronovi opremljeni s mnoštvom senzora kako bi se mogli orijentirati u prostoru. Svime time upravlja kompleksan algoritam koji kontinuirano uči kroz same aktivnosti dronova. Što se više dronova međusobno poveže, to efikasniji te brže rješavaju probleme jer im ova međupovezanost omogućuje brzo dijeljenje informacija na temelju kojih onda ostali dronovi mogu učiti i reagirati. Ova tehnologija naglašava sposobnost dronova da surađuju te koordiniraju ka zajedničkom rješenju. [54]

Trenutno se ova tehnologija upotrebljava u poljoprivrednoj industriji kako bi se pratila kvaliteta i stanje usjeva te maksimirala količina žetve. Također, *swarming* se koristi u operacijama spašavanja ljudi kako bi se žrtve što prije pronašle te se adekvatno reagiralo. Trenutno se samo primjenjuju u akcijama pronalaženja ljudi i dojavama o lokaciji. [54]

U industrijskoj proizvodnji još nema konkretnih upotreba ove tehnologije osim u logističke svrhe dostava paketa do vrata krajnjeg kupca (eng. *last mile delivery*). Ova krajnja faza dostave je najkompleksnija radi velikog broja raznih lokacija kao i raznih veličina i težina paketa. Zahtijeva velik broj dostavljača i kamiona kako bi se sve narudžbe ispunile. Tehnologija rojenja ovdje može pomoći radi svoje sposobnosti strojnog učenja (eng. *machine learning*) kako bi sami optimirali dostavu raznih paketa te odredili najkraće rute za najbrže i sigurne dostave. [55] Dostava paketa dronovima je već preko 10 godina u testnim fazama, za primjer se može vidjeti *Amazon Prime Air* koji ima mnoštvo problema za riješiti kao što je domet dronova, snaga za prijenos težih i većih paketa te sama logistička organizacija radi velikog broja narudžbi. [56]

8. ZAKLJUČAK

Od početka 21. stoljeća razvojem tehnologije zainteresiranost za bespilotne letjelice je uvelike narasla. Od svojih vojnih korijena u 19. stoljeću, odnosno bespilotnih balona, preko letjelica s promjerom krila preko 20 metara u 20. stoljeću za daleka i dugačka nadziranja, pa sve do 21. stoljeća s taktičkim preciznim malim dronovima, tehnologija je nedvojbeno daleko stigla. Također se i ideja bespilotnih letjelica znatno proširila i u sve grane civilnih upotreba sa svojim početkom u prvom desetljeću 21. stoljeća. Razlog tome se krije u prijenosu informacija iz vojne industrije prema civilnoj čija posljedica je pad cijena mikročipova, žiroskopa, baterija te ostalih pripadajućih tehnologija. Iako je mnogo postignuto s ovim letjelicama, njihov potencijal za industriju i proizvodnju se tek počeo otkrivati te je tržište za njih još uvijek relativno maleno. Pravo otkrivanje njihovih sposobnosti kao i upotrebe tek će nastupiti u nadolazećim desetljećima, jer kao što je navedeno u ovome tekstu, većina tehnologija povezanih s dronovima je u testnim fazama ili su tek na prvoj iteraciji implementacije u realnim tvorničkim pogonima i industrijskim postrojenjima.

Niti jednu novu tehnologiju nije lako implementirati u već postojeća postrojenja i poslovne modele. Trenutno najveći problem u daljnjem prihvaćanju dronova u industrijskim procesima predstavljaju početna kapitalna ulaganja te njihova kvalitetna implementacija. Također, jednu od uloga igra i inertnost tržišta prema promjenama. Nadalje, potrebne su edukacije i zapošljavanje potpuno novih kadrova koji bi tehnologiju dronova kvalitetno ukomponirali u postojeće modele. Iako postoji mnoštvo prepreka niti jedna nije takva da se ne može riješiti dodatnim istraživanjima. Jedna od prednosti je da se gotovo sva tehnologija unutar bespilotnih letjelica nalazi i u drugim elektroničkim ili mehaničkim uređajima i strojevima te njihovim razvitkom razvijat će se i bespilotne letjelice.

Trenutno se u proizvodnoj industriji dronovi najčešće koriste iz kategorije *vidjeti* i *osjećati* radi svojih fizičkih i tehnoloških ograničenja kao što su snaga, veličina, baterije, ali i iz ekonomskih razloga. U budućim tehnološkim istraživanjima trebalo bi početi težiti prema većoj specijalizaciji dronova za izvođenje funkcija *pomicati* i *transformirati* te rješavanju izazova koji to priječe. Potencijal za optimizacijom u tim područjima je velik radi samih sposobnosti dronova, kao što je njihova mobilnost i brzina obavljanja raznih funkcija.

U ovome radu dan je proračun prema vlastitom primjeru gdje je bespilotna letjelica uspoređena s viličarom u upravljanju zalihama u skladištu određenih dimenzija. Uzete su stvarne karakteristike, cijene i sposobnosti drona i viličara te ostali pripadajući troškovi. Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se kako je tehnologija bespilotnih letjelica znatno skuplja pri inicijalnoj integraciji u skladišnom procesu, kao i u narednim godinama radi softverske licence. S druge strane ciklus obilaska skladišta je znatno ubrzan čime se štedi na vremenu, ali se također ne smiju zanemariti i prednosti kao točnost prikupljenih podataka, kontinuirano praćenje proizvoda na stanju unutar skladišta, povećana sigurnost na radnom mjestu jer radnik ne mora obilaziti regale na većim visinama te smanjenje zagušenosti regalnih prolaza.

Ova tehnologija je još uvijek mlada, ali i s mnogo potencijala te bi u skorije vrijeme trebalo doći do raznih specijalizacija unutar konstrukcija bespilotnih letjelica, čime bi se povećala njihova primjena.

9. LITERATURA

- [1] Ancient Origins: <https://www.ancient-origins.net/history-famous-people/steam-powered-pigeon-002179>; Pristupljeno: 2023-06-25
- [2] COVE: <https://editions.covecollective.org/chronologies/archytas-creates-flying-pigeon>; Pristupljeno: 2023-06-26
- [3] Jarnot, C., History. U: *Introduction to unmanned aircraft systems* (ur: Barnhart, R. K., Hottman, S. B., Marshall, D. M. & Shappee, E.), 1-16. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [4] Alvaro Cassinelli: Researcher, Inventor, Teacher & New Media Artist: <https://alvarocassinelli.com/aerodynamics-of-leonardo-da-vincis-aerial-screw/>; Pristupljeno: 2023-06-25
- [5] Leonardo Da Vinci Inventions: <https://www.da-vinci-inventions.com/>; Pristupljeno: 2023-06-25
- [6] Remote Piloted Aerial Vehicles : An Anthology: https://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html#Beginnings; Pristupljeno: 2023-07-02
- [7] Večernji list – vojna povijest: <https://vojnepovijest.vecernji.hr/vojna-povijest/prvo-bombardiranje-iz-zraka-u-povijesti-978547>; Pristupljeno: 2023-07-02
- [8] Italy On This Day - <https://www.italyonthisday.com/2017/08/historys-first-air-raid-Venice-Republic-of-San-Marco-Austria.html>; Pristupljeno: 2023-07-02
- [9] Guinness World Records: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/385422-first-remote-controlled-rc-aircraft>; Pristupljeno: 2023-07-02
- [10] First Aero Squadron Foundation: <https://firstaerosquadron.com/tag/fairy-queen/>; Pristupljeno: 2023-07-02

- [11] FLYING, How Were Drones Used During WWI and WWII?:
<https://www.flyingmag.com/how-were-drones-used-during-wwi-and-wwii/>;
Pristupljeno: 2023-07-02
- [12] Popular Mechanics:
<https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a28312/wwii-drone-strike-tdr-1/>; Pristupljeno: 2023-07-02
- [13] Olivia Nunez - <https://olivianunez.com/2017/04/30/first-blog-post/>: Pristupljeno: 2023-07-02
- [14] Kreis, J. F., Unmanned Aircraft in Israeli Air Operations. *Air Power History*, 37(4): 46-50, 1990.
- [15] Federal Aviation Administration: <https://www.faa.gov/uas/resources/timeline>;
Pristupljeno: 2023-07-02
- [16] Uvod u projektiranje zrakoplova:
http://titan.fsb.hr/~pprebeg/osnzrak/podloge/2_Uvod_u_projektiranje_zrakoplova.pdf;
Pristupljeno: 2023-07-09
- [17] Futurism - <https://futurism.com/the-byte/ultra-safe-hybrid-aircraft-cross-between-plane-blimp>; Pristupljeno: 2023-07-09
- [18] JOUAV unmanned aircraft system: <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html#:~:text=to%20drone%20range-.Types%20of%20drones%20according%20to%20drone%20range,%2Drange%2C%20and%20long%20range>; Pristupljeno: 2023-07-09
- [19] Drone from China - <https://www.dronefromchina.com/product/products-6-2.html>;
Pristupljeno: 2023-07-25
- [20] UAV system international - <https://uavsystemsinternational.com/products/skywalker-drone>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [21] The defense post - <https://www.thedefensepost.com/2022/03/25/israeli-armed-unmanned-copter/>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [22] Unmanned system technology:
<https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/sky-drones/skylane-vtol-drone-platform/>; Pristupljeno: 2023-07-25

- [23] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H, Li, Y., Alsharif, M. H. & Khan, M. A., Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16: 109–137, 2023.
- [24] Arjomandi, M., *Classification of Unmanned Aerial Vehicles*. The University of Adelaide, 2007.
- [25] Azoro robotics - <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=373>;
Pristupljeno: 2023-07-25
- [26] Jouav - <https://www.jouav.com/blog/heavy-lift-drone.html>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [27] Youtube - <https://www.youtube.com/watch?v=bzv8pPGfSI8>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [28] Brungardt, J., Unmanned Aircraft System Elements. U: *Introduction to unmanned aircraft systems* (ur: Barnhart, R. K., Hottman, S. B., Marshall, D. M. & Shappee, E.), 17-28. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [29] Computer world - <https://www.computerworld.com/article/3020352/inside-tomorrows-mobile-drone-command-post.html>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [30] UAV Navigation: <https://www.uavnavigation.com/company/blog/uav-navigation-depth-external-datalink-selection> ; Pristupljeno: 2023-07-25
- [31] Raconueur: <https://www.raconteur.net/manufacturing/drone-potential-manufacturing> ; Pristupljeno: 2023-07-25
- [32] LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/how-can-drones-used-manufacturing-simon-jones#:~:text=Drones%20In%20Manufacturing%20Can%20Save,scanning%20RFID%20chips%20or%20barcodes>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [33] Maghazei, O. & Netland, T. H., Drones in Manufacturing: Exploring Opportunities for Research and Practice. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(6): 1237-1259, 2019.
- [34] Viper Drones: <https://viper-drones.com/industries/infrastructure-drone-use/manufacturing/#:~:text=By%20utilizing%20drone%20technology%2C%20manufacturers,and%20optimize%20the%20manufacturing%20process>; Pristupljeno: 2023-07-25

- [35] Warehouse1: <https://www.wh1.com/warehouse-square-footage-tips/>; Pristupljeno: 2023-07-25
- [36] Damotech: <https://www.damotech.com/blog/top-10-largest-warehouses-in-north-america>; Pristupljeno: 2023-08-05
- [37] Wasp Barcode Technologies: <https://www.waspbarcode.com/buzz/drones-are-warehouse-assistants>; Pristupljeno: 2023-08-05
- [38] Newcastle Systems: <https://www.newcastlesys.com/blog/exploring-drone-implementation-in-the-warehouse-industry#:~:text=Instead%20of%20having%20workers%20go,out%20of%20stock%20or%20missing.> ; Pristupljeno: 2023-08-05
- [39] SRK Innovation: <https://www.srkinnovations.com/blogs/blog/how-rfid-can-be-used-in-warehouse-with-the-help-of-the-drone>; Pristupljeno: 2023-08-05
- [40] Companik, E., Gravier, M. J. & Farris II, M. T., Feasibility of Warehouse Drone Adoption and Implementation. *Journal of Transportation Management*, 28(2): 31-48, 2018.
- [41] Tubis, A. A, Ryczyński, J. & Zurek, A., Risk Assessment for the Use of Drones in Warehouse Operations in the First Phase of Introducing the Service to the Market. *Sensors*, 21(20): 1-26, 2021.
- [42] Reuters: <https://www.reuters.com/article/us-wal-mart-drones-idUSKCN0YO26M>; Pristupljeno: 2023-08-05
- [43] MIT News: <https://news.mit.edu/2017/drones-relay-rfid-signals-inventory-control-0825>; Pristupljeno: 2023-08-15
- [44] The Verge: <https://www.theverge.com/2017/9/2/16217302/mit-drones-billion-dollar-problem-inventory-rfid-tags>; Pristupljeno: 2023-08-25
- [45] CNBC: <https://www.cnbc.com/video/2023/02/06/chinese-drone-maker-dji-dominates-market-despite-us-blacklist.html>; Pristupljeno: 2023-09-10
- [46] DJI: <https://www.dji.com/at/products/comparison-consumer-drones>; Pristupljeno: 2023-09-10
- [47] RFID Journal: <https://www.rfidjournal.com/faq/how-much-do-rfid-readers-cost-today#:~:text=A%20low%2Dfrequency%20reader%20model,reader%20can%20be%20about%20%24500>; Pristupljeno: 2023-09-10

- [48] Szalanczi-Orban, V., Use of Drones in Logistics: Options in Inventory Control Systems. *Interdisciplinary Description of Complex Systems : INDECS*, 20(3): 295-303, 2022.
- [49] Direct Industry: <https://www.directindustry.com/prod/cat-lift-trucks/product-19272-2508138.html>; Pristupljeno: 2023-09-10
- [50] Opetuk, T., *Tehnička logistika*. PowerPoint prezentacija - Sveučilište u zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Laboratorij za logistiku, 2022./2023.
- [51] Moja Plaća: <https://www.mojaplaca.hr/en/salaryinfo/transport-haulage-logistics/warehouseman>; Pristupljeno: 2023-09-10
- [52] Ristov, P., Mrvica, A., Komadina, P. & Tomas, V., Informacijski sustav podržan RFID tehnologijom u procesu prodaje i kontrole karata u brodskom putničkom prometu. *NAŠE MORE : znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 62(1): 8-15, 2015.
- [53] Pašagić Škrinjar, J., Škorput, P. & Furdić, M., Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistic Processes. U: *New Technologies, Development and Application - 4th International Conference* (ur: Karabegović, I., Haznadar, Z. & Pašić, S.), 359–366. Sarajevo, 2018
- [54] Champion, M., Ranganathan, P. & Faruque, S., *A Review and Future Directions of UAV Swarm Communication Architectures*. Conference: 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)
- [55] University of Houston: <https://uh.edu/news-events/stories/2023/june-2023/06052023-becker-drone-swarms-control.php>; Pristupljeno: 2023-09-12
- [56] CNBC: <https://www.cnbc.com/2023/05/18/amazons-100-drone-deliveries-puts-prime-air-behind-google-and-walmart.html>; Pristupljeno: 2023-09-12