

# Uporaba besposadnih letjelica za mjerenje emisija

---

**Herman, Blanka**

**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:235:919872>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-04**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Blanka Herman**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

## Uporaba besposadnih letjelica za mjerjenje emisija

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Blanka Herman

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Luliću na pomoći, savjetima i prenesenom znanju tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili potpora tijekom studija.

Blanka Herman



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Blanka Herman**

Mat. br.: 0035220940

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Uporaba besposadnih letjelica za mjerenje emisija**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Unmanned aerial vehicles for emissions measurement**

Opis zadatka:

Korištenje besposadnih letjelica za identifikaciju raznih izvora onečišćenja zraka još uvijek je u ranoj fazi razvoja i područje je s intenzivnim razvojem kako letjelica tako i senzora. Unatoč tome, može se reći da se s opravdanjem može očekivati da će takva tehnologija u relativno kratkom vremenskom roku postati i ponuditi upotrebljive uređaje za nezahtjevne, relativno jeftine i učinkovite metode prvo za procjenu, a kasnije i mjerenje pojedinih izvora onečišćenja zraka.

U okviru završnog rada treba:

- izraditi kratki pregled utjecaja pojedinih emisija na ljudsko zdravlje;
- izraditi pregled dostupnih literaturnih izvora o besposadnim letjelicama za mjerenje emisija iz zraka i o metodama za beskontaktno određivanje emisija.
- izraditi pregled vrsta besposadnih (bespilotnih) letjelica;
- za odabrane modele izraditi pregled karakterističnih veličina kao što su geometrijske mjere, masa letjelice, vrsta pogona, vrijeme leta, kapaciteti nosivosti za mjernu opremu;
- proučiti i ocijeniti utjecaj konfiguracije letjelice na nosivost, dolet i trajnost leta (*heli, quad, fixed wing*);
- proučiti i izraditi pregled metoda za mjerenja iz zraka (engl. *remote sensing*);

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2022.

Datum predaje rada:

**1. rok:** 20. veljače 2023.  
**2. rok (izvanredni):** 10. srpnja 2023.  
**3. rok:** 18. rujna 2023.

Predvideni datumi obrane:

**1. rok:** 27. 2. – 3. 3. 2023.  
**2. rok (izvanredni):** 14. 7. 2023.  
**3. rok:** 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

## SADRŽAJ

Sadržaj.....	I
Popis slika .....	III
Popis tablica .....	V
Popis oznaka.....	VI
Sažetak .....	VII
Summary .....	VIII
1. Uvod.....	1
2. Utjecaj pojedinih emisija na ljudsko zdravlje.....	2
3. Marpol konvencija – Prilog VI – Sprječavanje onečišćenja zraka s brodova .....	8
4. Pregled vrsta besposadnih letjelica .....	11
4.1.  Bespilotne letjelice s više rotora.....	12
4.2.  Besposadne letjelice s fiksnim krilima .....	12
4.3.  Besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom.....	13
4.4.  Hibridne besposadne letjelice.....	14
4.5.  Primjeri besposadnih letjelica za mjerenje emisija .....	15
4.5.1.  Staaker besposadna letjelica s više rotora tvrtke Nordic Unmanned .....	15
4.5.2.  FX2 besposadna letjelica s fiksnim krilima tvrtke Flylogix .....	17
4.5.3.  CAMCOPTER S-100 besposadna letjelica s jednim glavnim rotorom tvrtke Nordic Unamned sa sensorima tvrtke Explicit .....	19
4.5.4.  Harara besposadna hibridna letjelica tvrtke Air Q .....	23
4.5.5.  Usporedba besposadnih letjelica za mjerenje emisija .....	26
5.  Metode mjerenja iz zraka (engl. <i>remote sensing</i> ).....	27
5.1.  Aktivni senzori .....	28
5.1.1.  Radar .....	29
5.1.2.  Lidar .....	30

---

5.1.3.	Sonar.....	31
5.1.4.	NDIR senzori za mjerenje emisija .....	33
5.1.5.	Uređaj za mjerenje emisija EDAR .....	35
5.2.	Pasivni senzori.....	39
5.2.1.	RGB senzori .....	40
5.2.2.	Multispektralni senzori.....	41
5.2.3.	Hiperspektralni senzori .....	42
5.2.3.1.	The Hyper-Cam .....	43
5.2.3.2.	Sateliti za hiperspektralno snimanje emisija.....	45
5.2.4.	Toplinski senzori .....	46
6.	Zaključak .....	47
7.	Literatura.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz razlike između imisije i emisije [2].....	1
Slika 2. Prikaz tvari koje najčešće onečišćuju zrak te načini na koje iste dolaze u zrak [4].....	2
Slika 6. Područja trenutne kontrole emisija uz oznake mogućih budućih [15].....	9
Slika 7. Postotna ograničenja sumpora u gorivu kroz godine [17] .....	9
Slika 8. Dopuštene granice emisije dušikovih oksida prema konvenciji MARPOL-Prilogu VI [17] .....	10
Slika 9. Primjer bespilotne letjelice s više rotora - Mavic Pro Platinum tvrtke DJI [19].....	12
Slika 10. Primjer besposadne letjelice s fiksnim krilima - Firebird FPV tvrtke Yuneec [20]..	13
Slika 11. Primjer besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom – Alpha 800 tvrtke Alpha Unmanned Systems [21] .....	13
Slika 12. Primjer hibridne besposadne letjelice - CW-25E tvrtke JOUAV [22].....	14
Slika 13. Besposadna višerotorna letjelica Staaker [23] .....	15
Slika 14. Besposadna letjelica s fiksnim krilima FX2 tvrtke Flylogix [24].....	17
Slika 15. “Mini sniffer” sensor tvrtke Explicit [26] .....	21
Slika 16. Konfiguracija senzorskog i kargo modula [27].....	23
Slika 17. Način rada gimbal stabilizatora [27] .....	24
Slika 18. AirQ M-Ground Control System [27].....	24
Slika 19. Spektar elektromagnetskih valova i njihova primjena [29] .....	27
Slika 20. Aktivni sensor [30].....	28
Slika 21. Radar [33] .....	30
Slika 22. Lidarski podaci prikupljeni korištenjem NOAA istraživačkog zrakoplova - svjetionik Loggerhead Key, Dry Tortugas, Florida [35].....	31
Slika 23. Vizualni prikaz načina na koji sonar radi [36].....	32
Slika 24. Shema fotoakustičnog zračnog sonarnog sustava [37] .....	33
Slika 25. Slikovni prikaz načina rada NDIR CO2 senzora [38].....	34
Slika 26. Srednji infracrveni apsorpcijski spektri nekih plinova [39].....	34
Slika 27. Princip rada EDAR-a [40].....	35
Slika 28. Razlike između EDAR-a i NDIR senzora za mjerenje emisija [40].....	36
Slika 29. Primjer izmjerenih podataka pomoću EDAR-a [40].....	37
Slika 30. Shema rada EDAR-a [41] .....	38
Slika 31. Shema svjetlosnog snopa s karakterističnim veličinama [41] .....	39
Slika 32. Pasivni senzor [42].....	40
Slika 33. Primjeri prostorne razlučivosti [44] .....	41
Slika 34. Raspon valnih duljina vidljive svjetlosti i infracrvenog zračenja [45] .....	42
Slika 35. Slika šume dobivena RGB, multispektralnim i hiperspektralnim senzorom [46] .....	43



---

Slika 36. Snimka emisija metana iz jezera pomoću hiperspektralne kamere Hyper-Cam [47]	44
Slika 37. Hiperspektralna kamera Hyper-Cam Airborne Mini [47].....	44
Slika 38. Shema GESat satelita tvrtke Absolut Sensing [48].....	45
Slika 39. Divlje svinje snimljenje toplinskim senzorom [50] .....	46

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice Staaker tvrtke Nordic Unmanned [23].....	16
Tablica 2. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice FX2 tvrtke Flylogix [24] ...	18
Tablica 3. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice CAMCOPTER S-100 tvrtke Nordic Unmanned [23].....	20
Tablica 4. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice Harara tvrtke Air Q [27] ....	25
Tablica 5. Usporedba određenih pokazatelja performansi besposadnih letjelica za mjerenje emisija .....	26

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$D$	-	član raspada
$K$	m	konstanta pretvorbe
$Q$	$\text{g/m}^3$	koncentracija onečišćujuće tvari
$U_s$	m/s	brzina vjetra na izlazu iz dimnjaka
$V$	-	vertikalni član
$x$	m	horizontalna nizstrujna udaljenost od središnjice dima
$y$	m	horizontalna bočna udaljenost od središnjice dima
$z$	m	vertikalna udaljenost od središnjice dima
$\lambda$	$\mu\text{m/m}^3$	koncentracija onečišćenja
$\sigma_y$	-	standardna devijacija horizontalne disperzije
$\sigma_z$	-	standardna devijacija vertikalne disperzije
$R$	m	udaljenost između radarske antene i objekta promatranja
$c$	m/s	brzina svjetlosti
$t$	s	vrijeme potrebno da se poslani impuls vrati do antene
$w_i$	m	efektivna širina svakog reflektiranog snopa svjetlosti
$\Theta_i$	rad	kut svjetlosnog snopa u odnosu na smjer okomit na površinu ceste
$r_i$	m	udaljenost između izvora svjetlosti i vrha oblaka ispušnih plinova
$l$	m	debljina oblaka ispušnih plinova (odgovara visini stražnjeg dijela vozila)
$E$	$\text{W/m}^2$	maksimalna brzina zračenja
$\sigma$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$T$	K	temperatura objekta

## SAŽETAK

Izloženost onečišćenom zraku postaje sve veći uzročnik bolesti i razlog prijevremenih smrti u svijetu pa činjenica da se svakodnevno razvijaju i usavršavaju metode mjerenja emisija onečišćujućih tvari nije iznenađujuća. Cilj ovog rada jest proučiti i približiti danas najmoderniju tehnologiju mjerenja onečišćujućih tvari – besposadne letjelice. Zbog svoje učinkovitosti, brzine prikupljanja podataka i fleksibilnosti u integraciji više različitih senzora, besposadne letjelice omogućuju mjerenje s visokom rezolucijom čak i na čovjeku nepristupačnim mjestima. Rad daje uvid u vrste besposadnih letjelica kao i najčešće korištenih senzora koji metodom daljinskog istraživanja (engl. *remote sensing*) omogućuju prikupljanje traženih informacija od kojih je jedna i koncentracija prisutnih ispušnih plinova u atmosferi.

Ključne riječi: emisije, besposadne letjelice, senzori, daljinsko istraživanje

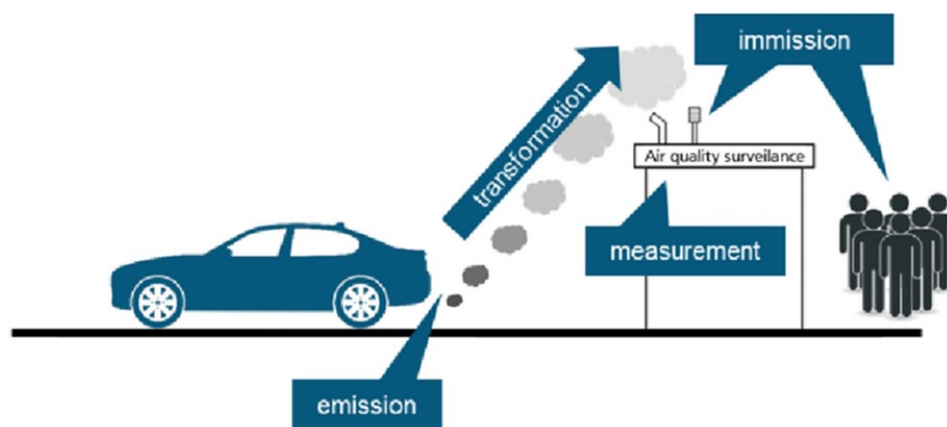
## SUMMARY

Exposure to contaminated air is becoming an increasing cause of diseases and the reason for premature deaths in the world, so the fact that methods for emission measurement are being developed and perfected every day is not surprising. The purpose of this work is to study and bring closer the most modern technology for measuring pollutants – unmanned aerial vehicles. Due to their efficiency, speed of data collection and flexibility in the integration of multiple sensors, unmanned aerial vehicles provide measurements with high resolution even in places inaccessible to humans. The work gives an insight into the types of unmanned aerial vehicles as well as the most commonly used sensors that enable the collection of required information through the method of remote sensing, one of which is the amount of exhaust gases present in the atmosphere.

Keywords: emissions, unmanned aerial vehicles, sensors, remote sensing

## 1. UVOD

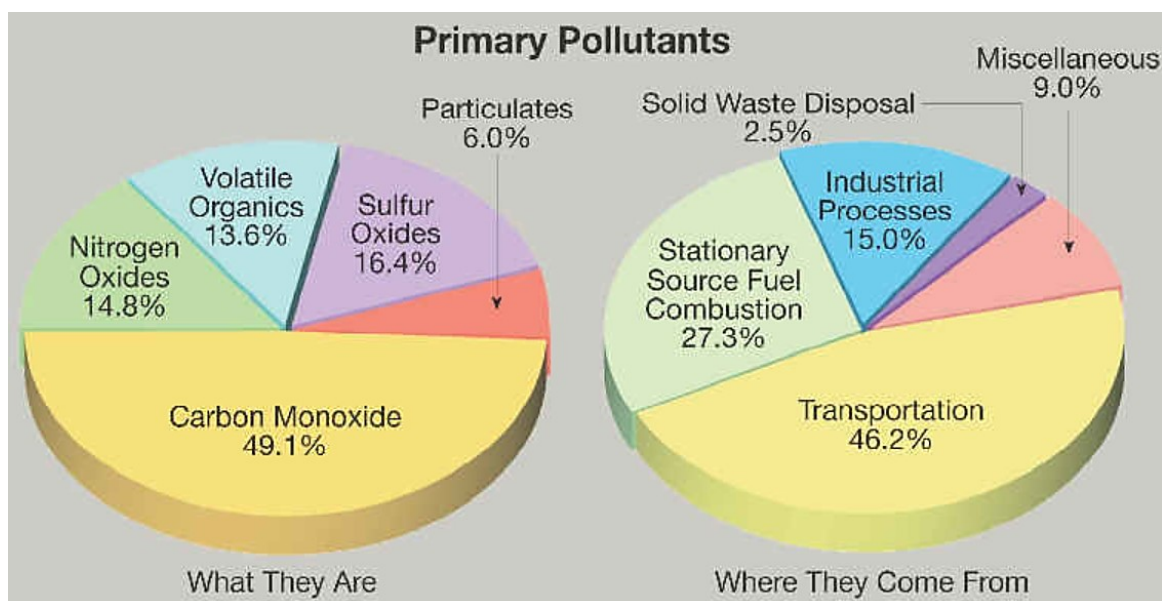
Pod pojmom onečišćenja zraka podrazumijevamo onečišćenje okoliša bilo kojim fizičkim, kemijskim ili biološkim sredstvom koje utječe na promjenu prirodne karakteristike atmosfere. Onečišćenje zraka stoji kao jedno od najvećih ekoloških rizika za zdravlje ljudi, što potvrđuju podaci WHO-a iz 2019. godine koji govore da je 99 % svjetske populacije izloženo zraku u kojem onečišćenje premašuje preporučene granične vrijednosti Svjetske zdravstvene organizacije. Procjenjuje se da je upravo taj problem bio zaslužan za 4,2 milijuna prijevremenih smrti diljem cijelog svijeta. [1] Isto tako, kvaliteta zraka povezana je s klimom i ekosustavima na Zemlji. Jedan od značajnijih uzročnika onečišćenja zraka jest promet, kojeg još uvijek karakterizira izgaranje goriva fosilnog podrijetla. Izloženost bilo kojoj vrsti prometa koja pridonosi onečišćenju u današnje vrijeme jest neizbježna, pa makar i u malim sredinama, gdje je osobni automobil praktički dio svakog kućanstva. Onečišćujuće tvari koje ispuštaju vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem u određenoj količini, izraženoj u g/km, g/h ili g/kWh, vežu se uz pojam emisije. Tijekom vremena, one se miješaju s okolnim zrakom i budu razrijeđene zbog prostornog širenja te naposljetku dopiru do dišnih puteva ljudi u raznim koncentracijama, što označava imisiju, izraženu u g/m<sup>3</sup>. [2] (Slika 1.) Iako postoje razne metode za mjerenje koncentracije i disperzije onečišćujućih tvari, poput stacionarnih nadzornih postaja, s većinom njih mjerenje se izvodi pri tlu. Kako razni faktori utječu na prijenos onečišćujućih tvari u atmosferu, poput brzine i smjera vjeta, vlažnosti zraka, topografije i sl., potreban je uređaj koji će mjerenje moći izvoditi na mjestima udaljenijima od samih prometnica, budući da imisije značajno opadaju s udaljenošću od nekoliko stotina metara od cesta. [3] Zato sve veću ulogu u mjerenjima imaju besposadne letjelice opremljene odgovarajućim mjernim sensorima jer je rad s njima fleksibilniji, jednostavniji, brži, a i učinkovitiji, budući da se mjerenja mogu izvoditi i na nepristupačnim mjestima. Takve letjelice omogućuju mjerenja s visokom rezolucijom, imaju dobru sposobnost manevriranja jer se mogu kretati i horizontalno i vertikalno te zadržavanja pozicije čak i u uvjetima jakog vjeta.



Slika 1. Prikaz razlike između imisije i emisije [2]

## 2. UTJECAJ POJEDINIH EMISIJA NA LJUDSKO ZDRAVLJE

Svakodnevni razvoj različitih grana industrije zahtjeva veliku potrošnju energije, koja se još uvijek u velikoj mjeri dobiva iz goriva fosilnog podrijetla, što vodi do neželjene posljedice za ljudsku rasu i okoliš – povećanja emisija ispušnih plinova, a time i onečišćenja zraka. Onečišćenje je i jedan od glavnih razloga gubitka biološke raznolikosti. Oštećuje okoliš i ekosustave prekomjernim onečišćenjem dušikovim oksidima i kiselim kišama te smanjuje sposobnosti ekosustava za sekvestracijom ugljika<sup>1</sup>. [4] Osim toga, utječe i na zdravlje ljudi. Uzrokuje kardiovaskularne i respiratorne bolesti poput astme, bronhitisa i raka pluća. Među tvarima koje onečišćuju zrak, u najvećoj mjeri prisutni su ugljikovi i dušikovi oksidi, aromatski ugljikovodici, lebdeće čestice te metan. (Slika 2.)



Slika 2. Prikaz tvari koje najčešće onečišćuju zrak te načini na koje iste dolaze u zrak [4]

Ugljikov monoksid otrovan je plin bez boje, okusa i mirisa koji nastaje kod nepotpunog izgaranja zbog manjka prisutnosti kisika. Smanjuje sposobnost hemoglobina da prenosi kisik jer ima 300 puta veći afinitet vezanju s hemoglobinom od njega što dovodi do oštećenja organa kojima je potrebna veća količina kisika poput srca i mozga. Uzrokuje glavobolje, mučnine, a pri visokim vrijednostima karboksihemoglobina (COHb) može uslijediti i smrt. Negativno utječe i na okoliš povećavajući količinu stakleničkih plinova jer reagira u atmosferi i nastaje

<sup>1</sup> sekvestracija ugljika – postupak uklanjanja ugljikovog dioksida iz atmosfere (npr. procesom fotosinteze)

CO<sub>2</sub>. Ugljikov dioksid ima vrlo važnu ulogu u metabolizmu. Iako neotrovan, u prevelikoj količini ima štetan utjecaj na ljude i okoliš i jedan je od glavnih uzročnika efekta staklenika.

Dušikov dioksid također je otrovan plin koji doprinosi nastanku kiselih kiša i smoga. U reakciji s vodom prema jednadžbi  $2 \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{HNO}_3$  nastaju dušikasta i dušična kiselina koje imaju štetno djelovanje na okoliš. Navedene kiseline, zajedno sa sumpornom i ugljičnom, otapaju hranjive tvari, oštećuju korijenje stabala i dospijevaju u lišća te oštećuju njihova tkiva. [5] Istovremena izloženost dušikovom dioksidu i ugljikovom monoksidu može biti smrtonosna jer oba sprječavaju disanje na različitim način: CO zbog većeg afiniteta prema hemoglobinu od kisika, dok NO<sub>2</sub> izaziva edem pluća. Smatra se vodećim uzročnikom karcinoma pluća. [6]

U aromatske ugljikovodike, hlapljive organske spojeve koji su pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku bezbojne tekućine karakterističnog mirisa, ubrajamo benzen, toluen i ksilen. U prirodi se pojavljuju kao sastojci nafte i njezinih derivata pa tako i u ispušnim plinovima motornih vozila. U organizam ulaze preko pluća, probavnog sustava i kože, ali je inhalacija najvažniji i najčešći put unosa. Kratkotrajna izloženost izaziva glavobolju, mučninu, nadraživost očiju i dišnih puteva, dok dugotrajna izloženost uzrokuje oštećenja jetre, bubrega te središnjeg živčanog sustava, a imaju i kancerogeni utjecaj. Iako suvremeni način života ne dopušta potpuno izbjegavanje njihovog negativnog utjecaja, postoje načini na koje se može smanjiti te kontrolirati njihov unos u organizam – težiti pronalasku spojeva koji su ekološki prihvatljiviji, kad god je to moguće, zamijeniti aromatske ugljikovodike manje toksičnim spojevima, te koristiti odgovarajuća zaštitna sredstva uz provođenje mjera zaštite na radu kako bi se uklonio rizik trovanja. [7]

Lebdeće čestice (engl. *Particulate Matter - PM*) rezultat su požara, vulkanske aktivnosti ili erozije, ali i ljudske aktivnosti poput spaljivanja otpada, industrijskih postrojenja, prerade metala ili izgaranja goriva fosilnog podrijetla. Mogu nastati i u atmosferi kemijskim reakcijama plinova kao što su dušikovi oksidi, sumporov dioksid i organski spojevi. Najprisutnije su fine (PM<sub>2,5</sub>) s promjerom manjim od 2,5 μm te grube (PM<sub>10</sub>), čiji je promjer između 2,5 i 10 μm. Čestice PM<sub>2,5</sub> ulaze dublje u pluća gdje se talože i ulaze u krvotok, uzrokujući bronhitis ili astmu, dok one taložene na površini pluća uzrokuju oštećenje tkiva ili upalu pluća. PM<sub>10</sub> čestice zadržavaju u gornjim dišnim putevima izazivajući iritaciju i kašalj. [8]

Metan je glavna komponenta zemnog plina i snažan staklenički plin. Nazivan je i močvarnim plinom budući da nastaje u barama gdje trunu organske tvari. Oslobađa se i u rudnicima ugljena gdje miješanjem sa zrakom stvara eksplozivne smjese koje mogu uzrokovati razorne eksplozije. Kao drugi najzastupljeniji staklenički plin na Zemlji nakon ugljikovog dioksida, metan je relativno kratkotrajan, no ima mnogo veću ulogu u zagrijavanju planeta. U razdoblju od 20

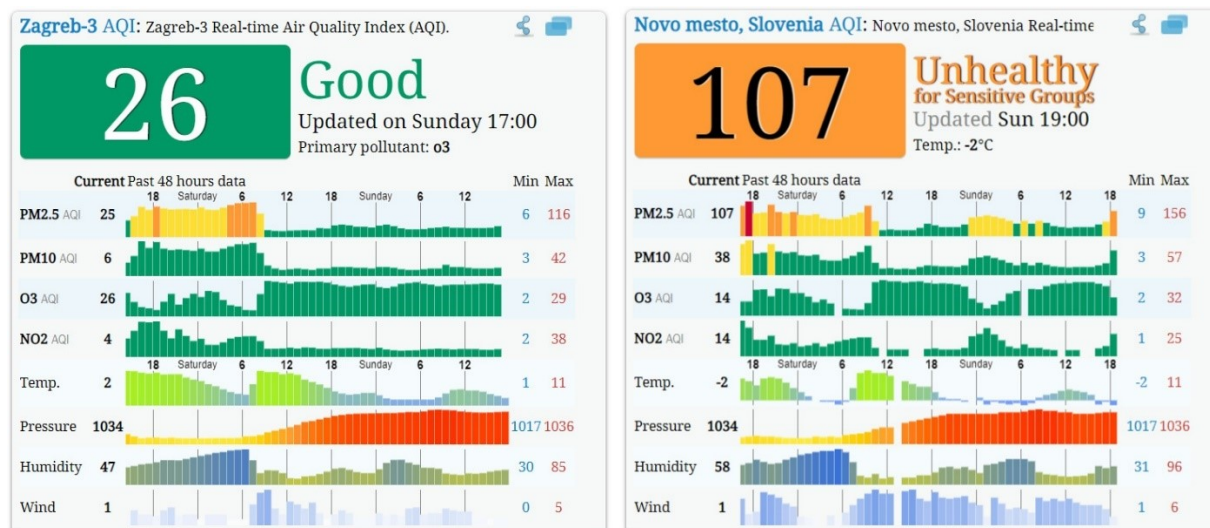


godina, metan je 80 puta snažniji u zagrijavanju Zemlje od ugljikovog dioksida. Veliko obilje metana čini ga vrlo korisnim gorivom. Ipak, jer je metan plin, kod standardnog tlaka i temperature, teško ga je prevesti od nalazišta pa se uglavnom prevozi LNG brodovima, koji ga prevoze kao ukapljenog zemnog plina. Koncentracije metana u atmosferi porasle su kao rezultat ljudskih aktivnosti, uključujući uzgoja stoke, rudarenja ugljenom, proizvodnje i distribucije nafte i plina. Iako metan ne uzrokuje izravnu štetu ljudskom zdravlju, pridonosi stvaranju ozona i onečišćenju česticama što oštećuje dišne puteve, uzrokuje napade astme, kardiovaskularne bolesti te povećava rizik o moždanog udara. [9]

Zbog svega navedenog, ključno je pratiti izvore onečišćenja i količinu štetnih ispušnih plinova koje isti prouzrokuju kako bi se situacija regulirala i usporilo globalno zatopljenje s kojim se suočavamo. Zato Europska unija provodi akcijski plan „Prema nultom onečišćenju zraka, vode i tla“ s ciljem poboljšanja kvalitete zraka, zaštite okoliša i zdravlja ljudi. Na slici 3. prikazan je raspon vrijednosti indeksa na temelju preporučenih graničnih vrijednosti onečišćujućih tvari izraženih u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Indeks kvalitete zraka je relativna mjera onečišćenja zraka, a kolika će njegova vrijednost biti, ovisi o koncentraciji onečišćujućih tvari u zraku. [10] Pomoću internetske stranice World Air Quality Index, kineskog projekta sa sjedištem u Pekingu koji pruža informacije o kvaliteti zraka za više od 130 zemalja, pokrivajući više od 30.000 postaja u 2000 velikih gradova, napravljena je usporedba o kvaliteti zraka dvaju gradova. Za primjer uzeti su gradovi Zagreb i Novo Mesto međusobno udaljeni manje od 100 km. AQI (engl. *Air Quality Index*) govori da je kvaliteta zraka u Zagrebu zadovoljavajuća, dok je u Novom Mestu nezdrava za rizične skupine. (Slika 4.)

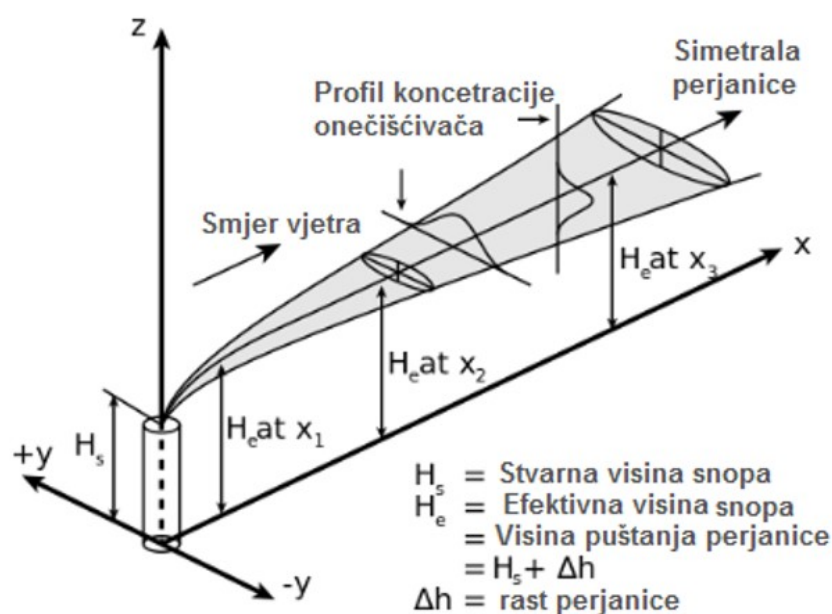
ONEČIŠĆENJE	RASPON VRIJEDNOSTI INDEKSA	KONCENTRACIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI (µg/m3)							
		NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>		O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>		CO	SO <sub>2</sub>
		1 sat	1 sat	24 sata	1 sat	1 sat	24 sata	8-satna	1 sat
<b>VRLO VISOKO</b>	>100	>400	>180	>100	>240	>110	>60	>20000	>500
<b>VISOKO</b>	100	400	180	100	240	110	60	20000	500
	75	200	90	50	180	55	30	10000	350
<b>SREDNJE</b>	75	200	90	50	180	55	30	10000	350
	50	100	50	30	120	30	20	7500	100
<b>NISKO</b>	50	100	50	30	120	30	20	7500	100
	25	50	25	15	60	15	10	5000	50
<b>VRLO NISKO</b>	25	50	25	15	60	15	10	5000	50
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 3. Raspon vrijednosti indeksa kvalitete zraka [10]



Slika 4. Usporedba indeksa kvalitete zraka s prikazom koncentracije onečišćujućih tvari u Zagrebu (lijevo) i Novom Mestu (desno) u poslijepodnevним satima 5. veljače 2023. [11]

Jedan od načina procjene razine onečišćenja zraka te utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi jest modeliranje onečišćenja pomoću matematičkih modela. Modeli disperzije su zastupljeniji od drugih metoda jer omogućuju analizu sa specifičnim meteorološkim uvjetima, omogućavajući predviđanje ponašanja i neaktivnost mnogih onečišćujućih tvari u atmosferi. Najčešći takav model je Gaussov model koji se koristi za simulaciju disperzije na temelju osnovne Gaussove distribucije za točkaste izvore i za utvrđivanje stacionarnih prizemnih koncentracija za određeni vremenski trenutak. Kao ulazne podatke koristi informacije o mjestu te meteorološke podatke. Koristi se kod točkastih izvora poput tvorničkog dimnjaka ili linearnih emisija kao onih uzrokovanih prometom. Kao što slika 5. prikazuje, središte koordinatnog sustava Gaussovog modela disperzije postavljeno je u polaznu točku izvora koji emitira onečišćujuće tvari. Os  $x$  je u smjeru vjetra, dok je os  $y$  okomita na njegov smjer. Raspodjela koncentracije varira u skladu s normalnom raspodjelom oko središnje osi u horizontalnom i vertikalnom pravcu.



Slika 5. Prikaz Gaussovog modela disperzije [10]

Kako bi se odredile prizemne koncentracije onečišćujućih tvari, potrebno je odabrati veličinu domene i gustoću receptorskih točaka. Odgovarajuća domena određuje se tako da se pomoću izmjerenih emisija onečišćujućih tvari iz izvora te meteoroloških podataka iz najbliže meteorološke postaje izvrše simulacije za prethodne godine i utvrdi područje unutar kojeg su prizemne koncentracije onečišćujućih tvari iznad godišnjih graničnih vrijednosti za zaštitu ljudi i ekosustava. Koncentracija onečišćujuće tvari na udaljenosti  $(x, y)$  od izvora može se izračunati preko formule [12]:

$$\lambda = \frac{Q K V D}{2 \pi U_s \sigma_y \sigma_z} \times e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2}$$

gdje je:

$\lambda$  – koncentracija onečišćenja ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$  - koncentracija onečišćujuće tvari ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$K$  - konstanta pretvorbe (m)

$V$  - vertikalni član

$D$  - član raspada

$U_s$  - brzina vjetra na izlazu iz dimnjaka (m/s)

$\sigma_y$  - standardna devijacija horizontalne disperzije

$\sigma_z$  - standardna devijacija vertikalne disperzije

$x$  - horizontalna nizstrujna udaljenost od središnjice dima (m)

$y$  - horizontalna bočna udaljenost od središnjice dima (m)

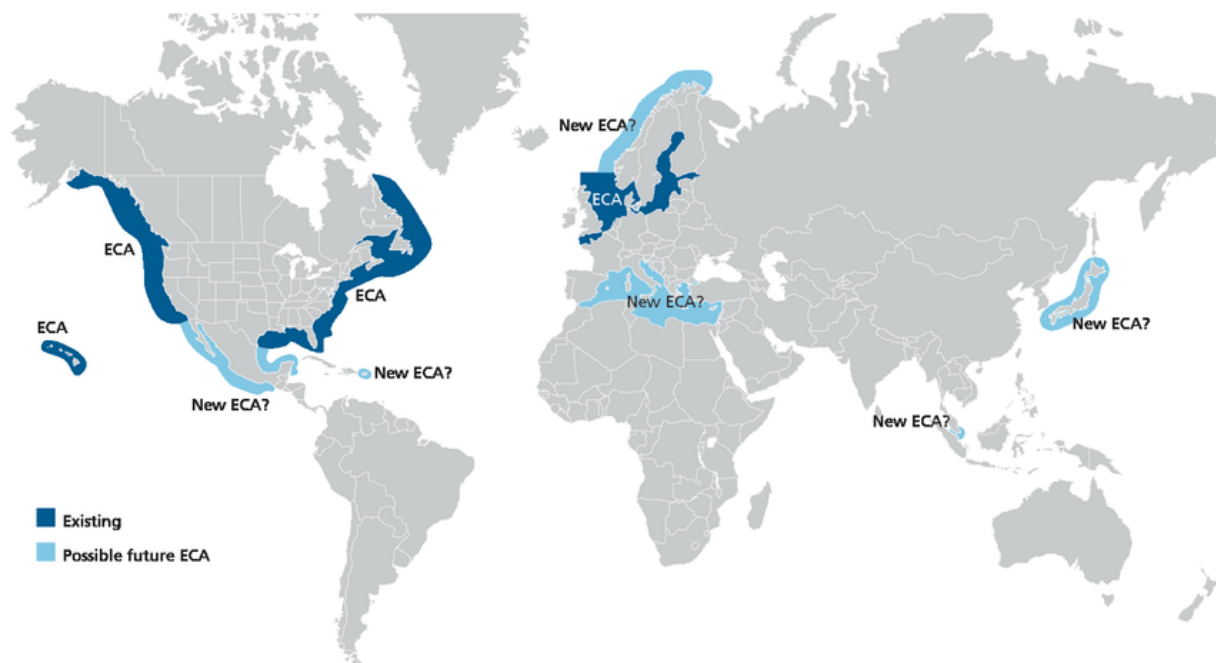
$z$  - vertikalna udaljenost od središnjice dima (m)

Kao korak k rješenju, svakodnevno se radi na razvoju različitih uređaja i metoda pomoću kojih će se moći na brz i jednostavan, ali učinkovit način pratiti i mjeriti pojedini izvori onečišćenja zraka. Jedan od takvih uređaja, koji je ujedno i glavna tema ovog rada, su besposadne letjelice.

### 3. MARPOL KONVENCIJA – PRILOG VI – SPRJEČAVANJE ONEČIŠĆENJA ZRAKA S BRODOVA

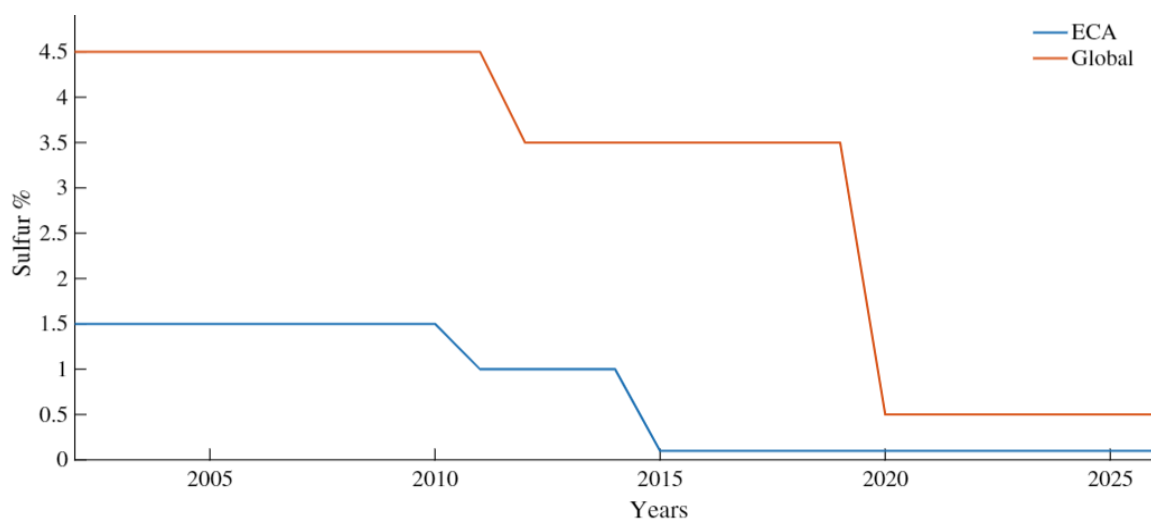
Podaci o izlivanju nafte u more govore da je 8 g nafte dovoljno da onečisti jedan metar kubni mora. Kubni metar ispuštene nafte iscrpljuje kisik iz 400 000 m<sup>3</sup> mora. [13] Iako onečišćenje zraka onečišćujućim tvarima iz brodova nema isti utjecaj kao izlivanje nafte u moru, ono uvelike doprinosi problemu kvalitete zraka s kojim se susreće cijelo stanovništvo, a utječe i na okoliš i životinje, budući da doprinosi nastanku kiselih kiša. Upravo radi toga osnovana je Međunarodna pomorska organizacija – IMO pod okriljem koje je donesena i MARPOL konvencija (skraćenica za onečišćenje mora, engl. *marine pollution*). Prilog VI MARPOL konvencije, pod naslovom Sprječavanje onečišćenja zraka s brodova, stupio je na snagu 19. svibnja 2005. godine. [14] Ograničava glavne onečišćivače zraka sadržane u ispušnim plinovima brodova, poput sumporovih i dušikovih oksida, zabranjuje emisije tvari koje oštećuju ozonski omotač (engl. *Ozone-Depleting Substances – ODS*) poput klorofluorouglijika i hidrokloro-fluoro-ugjikovodika te regulira emisije hlapljivih organskih spojeva iz tankera.

Područja kontrole emisija ECA (engl. *Emission Control Areas – ECA*) mogu se detaljnije podijeliti na SECA područja (engl. *Sulfur Emission Control Areas – SECA*) strože kontrole kontrole emisije sumporovih oksida i NECA područja (engl. *Nitrogen Oxide Emission Control Areas – NECA*) sa strožim mjerama kontrole dušikovih oksida. U SECA područja spadaju Baltičko i Sjeverno more, dok većina obale Kanade i SAD-a, te Karipsko područje, uključujući Portoriko i Američke Djevičanske Otoke spada i u SECA i u NECA područje. (Slika 6.) [15]



Slika 3. Područja trenutne kontrole emisija uz oznake mogućih budućih područja kontrole [15]

Kao što slika 7. prikazuje, jedno od ograničenja koje je stupilo na snagu 1. siječnja 2020. jest smanjenje globalne granice sumpora u gorivu sa 3,50 % na 0,50 %, dok je u SECA područjima u kojima su uspostavljene strože mjere kontrole, ograničenje sumpora u gorivu postavljeno na 0,10 % već od 2015. godine. [16]



Slika 4. Postotna ograničenja sumpora u gorivu kroz godine [17]

Za kontrolu NO<sub>x</sub> postoje 3 različite razine propisa koji se temelje na datumu izgradnje broda, a primjenjuju se za sve brodske motore izlazne snage iznad 130 kW. Kao što je prikazano na slici 8., razina I primjenjuje se za brodove izgrađene nakon 1. siječnja 2000. Propisuje da motori ispod 130 o/min moraju imati ukupno ograničenje emisije dušikovih oksida od 17 g/kWh. Za motore s brojem okretaja između 130 i 1999, primjenjuje se navedena formula u tablici, gdje je n broj okretaja, dok motori s više od 2000 o/min moraju imati ograničenje od 9,8 g/kWh. Analogno vrijedi za ostale dvije razine. [16]

Tier	Effective Date	NO <sub>x</sub> Limit (g/kWh) where, n Is rpm		
		n < 130	130 ≤ n ≤ 2000	n > 2000
Tier 1	2000	17	$45 \times n^{-0.2}$	9.8
Tier 2	2011	14.4	$44 \times n^{-0.2}$	7.7
Tier 3	2016	3.4	$9 \times n^{-0.2}$	1.96

Slika 5. Dopuštene granice emisije dušikovih oksida prema konvenciji MARPOL-Prilogu VI [17]

Upravo je u navedenim ECA područjima potrebno provoditi mjerenje emisija iz brodskih motora kako bi se reguliralo onečišćenje zraka i maksimalno smanjile emisije u spomenutim kritičnim morskim područjima. Kako besposadne letjelice mogu najjednostavnije i najbrže doći do brodova u moru te pomoću ugrađenih senzora omogućiti mjerenje koncentracije onečišćujućih tvari, one su tehnologija koja dominira u mjerenju emisija u SECA i NECA područjima.

## 4. PREGLED VRSTA BESPOSADNIH LETJELICA

Besposadne letjelice mogu se nazvati i letećim robotima koji mogu biti daljinski upravljani ili letjeti autonomno koristeći softverski kontrolirane planove leta u svojim ugrađenim sustavima. Iako su izvorno razvijene za vojne misije koje su bile previše opasne za ljude, s razvojem tehnologije postale su stalni predmet istraživanja jer se svakodnevno pronalazi novo područje u kojem mogu biti korištene i tako uvelike olakšati i ubrzati dosadašnje procese. Koriste se kao instrument za potragu i spašavanje, nadziranje, praćenje prometa, gašenje požara, fotografiranje iz zraka, poljoprivredu, mjerenje emisija, a sve više i za usluge dostave.

Ovisno o namjeni, svaka besposadna letjelica ima svoje dodatke, no osnovne komponente su:

- okvir najčešće napravljen od kompozitnog materijala zbog male mase, a velike čvrstoće
- izvor energije, najčešće litij ionska baterija
- pogonski elektromotor i propeler
- daljinski upravljač koji komunicira s letjelicom putem radio valova
- GPS, akcelerometar (mjeri promjenu brzine), altimetar (mjeri nadmorsku visinu), žiroskop

Postoji više kategorija u koje možemo svrstati besposadne letjelice. Prema njihovoj masi, dijelimo ih na nano (do 250 g), mikro (do 2 kg), male (do 25 kg), srednje (do 150 kg) i velike (više od 150 kg) letjelice. Prema veličini, odnosno rasponu krila, razlikujemo mikro (do 50 cm), male (do 2 m), srednje (do 10 m) i velike (više od 10 m) letjelice. No prema klasifikaciji koja najbolje opisuje njihove konstrukcijske razlike, četiri su glavne kategorije: bespilotne letjelice s više rotora, s fiksnim krilima, s jednim glavnim rotorom te hibridne besposadne letjelice. [18]



#### 4.1. Беспilotne letjelice s više rotora

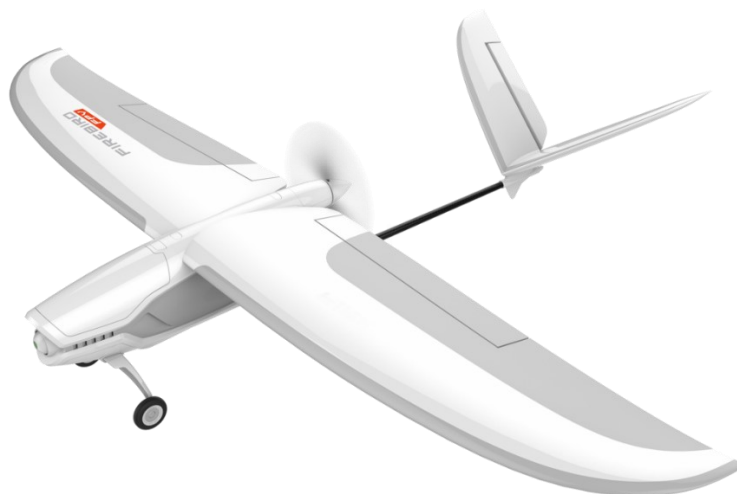
Najraširenije беспilotne letjelice s više rotora su kvadrokopteri, koje sadrže, kako im samo ime govori, 4 rotora, no prisutni su i heksa- i oktokoпртери. Iako se količina korisnog tereta povećava s brojem rotora, to nosi i neke negativne posljedice. Što je više propelera, troši se više energije pa se samim time ograničava vrijeme koje letjelica može provesti u zraku. Prosječno vrijeme leta im je otprilike 20 do 40 minuta. (Slika 9.)



*Slika 6. Primjer беспilotne letjelice s više rotora - Mavic Pro Platinum tvrtke DJI [19]*

#### 4.2. Беспосadne letjelice s fiksnim krilima

Za razliku od onih s više rotora, беспосadne letjelice s fiksnim krilima ne zahtijevaju toliko utroška energije za let zbog svojih krila koja stvaraju aerodinamički uzgon pa mogu letjeti duže. No iz toga proizlazi i nedostatak – ne mogu lebdjeti te zahtijevaju pistu za polijetanje i slijetanje što ih čini kompliciranijima za korištenje, a ujedno su i skuplje od беспilotnih letjelica s više rotora. Najčešće se koriste za misije mapiranja velikih područja zbog duljeg trajanja leta koji prosječno traje između 1 i 2 sata. (Slika 10.)



*Slika 7. Primjer besposadne letjelice s fiksnim krilima - Firebird FPV tvrtke Yuneec [20]*

### **4.3. Besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom**

Besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom vrlo su slične helikopteru jer sadrže rotor na vrhu okvira te reperi rotor za kontrolu smjera. U većini slučajeva pokreću ih motori s unutarnjim izgaranjem pa mogu letjeti duže od besposadnih letjelica s više rotora te mogu prenositi veći korisni teret od onih s fiksnim krilima. Skuplje su od prethodno navedenih letjelica, a i za njihovo korištenje treba proći određenu obuku. (Slika 7.)



*Slika 8. Primjer besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom – Alpha 800 tvrtke Alpha Unmanned Systems [21]*

#### 4.4. Hibridne besposadne letjelice

Hibridne besposadne letjelice kombinacija su onih s više rotora i onih s fiksnim krilima uzimajući najbolje iz oba svijeta. Mogu vertikalno polijetati i slijetati te nositi veći teret i to duže vrijeme od prije spomenutih letjelica. Još su u razdoblju razvoja tako da ih na tržištu nema mnogo. (Slika 12.)



*Slika 9. Primjer hibridne besposadne letjelice - CW-25E tvrtke JOUAV [22]*

## 4.5. Primjeri besposadnih letjelica za mjerenje emisija

### 4.5.1. *Staaker besposadna letjelica s više rotora tvrtke Nordic Unmanned*

Budući da većina velikih transportnih brodova kao gorivo koristi teško plinsko ulje (engl. *heavy fuel oil - HFO*) i time doprinosi emisiji sumporovih i dušikovih oksida, pomorska industrija jedan je od glavnih onečišćivača zraka. Osim rizika od izlivanja nafte, emisije onečišćujućih tvari iz spomenutog goriva navele su Međunarodnu pomorsku organizaciju (IMO) da uvede razna ograničenja, navedena u Prilogu VI MARPOL konvencije, kako bi se ograničio negativan utjecaj pomorskog prometa na kvalitetu zraka, što je stvorilo potrebu za učinkovitim i pouzdanim metodama praćenja emisija na moru. Upravo se time bavi i norveška tvrtka Nordic Unmanned proizvođači besposadne letjelice s više rotora za mjerenje pomorskih emisija.

Jedna od takvih je i višerotorna letjelica Staaker (slika 13.). To je robusna letjelica za mjerenje emisija konstruirana za nordijska okruženja, isprobana i testirana u najtežim klimatskim uvjetima. Sposobna je nositi veliku količinu korisnog tereta i senzora za različite operativne scenarije. Emisije mjeri pomoću naprednog senzora koji koristi infracrvenu kameru što omogućuje snimanje visokokvalitetnih podataka o emisijama iz zraka. [23]



Slika 10. Besposadna višerotorna letjelica Staaker [23]

U tablici 1. naveden je pregled karakterističnih veličina letjelice Staaker.

Tablica 1. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice Staaker tvrtke Nordic Unmanned [23]



<b>DIMENZIJE</b>	Dijagonala: 130 cm (205 cm s propelerima) Visina: 85 cm
<b>MASA</b>	Masa prazne letjelice: 11,5 kg Masa s baterijama: 20 kg Maksimalna masa polijetanja: 25 kg
<b>MASA KORISNOG TERETA</b>	5 kg
<b>KONFIGURACIJA</b>	X8 ( <i>octo-quad</i> ) *
<b>POGON</b>	Baterijski pogon – 32 Ah na 44.4 V za maksimalnu masu polijetanja
<b>BRZINA KRSTARENJA</b>	10 m/s (36 km/h)
<b>MAKSIMALNO TRAJANJE LETA</b>	50 min (brzinom krstarenja bez tereta)
<b>TEMPERATURNI RASPON U KOJEM MOŽE LETJETI</b>	- 10 °C to 35 °C
<b>VREMENSKA OGRANIČENJA</b>	Otporna na vodu, no ne smije se koristiti u slučaju jake kiše, tuče ili oluje
<b>CIJENA</b>	~ 85 000 €

\*Konfiguracija X8, često nazvana i *octo-quad*, slična je kvadrokopteru, osim što ima osam rotora od kojih donji imaju obrnuti smjer rotacije što poništava rotacijski moment. Omogućava veću stabilnost uz smanjenu težinu.

#### 4.5.2. FX2 besposadna letjelica s fiksnim krilima tvrtke Flylogix

Budući da je najveći izvor metana proizvodnja i izgaranje goriva fosilnog podrijetla, britanska tvrtka Flylogix sa svojom FX2 besposadnom letjelicom s fiksnim krilima udružila se s tvrtkom SeekOps kako bi izvodila mjerenja emisija metana iz objekata udaljenijima od obale. Mjerenje emisije metana u moru izuzetno je izazovno, posebno u okruženjima kao što je Sjeverno more. No letjelica FX2 s integriranim senzorima SeekIR, koje proizvodi tvrtka SeekOps, omogućuje otkrivanje iznimno niskih emisija metana uz minimalno ometanje objekata i s minimalnim brojem osoblja. Podaci su prikupljeni na 250 metara od objekata što je najbliže što je besposadna letjelica letjela do platforme udaljene od obale. [24] (Slika 14.)



Slika 11. Besposadna letjelica s fiksnim krilima FX2 tvrtke Flylogix [24]

U tablici 2. naveden je pregled karakterističnih veličina letjelice FX2 tvrtke Flylogix.

Tablica 2. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice FX2 tvrtke Flylogix [24]



<b>DIMENZIJE</b>	Duljina u smjeru uzdužne osi: 2,75 m Raspon krila: 3,5 m
<b>MASA</b>	27 kg (42 kg s gorivom)
<b>MASA KORISNOG TERETA</b>	5 kg
<b>POGON</b>	Pogon klipnim motorom s propelerom
<b>BRZINA KRSTARENJA</b>	30,4 m/s (110 km/h)
<b>MAKSIMALNA BRZINA LETA</b>	38,4 m/s (138.5 km/h)
<b>MAKSIMALNO TRAJANJE LETA</b>	5 h
<b>MAKSIMALNA DULJINA LETA</b>	500 km

#### **4.5.3. CAMCOPTER S-100 besposadna letjelica s jednim glavnim rotorom tvrtke Nordic Unamned sa sensorima tvrtke Explicit**

Već spomenuta norveška tvrtka Nordic Unmanned proizvođač je i besposadne letjelice s jednim glavnim rotorom CAMCOPTER S-100 koja zbog svoje konstrukcije vertikalno polijeće i slijeće, što ju čini VTOL letjelicom (engl. *Vertical Take Off and Landing – VTOL*). Navedeno joj svojstvo omogućuje da poleti ili pak sleti na teško pristupačna mjesta. Može letjeti i u nepovoljnim vremenskim uvjetima, s doletom do 200 km, bez obzira leti li na kopnu ili moru. Ima unaprijed programirane GPS točke leta no njome se može upravljati i izravno pomoću upravljačke jedinice pilota. Koristi *fly-by-wire*<sup>2</sup> tehnologiju s kojom može izvršiti svoju misiju i u najsloženijim okruženjima, a njezin trup od karbonskih vlakana i titana pruža kapacitet za širok raspon kombinacija nosivosti i izdržljivosti. [23]

U tablici 3. naveden je pregled karakterističnih veličine letjelice CAMCOPTER S-100.

---

<sup>2</sup> *fly-by-wire* - sustav koji zamjenjuje konvencionalne mehaničke kontrole leta zrakoplova elektroničkim, na način da se pokreti kontrola leta pretvaraju u električne signale koji se prenose vodičima (žicama) do računala kontrole leta koje određuju kako pomicati aktuatora na svakoj kontrolnoj površini kako bi naredbe bile ispunjene



Tablica 3. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice CAMCOPTER S-100 tvrtke Nordic Unmanned [23]



<b>MASA</b>	Masa prazne letjelice: 140 kg Maksimalna masa polijetanja: 185 kg
<b>MASA KORISNOG TERETA</b>	50 kg
<b>MAKSIMALNO TRAJANJE LETA</b>	> 6 h s teretom od 34 kg s opcionalnim dodatnim vanjskim spremnikom goriva povećava se na > 10 h
<b>MAKSIMALNA BRZINA LETA</b>	62,2 m/s (222 km/h)
<b>BRZINA KRSTARENJA</b>	28,3 m/s (102 km/h)
<b>MAKSIMALNA DULJINA LETA</b>	200 km
<b>TEMPERATURNI RASPON U KOJEM MOŽE LETJETI</b>	- 40 °C to 55 °C

Za CAMCOPTER S-100 s dva odjeljka za teret, odjeljkom za pomoćnu elektroniku, bočnim mjestima za prikopčavanje tereta kao i mogućnosti za nošenjem tereta pričvršćenog ispod letjelice, nije začuđujuće da maksimalna nosivost iznosi 50 kg. U to spadaju i razni senzori, poput onih danske tvrtke Explicit koja izrađuje mini senzore za „njuškanje“ (engl. *mini sniffer sensors*) optimizirane za specifične plinove i njihovu detekciju, poput ugljikovog dioksida, metana i sumporovog oksida. (Slika 15.) Explicit je zajedno s Europskom agencijom za pomorsku sigurnost (engl. *European Maritime Safety Agency – EMSA*) i Nordic Unmannedom provodio ispitivanje koncentracije sumporovih oksida koje ispuštaju brodovi koji prolaze kroz Gibraltarska vrata, jedan od najprometnijih plovnih puteva na svijetu. Kako bi se detektirali sumporovi oksidi i izmjerila njegova koncentracija, letjelica je bila opremljena infracrvenim sensorima uz pomoć kojih se na temelju omjera  $\text{SO}_2$  i  $\text{CO}_2$  u ispušnom plinu mogao odrediti sadržaj sumpora (% m/m) u gorivu koje je koristio odabrani teretni brod. Cilj je bio otkriti premašuju li emisije sumporovih oksida ograničenja što bi ukazalo na kršenje Priloga VI MARPOL konvencije koja navodi da je trenutno ograničenje sumpora u brodskim gorivima u navedenom području 0,50 % m/m. To je bio prvi put da su navedene emisije nadzirane besposadnom letjelicom izvan ECA područja u sjevernoj Europi. Letovi su se provodili svakodnevno od sredine srpnja do kraja listopada 2022. godine, iz baze u gradu Tarifi u Španjolskoj. Nakon provedenih mjerenja na 294 nadzirana teretna broda, na njih 27 uočeno je moguće kršenje ograničenja sadržaja sumpora u gorivu. Postignuti rezultati naveli su lučke vlasti da nastave s mjerenjem te povećaju inspekciju za plovila, a i sankcije za one koji se ne drže zakonskih odredbi. [25]



Slika 12. "Mini sniffer" sensor tvrtke Explicit [26]

Osim spomenutih senzora za mjerenje sumporovih oksida, Explicit na tržište stavlja i senzore za mjerenje dušikovih oksida, gdje se na temelju omjera  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$  u ispušnom plinu može odrediti ubrajaju li se izmjerene vrijednosti  $\text{NO}_x$  u g/kWh u dopuštene granice emisija dušikovih oksida prema Prilogu VI MARPOL konvencije. Isto tako, koristeći visoko osjetljivu lasersku spektrometriju<sup>3</sup>, Explicitovi senzori mogu otkriti probleme mogućeg istjecanja metana iz LNG (engl. *Liquefied Natural Gas*) brodova<sup>4</sup> tijekom operacija na moru. [26] Navedenom senzorskom tehnologijom, Explicit postiže stručnost u analizi emisija, obradi podataka i izvješćivanja.

---

<sup>3</sup> Spektrometrija - grana fizike koja se bavi promatranjem i kvalitativnom analizom apsorpcijskih ili emisijskih spektara karakterističnih valnih duljina elektromagnetskoga zračenja uzorka obasjanog ili pobuđenog fotonima različitih energija elektromagnetskog zračenja

<sup>4</sup> LNG brod - vrsta broda namijenjenog za prijevoz ukapljenog zemnog plina (u kojem je udio metana veći od 90 %)

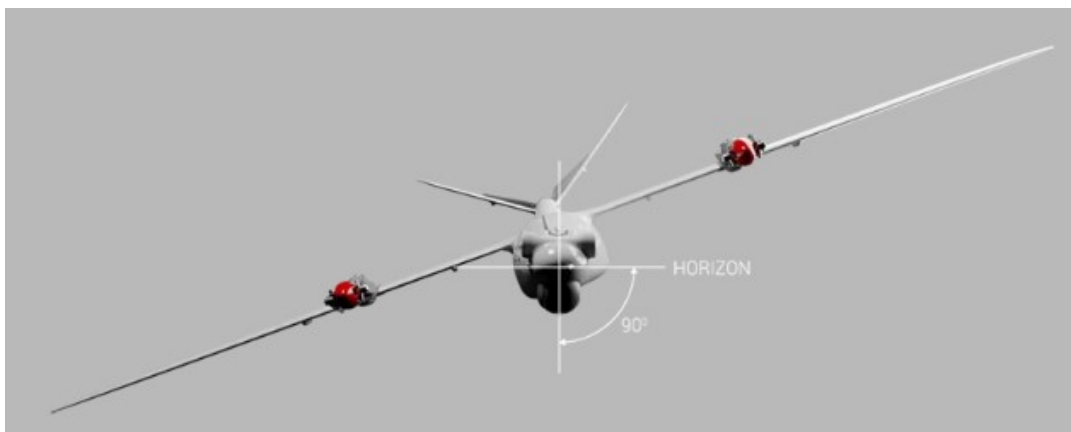
#### 4.5.4. Harara besposadna hibridna letjelica tvrtke Air Q

Potpomognut financiranjem Ujedinjenih Arapskih Emirata, hrvatski je tim stručnjaka za besposadne letjelice, koji čini tvrtku Air Q, konstruirao VTOL besposadnu letjelicu s fiksnim krilima. Budući da je sjedište tvrtke u Abu Dhabiju, prepreke poput pustinjskog okruženja omogućuju testiranje granica performansi u teškim uvjetima. Hibridna besposadna letjelica Harara, sa svojim modularnom izvedbom, omogućuje izbor između kargo (engl. *cargo*) i ISTAR (engl. *Intelligence, surveillance, target acquisition, and reconnaissance – ISTAR*), tj. senzorske usluge, ovisno koristi se letjelica za prijenos tereta ili pak za izviđanje koristeći razne senzore koji zamijene unutarnji prtljažni prostor. (Slika 16.) Osim navedenog izbora, može se izabrati i koji će pogon letjelica koristiti – potpuno električni ili hibridni.



Slika 13. Konfiguracija senzorskog i kargo modula [27]

Masa korisnog tereta kojeg Harara letjelica s lakoćom može prenesti iznosi 6 kg. Letjelica je opremljena sensorima za lociranje te detekciju sudara, što omogućava let i u centru gradova. Spoji li se električni pogon s kargo uslugom, smanjuju se vibracije što omogućuje siguran i brz prijevoz osjetljivog tereta. Odabere li se senzorska usluga, unutarnji prtljažni prostor biva zamijenjen raznim sensorima, ovisno o potrebama korisnika. Gimbal stabilizator djeluje kao kompenzacija za manevre zrakoplova, održavajući stabilan horizont i senzore fiksirane na predmet istraživanja, što omogućuje učinkovito i nesmetano praćenje cilja. (Slika 17.) Uz magnetometar, dan-noć, SAR (engl. *Synthetic-Aperture Radar - SAR*) i SIGINT (engl. *Signals Intelligence – SIGINT*) senzore, u letjelicu se mogu ugraditi i senzori za mjerenje emisija onečišćujućih tvari.



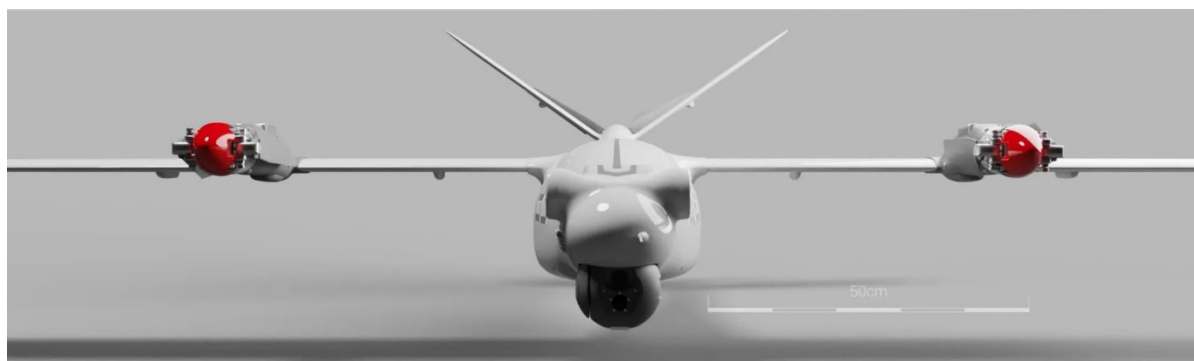
*Slika 14. Način rada gimbal stabilizatora [27]*

Budući da je riječ o kombinaciji VTOL i letjelice s fiksnim krilom, svaki dio preuzima jednu ulogu. Kod vertikalnog polijetanja i slijetanja rotoru su ti koji stvaraju potisak, no pri prijelazu na horizontalni let oni postaju okomiti na trup zrakoplova, slično propeleru, tako da fiksno krilo preuzima ulogu stvaranja aerodinamičkog uzgona, što omogućuje manju potrošnju goriva, a time i dulje vrijeme leta. Letjelicom se upravlja iz AirQ M-Ground Control System konfiguracije koja nudi dovoljno radnog prostora za dva operatera: daljinskog pilota i operatera tereta. (Slika 18.) [27]



*Slika 15. AirQ M-Ground Control System [27]*

U tablici 3. naveden je pregled karakterističnih veličina letjelice Harara.

*Tablica 4. Pregled karakterističnih veličina besposadne letjelice Harara tvrtke Air Q [27]*

<b>RASPON KRILA</b>	3,7 m
<b>MAKSIMALNA MASA POLIJETANJA</b>	32 kg
<b>MASA KORISNOG TERETA</b>	6 kg
<b>BRZINA KRSTARENJA</b>	27,8 m/s (100 km/h)
<b>MAKSIMALNO TRAJANJE LETA</b>	6 h (hibridni pogon) 2,5 h (električni pogon)

#### 4.5.5. Usporedba besposadnih letjelica za mjerenje emisija

Na temelju dostupnih podataka o prethodno spomenutim primjerima besposadnih letjelica za mjerenje emisija, mogu se izračunati i usporediti određeni pokazatelji performansi letjelica, poput omjera mase korisnog tereta i maksimalne mase polijetanja. Tablica 5. pokazuje da letjelica CAMCOPTER S-100 u odnosu na svoju maksimalnu masu ima najveću nosivost. Čak 27 % maksimalne mase s kojom može poletjeti može činiti koristan teret što znači da će se kod prijevoza tereta ili pak u ovom slučaju, ugradnje više senzora, izabrati prije nego li letjelica FX2 koja ima najmanji omjer. Tome u prilog ide i činjenica da bez obzira što je masa letjelice CAMCOPTER S-100 skoro 4.5 puta veća od letjelice FX2, brzine krstarenja<sup>5</sup> im se razlikuju za nešto više od 2 m/s.

Tablica 5. Usporedba određenih pokazatelja performansi besposadnih letjelica za mjerenje emisija

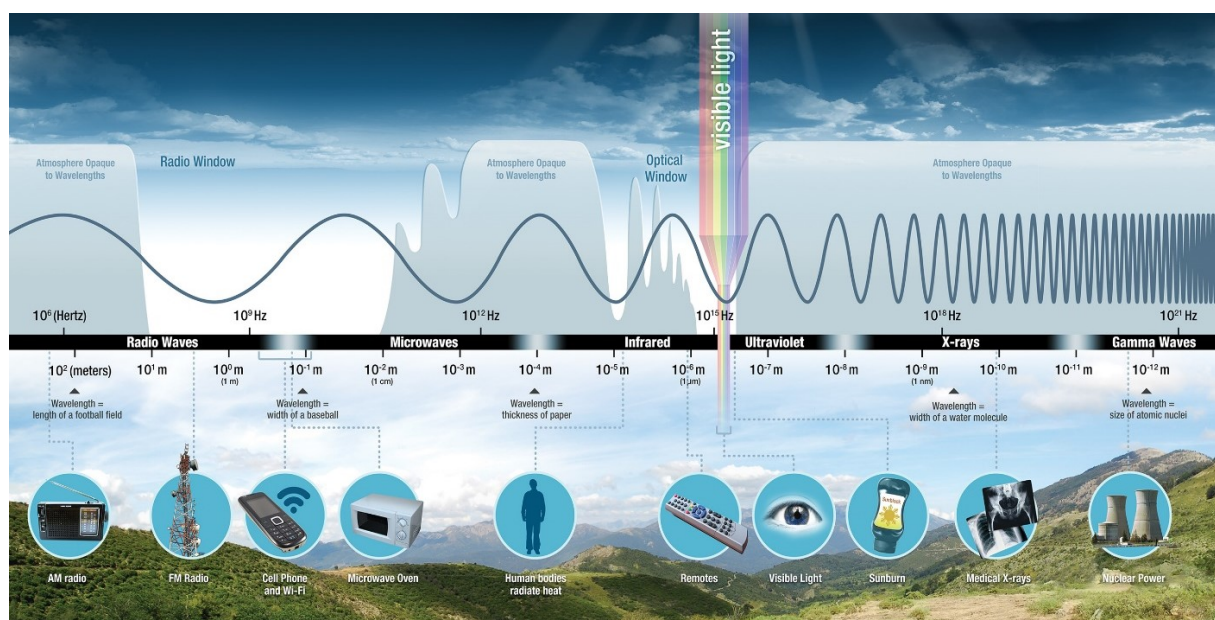
Naziv letjelice	$\frac{\text{masa korisnog tereta}}{\text{maksimalna masa polijetanja}}$	brzina krstarenja (m/s)
<b>Staaker</b>	$\frac{5 \text{ kg}}{25 \text{ kg}} = 0,20$	10
<b>FX2</b>	$\frac{5 \text{ kg}}{42 \text{ kg}} = 0,12$	30,4
<b>CAMCOPTER S-100</b>	$\frac{50 \text{ kg}}{185 \text{ kg}} = 0,27$	28,3
<b>Harara</b>	$\frac{6 \text{ kg}}{32 \text{ kg}} = 0,19$	27,8

<sup>5</sup> krstarenje – dio leta koji traje od trenutka kad zrakoplov nakon penjanja dostigne željenu visinu do trenutka kad započne slijetanje. Pretpostavlja se da zrakoplov leti horizontalno, pravocrtno i konstantnom brzinom

## 5. METODE MJERENJA IZ ZRAKA (engl. *remote sensing*)

Daljinsko istraživanje (engl. *remote sensing*) jest proces prikupljanja informacija o objektu analizom senzorski prikupljenih podataka bez fizičkog dodira između senzora i samog objekta. Za provedbu procesa koristi se elektromagnetsko zračenje kao sredstvo otkrivanja i mjerenja svojstva objekta. Podaci određeni procesom daljinskog istraživanja sastoje se od informacija o intenzitetu valne duljine prikupljanjem elektromagnetskog zračenja koje se reflektira od objekta na određenoj valnoj duljini i mjerenjem njegovog intenziteta. [28] Na slici 19. pokazan je spektar elektromagnetskih valova te njihova primjena.

Daljinsko istraživanje svoju je primjenu pronašlo u gotovo svim djelatnostima, što znači da se uz geodeziju i inženjerstvo koristi i za predviđanje vremena i atmosferskih uvjeta, otkrivanje potresa, erupcija i poplava, praćenje kretanja vozila, vojne operacije i procjene terena, a omogućuje i mjerenja na nedostupnim ili po život opasnim područjima. Najčešće se za daljinska istraživanja koriste letjelice i sateliti.



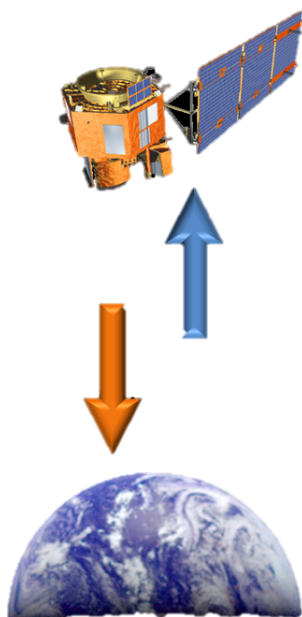
Slika 16. Spektar elektromagnetskih valova i njihova primjena [29]



Prema izvoru signala koji se koristi za istraživanje objekta, razlikuju se dvije vrste daljinskog istraživanja – aktivno i pasivno. Aktivni senzori koriste se vlastitim izvorom svjetlosti, dok pasivni koriste reflektirani izvor.

## 5.1. Aktivni senzori

Aktivni senzor je instrument koji osigurava vlastiti izvor energije za „osvjetljenje“. Senzor emitira signale određene valne duljine i modulacije usmjerene prema objektu istraživanja kako bi se detektiralo zračenje koje je reflektirano ili raspršeno od objekta promatranja. [30] Njegova je prednost mogućnost mjerenja u bilo koje doba dana, no zahtijevaju stvaranje značajne količine energije za zadovoljavajuće osvjetljavanje ciljeva.



Slika 17. Aktivni sensor [30]

Tehnike aktivnog daljinskog istraživanja razlikuju se po tome što emitiraju (vidljivu svjetlost ili zračenje iz nekog drugog dijela elektromagnetskog spektra) i što određuju (udaljenost, visina, atmosferski uvjeti). Aktivni senzori koji se najčešće nalaze u besposadnim letjelicama su radar, lidar i sonar, a ako se radi o besposadnim letjelicama za mjerenje emisija, u aktivne senzore spadaju i NDIR senzori. [31]

### 5.1.1. Radar

Radar (engl. *Radio Detection and Ranging*) je uređaj koji se koristi za otkrivanje i određivanje prisutnosti, udaljenosti i brzine teško uočljivih ili nevidljivih objekata pomoću radio valova na temelju refleksije. (Slika 21.) Uz radioodašiljač, radioprijemnik i računalo za obradu i prikaz podataka, sadrži i antenu koja odašilje kratki impuls. Na temelju podatka o vremenu koje je potrebno da se impuls odbije od cilja i vrati do antene moguće je odrediti udaljenost antene do objekta promatranja, prema jednadžbi:

$$R = \frac{c \times t}{2}$$

gdje je:

$R$  – udaljenosti između radarske antene i objekta promatranja (m)

$c$  – brzina kojom putuju radio valovi = brzina svjetlosti  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s

$t$  – vrijeme potrebno da se poslani impuls vrati do antene (s)

Za razliku od zvučnih valova, na radio valove, tj. performanse radara ne utječu mnogo promjene temperature ili vlažnosti budući da one imaju vrlo mali učinak na brzinu elektromagnetskih valova. Radar može raditi i u vakuumu, na visokim tlakovima i visokim temperaturama bez primjetnih razlika u izmjenjenim podacima. Moguće je izmjeriti udaljenost s vrlo velikom točnošću, sve dok objekt promatranja nije preblizu, gdje vrijeme povratka impulsa postaje prekratko za precizno mjerenje. Ta se udaljenost naziva mrtva zona. [32]

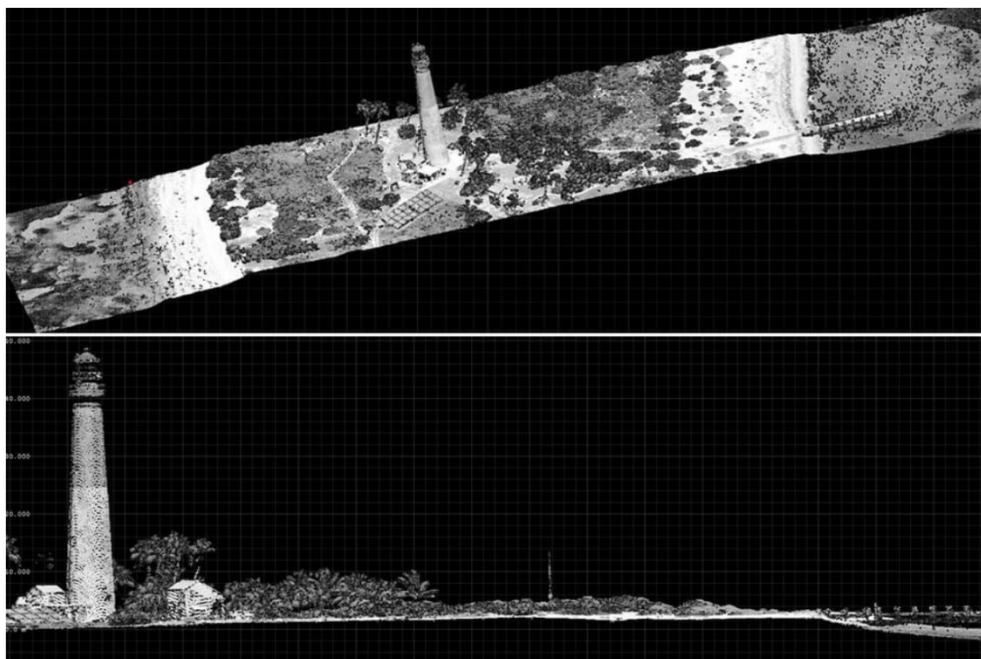
Današnje ratno zrakoplovstvo često koristi tzv. *stealth* tehnologiju koja vojne zrakoplove čini radaru nevidljivima. Taj se efekt ostvaruje pomoću posebnih materijala i inženjerski konstruiranih oblika koji raspršuju radio valove i omogućuju da zrakoplov ostane neprimijećen. [33]



*Slika 18. Radar [33]*

### **5.1.2. Lidar**

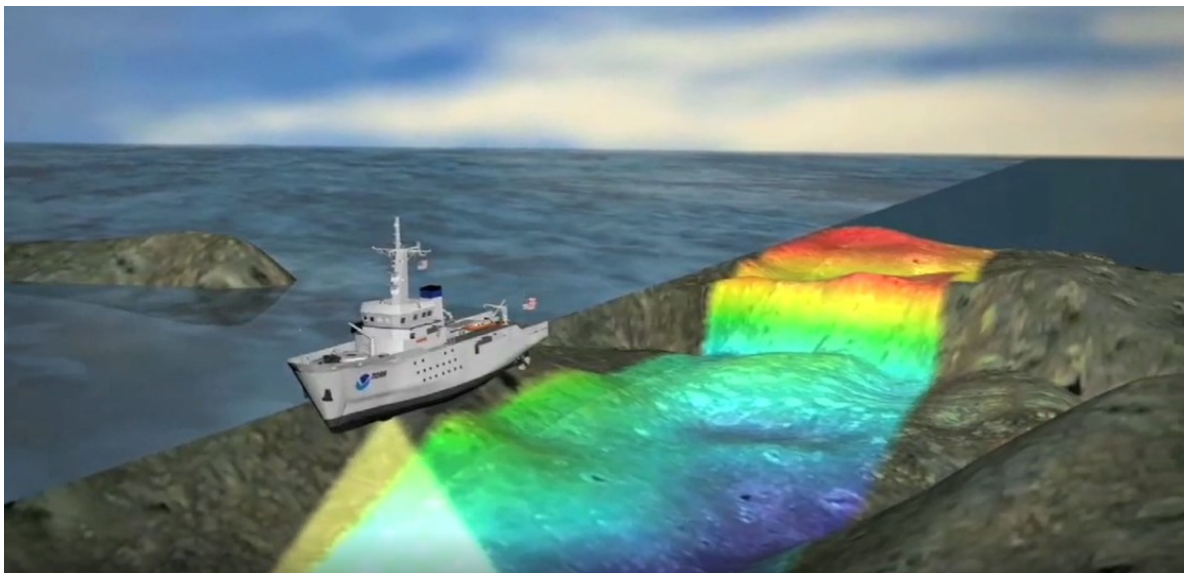
Lidar (engl. *Light Detection and Ranging*) jest uređaj koji za daljinsko istraživanje koristi svjetlost. Mjeri se vrijeme potrebno da se poslan laserski impuls odbije od objekta promatranja i vrati natrag, pomoću kojeg se određuje visina elemenata na tlu, a uz pomoć GPS prijavnika, generiraju se precizne informacije o karakteristikama Zemljine površine. Laser koristi zelenu svjetlost (532 nm) ili elektromagnetsko zračenje valne duljine u blizini infracrvenog zračenja (1065 nm) jer se svjetlost tih valnih duljina najbolje odbija od vegetacije. [34] Mnogi znanstvenici koriste lidarske podatke za izradu preciznijih karata te digitalnih modela za geografske informacijske sustave, za modeliranje plavljenja i obalnih valova te analize ranjivosti obale, kao i za pomoć u hitnih slučajevima. [35] Primjer prikupljenih podataka pomoću lidara prikazan je na slici 22.



Slika 19. Lidarski podaci prikupljeni korištenjem NOAA istraživačkog zrakoplova - svjetionik Loggerhead Key, Dry Tortugas, Florida [35]

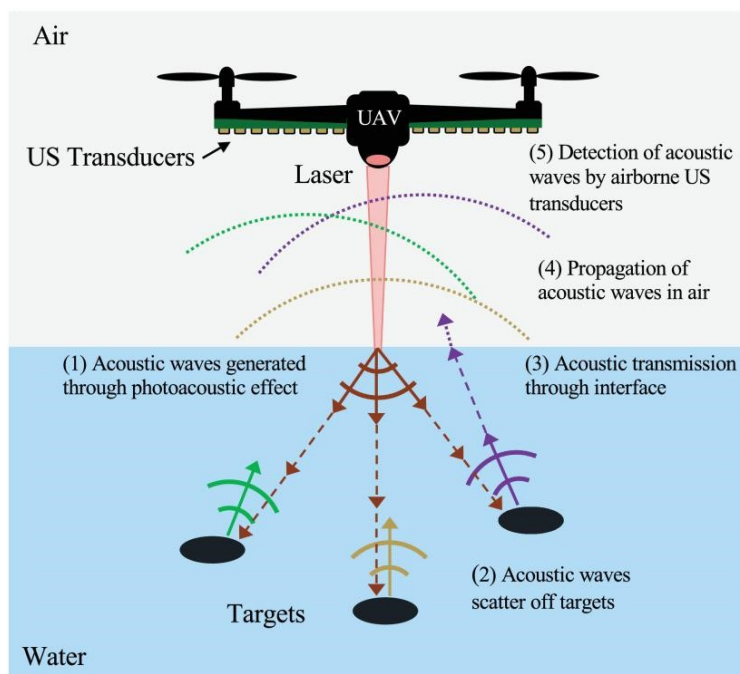
### 5.1.3. Sonar

Sonar (engl. *Sound Navigation and Ranging*) je uređaj koji se koristi za istraživanje vodenih površina, poput oceana, pomoću zvučnih valova jer su oni pogodniji za putovanje kroz vodu od elektromagnetskih valova, poput radio i svjetlosnih valova. Koristi se za stvaranje pomorskih karti, lociranje objekata i mapiranje morskog dna. Razlikuju se dvije vrste sonara: aktivni i pasivni. Aktivni emitiraju zvučni signal koji se odbija od objekta koji se nalazi na putu zvučnog signala i vraća se kao jeka pa se mjerenjem vremena između emisije signala i njegovog prijema može odrediti domet objekta. Pasivni sonari, za razliku od aktivnog, ne emitiraju vlastiti signal, već samo detektiraju zvučne valove koji dolaze k njemu, što je prednost za vojne brodove koji žele ostati nezapaženi i misije koje se bave osluškivanjem oceana, no koriste se za i otkrivanje morskih objekata, poput podmornica, brodova ili pak morskih životinja poput kitova. [36] (Slika 23.)



Slika 20. Vizualni prikaz načina na koji sonar radi [36]

Iako je sonar najsvremenija podvodna senzorska tehnologija, zvučni valovi na prijelazu iz zraka u vodu i obrnuto gube više od 99 % svoje energije što onemogućava upotrebu tradicionalnog sonara na besposadnim letjelicama. Kao posljedica navedenog, oceani se ne mogu kartirati iz zraka kao što se može kopno. Većina podvodnog kartiranja postignuta je upravo pričvršćivanjem sonara na brodove, no ta je tehnika spora i neučinkovita za pokrivanje velikih površina. Zato je razvijen fotoakustični zračni sonarni sustav (engl. *Photoacoustic Airborne Sonar System - PASS*) čija je shema prikazana na slici 24. Kombinira svjetlosne i zvučne signale tako da se iz lasera pošalje svjetlosni signal koji se apsorbira na površini vode, stvarajući zvučne valove koji se šire kroz vodu i reflektiraju od podvodnih objekata te vraćaju prema površini. Zvučni valovi koji se vraćaju još uvijek gube većinu svoje energije kada probijaju kroz površinu vode, no ovom se metodom može spriječiti da se gubitak energije dogodi dvaput. PASS omogućuje mapiranje oceanskih dubina sličnom brzinom i razinom detalja poput krajolika Zemlje. [37]

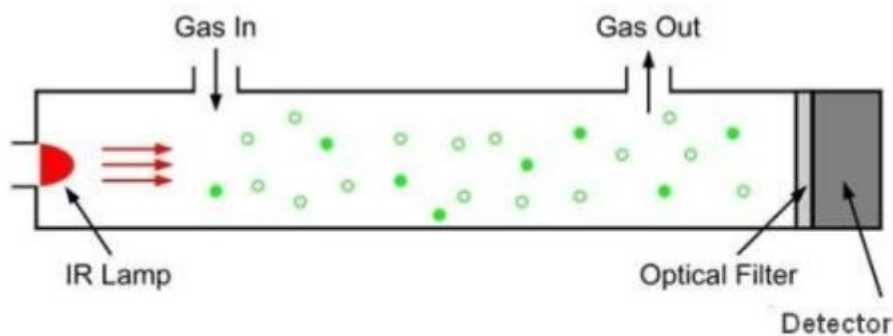


Slika 21. Shema fotoakustičnog zračnog sonarnog sustava [37]

#### 5.1.4. NDIR senzori za mjerenje emisija

Senzori koji mogu otkriti i kvantificirati tvari koje onečišćuju zrak imaju ključnu ulogu u praćenju emisija. U kategoriji aktivnih senzora nalazi se i dominantna tehnologija za otkrivanje onečišćenja zraka na tržištu - nedisperzivni infracrveni senzori (engl. *NDIR sensor - NonDispersive InfraRed sensor*). Sastoje se od IR (engl. *IR-infrared*) izvora, komore za uzorke, optičkog filtra i IR detektora.

Kao primjer opisa rada korišten je NDIR CO<sub>2</sub> senzor. IR izvor usmjerava svjetlosne valove kroz cijev koja je ispunjena onečišćenim zrakom preko optičkog filtra do IR detektora. Dok IR svjetlo prolazi kroz cijev, molekule ugljikovog dioksida najviše apsorbiraju svjetlost na valnoj duljini od 4,26 μm, dok propuštaju svjetlost ostalih valnih duljina. Preostala neapsorbirana svjetlost pogađa optički filter koji apsorbira svjetlost neželjenih valnih duljina (svaka valna duljina svjetlosti osim one koju apsorbiraju molekule CO<sub>2</sub> u komori za uzorke) pa IR detektor očitava preostalu količinu svjetlosti na navedenoj valnoj duljini, koja se koristi za određivanje koncentracije CO<sub>2</sub>. [38] (Slika 25.)



Slika 22. Slikovni prikaz načina rada NDIR CO<sub>2</sub> senzora [38]

Plinovi nemaju određenu valnu duljinu na kojoj apsorbiraju svjetlost, već postoje područja valnih duljina infracrvenog zračenja koje apsorbiraju. [39]

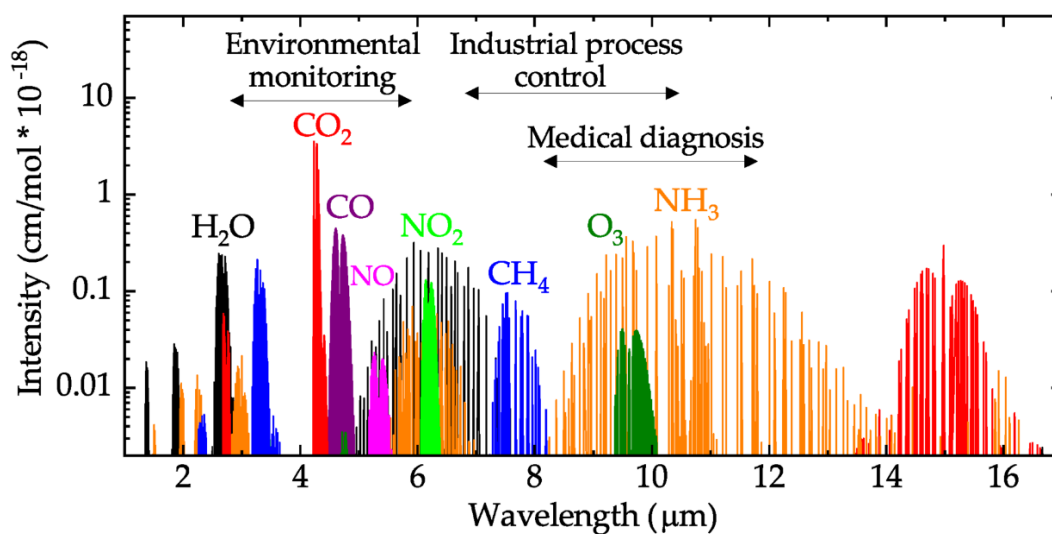
Za CO to su valne duljine od 1,55  $\mu\text{m}$ , 4,67 do 4,8  $\mu\text{m}$  te 5,9  $\mu\text{m}$ .

Za CO<sub>2</sub> to su valne duljine od 2,7  $\mu\text{m}$ , 4,26  $\mu\text{m}$  te od 14,2 do 15,7  $\mu\text{m}$ .

Za NO<sub>2</sub> to su valne duljine od 6,17 do 6,43  $\mu\text{m}$ .

Za CH<sub>4</sub> to su valne duljine od 1,3  $\mu\text{m}$ , 1,65  $\mu\text{m}$ , 2,3  $\mu\text{m}$ , 3,2 do 3,5  $\mu\text{m}$  te od 7,3 do 8,2  $\mu\text{m}$ .

Na slici 26. pokazana su područja valnih duljina infracrvenog zračenja u kojima određeni plinovi apsorbiraju svjetlost.

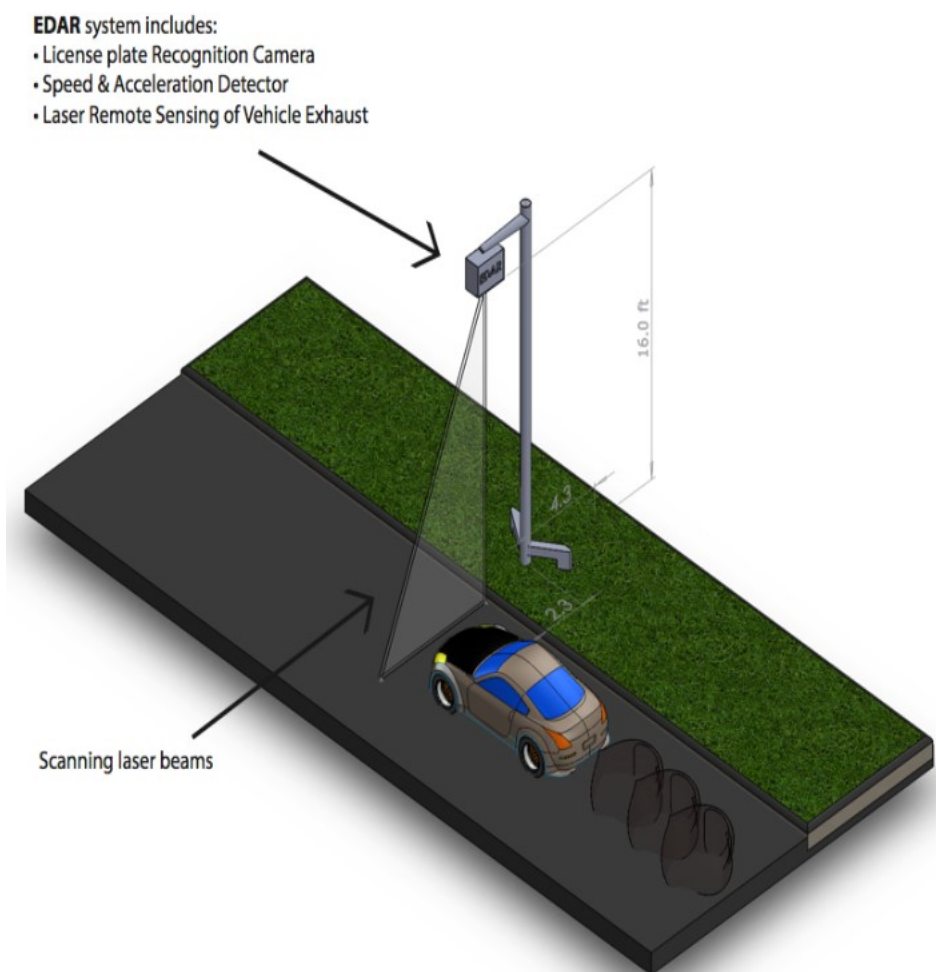


Slika 23. Srednji infracrveni apsorpcijski spektri nekih plinova [39]



### 5.1.5. Uređaj za mjerenje emisija EDAR

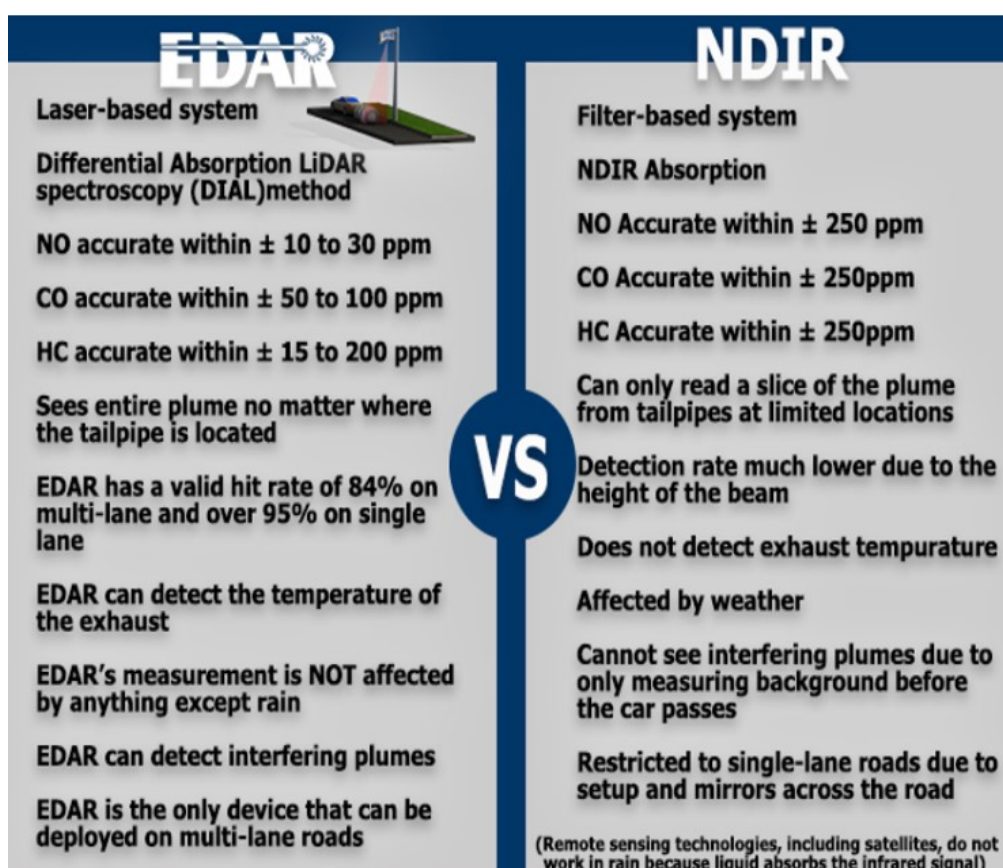
Američka tvrtka HEAT (Hager Environmental & Atmospheric Technologies) zaslužna je za jednu od najsvremenijih stacionarnih tehnologija mjerenja koncentracije onečišćujućih tvari metodom daljinskog istraživanja – EDAR (engl. *Emissions Detection And Reporting – EDAR*). EDAR sadrži sustav hardvera i softvera koji omogućuju multispektralnu sliku cijelog ispušnog plina iz vozila u pokretu te prikupljanje podataka o emisijama onečišćujućih tvari kao što su CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HC i PM s milijun puta većom razlučivosti od postojećih tehnologija. Koristi tehnologiju sličnu svemirskim satelitima za otkrivanje i kvantificiranje plinova u Zemljinoj atmosferi pomoću lasera i lidar metode diferencijalne apsorpcijske spektroskopije (engl. *Differential Absorption Lidar - DIAL*). [40] (Slika 24.)



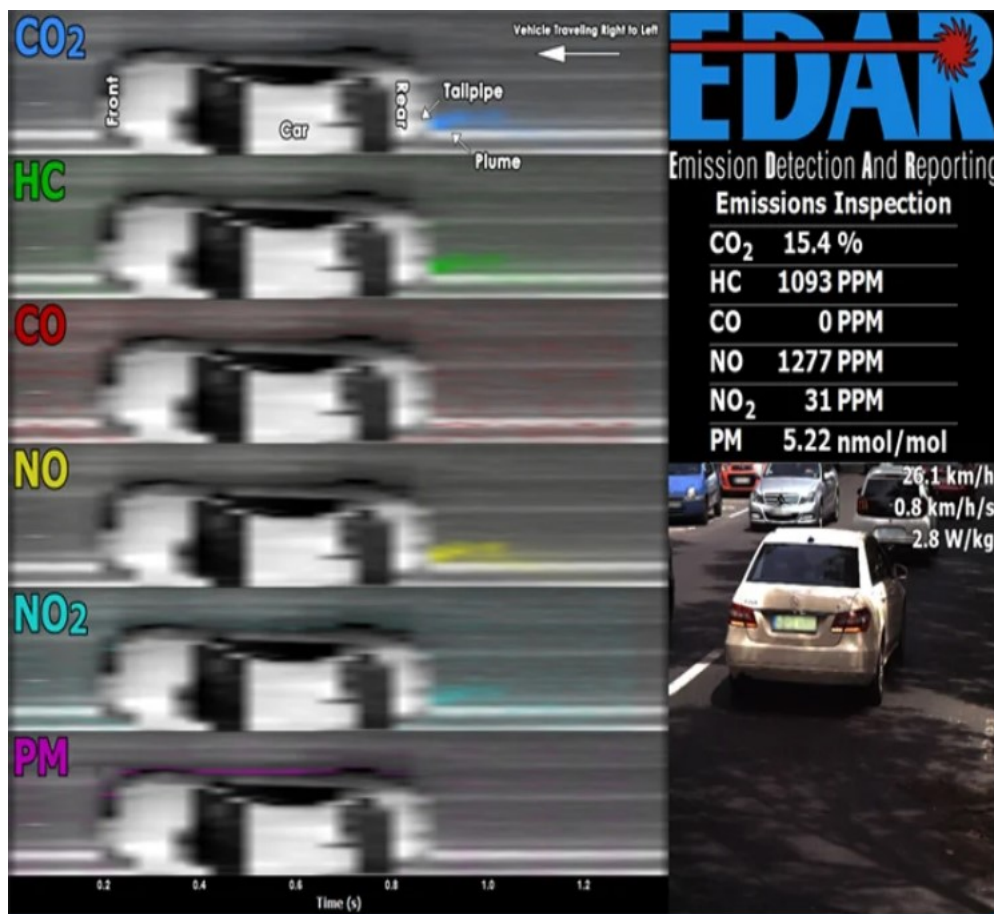
Slika 24. Princip rada EDAR-a [40]



Sustav EDAR koristi metodu infracrvene spektroskopije za mjerenje temperature ispušnih plinova dok izlaze iz ispušne cijevi. Temperatura ispuha u odnosu na temperaturu okoline pokazuje je li vozilo u zagrijanom ili hladnom stanju. Kada je vozilo u hladnom stanju, čini se da ima visoku emisiju zbog emisija uzrokovanih hladnim katalizatorom, no jedinstvena sposobnost EDAR-a da detektira temperaturu ispušnih plinova omogućuje točnu identifikaciju ovih vozila umjesto da ih lažno kategorizira kao one s visokim emisijama. Isto tako, snima 2D sliku vozila i oblaka ispušnih plinova, a detektira i registracijske pločice, datum, vrijeme, brzinu, temperaturu, barometarski tlak, vlažnost te brzinu vjetra. (Slika 29.) Ima sposobnost i identificiranja vozila s emisijama isparavanja koje označuju pare ugljikovodika koje isparavaju iz spremnika i sustava goriva. EDAR-ovi specijalizirani algoritmi mogu razlučiti ta područja u odnosu na ugljikovodike u ispušnoj cijevi. EDAR uređaj ne zahtjeva kalibraciju već radi 24 sata dnevno, sedam dana u tjednu, bez posade i bez kalibracije, za razliku od konkurentne tehnologije, NDIR senzora koji zahtijevaju kalibraciju zbog promjena u uvjetima okoline i pomaka instrumenta. Neke od njihovih razlika prikazane su na slici 25. [40]

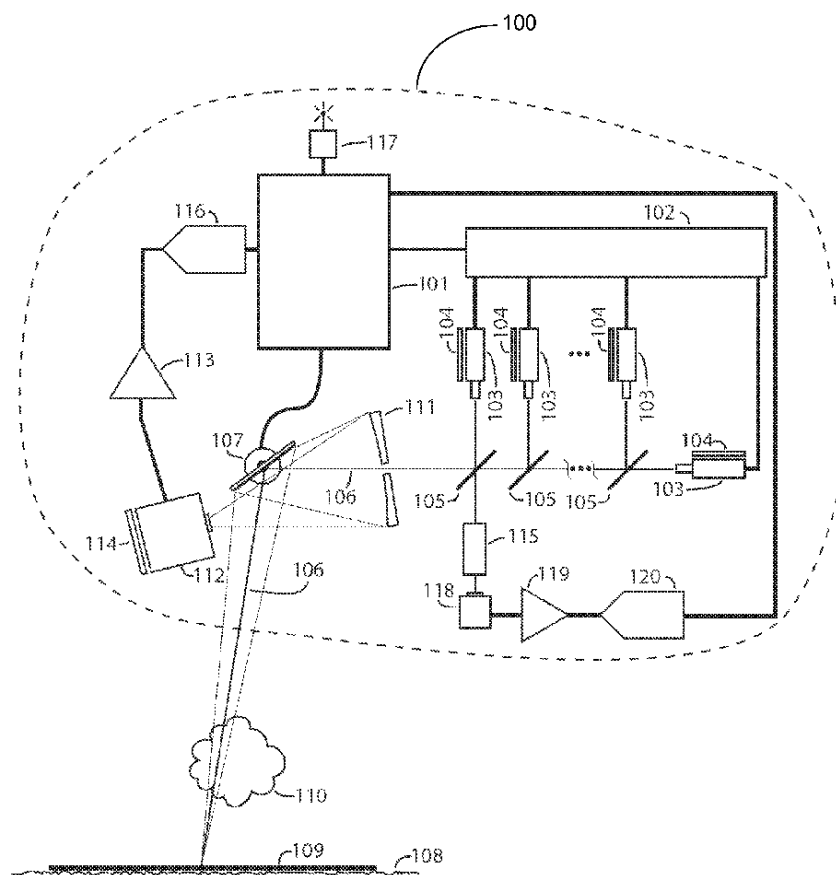


Slika 25. Razlike između EDAR-a i NDIR senzora za mjerenje emisija [40]



Slika 26. Primjer izmjerenih podataka pomoću EDAR-a [40]

Metoda za kvantifikaciju sastojaka oblaka ispušnih plinova uređajem EDAR započinje usmjeravanjem snopa svjetlosti odabranih valnih duljina (oznaka 106) iz lasera (103) do optike za pozicioniranje (107) koju čini galvanometar sa zrcalom na vrhu. Postavljeni svjetlosni snop (106) prolazi kroz oblak ispušnih plinova (110) do reflektirajućeg materijala (109), poput retro reflektirajuće trake ili boje, koji se nalazi na cesti (108). Galvanometar je također prilagođen za prikupljanje reflektirane svjetlosti i njeno usmjeravanje prema zrcalu za prikupljanje (111). Reflektirana svjetlosna zraka prolazi kroz zrcalo za prikupljanje (111) te se usmjerava u optičko-elektronički detektor (112). Električni signal iz detektora prolazi kroz pojačalo (113). Detektor, kao i pojačalo, mogu se smjestiti u mehanizam za hlađenje (114) kako bi se povećala osjetljivost i stabilnost detekcije. Rezultirajući signal prenosi se u analogno-digitalni pretvarač (116). Mjerenje obrađuje kontroler (101) koji može biti računalo. Rezultati se mogu prenijeti i na udaljenu lokaciju određenim komunikacijskim mehanizmom (117). [41] (Slika 27.)



Slika 27. Shema rada EDAR-a [41]

Obrada reflektiranog svjetla kako bi se odredio sastav oblaka ispušnih plinova uključuje izračunavanje efektivne širine,  $w_i$ , svakog reflektiranog snopa svjetlosti prema jednadžbi:

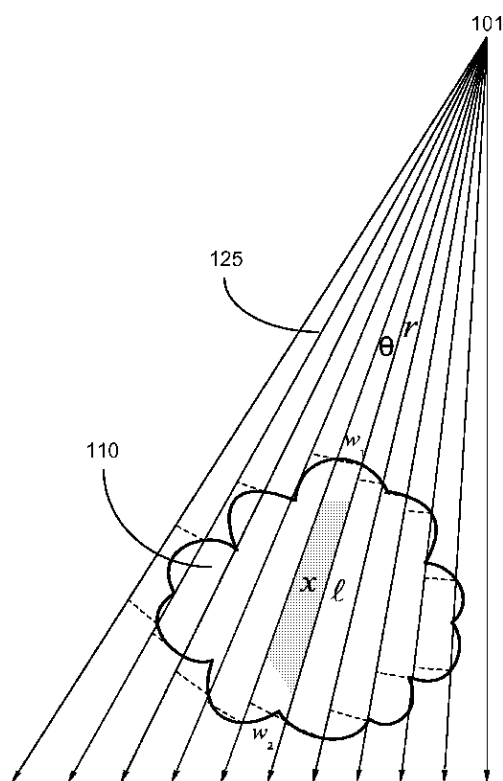
$$w_i = \frac{1}{2} \theta_i \times (2 r_i + l)$$

gdje je, kao što slika 31. prikazuje:

$\theta_i$  – kut svjetlosnog snopa u odnosu na smjer okomit na površinu ceste (rad)

$r_i$  – udaljenost između izvora svjetlosti i vrha oblaka ispušnih plinova (m)

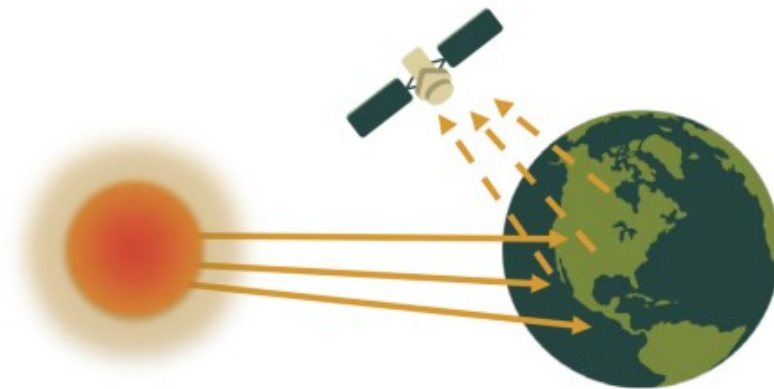
$l$  – debljina oblaka ispušnih plinova (odgovara visini stražnjeg dijela vozila) (m)



Slika 28. Shema svjetlosnog snopa s karakterističnim veličinama [41]

## 5.2. Pasivni senzori

Pasivni senzori su instrumenti daljinskog istraživanja koji ne usmjeravaju vlastitu energiju na objekt promatranja, već mjere sunčevu energiju koja se prirodno javlja u okolišu i biva reflektirana u obliku elektromagnetskih valova od Zemlje (slika 32). Sunčeva energija se reflektira, iz čega proizlazi vidljiva svjetlost ili se apsorbira i ponovno emitira, što označava infracrveno zračenje. Pasivni se senzori mogu koristiti samo kada Sunce obasjava Zemlju, budući da noću nema reflektirane energije od Sunca, no infracrveno zračenje može se detektirati i danju i noću ako postoji dovoljno velika količina energije da se zabilježi. [30] Misija Landsat, najdugovječniji program promatranja Zemlje iz svemira, bazira se upravo na uporabi pasivnih senzora. Landsatovi sateliti do sada su snimili milijune snimaka koje su dostupne javnosti s primjenom u geologiji, poljoprivredi, kartografiji, edukaciji i nacionalnoj sigurnosti. [31]

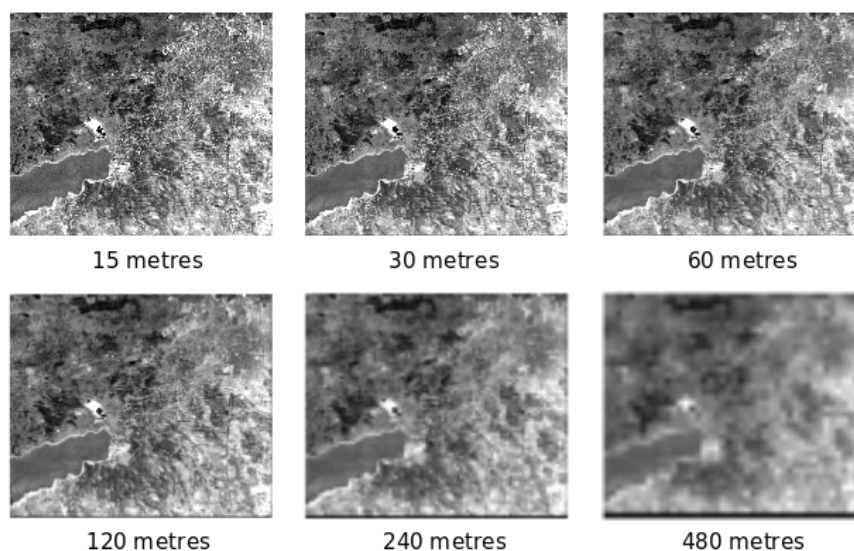


Slika 29. Pasivni senzor [42]

Iako svemirske tehnike snimanja imaju široku pokrivenost područja, njihova je cijena vrlo visoka, a i na snimke utječe stanje atmosfere. Zbog toga se sve više koriste snimke visoke razlučivosti iz zraka koje imaju veću razlučivost i manji utjecaj atmosfere iako je učinkovitost zračnih kamera manja od učinkovitosti svemirskih instrumenata zbog manje visine leta pa time i manje pokrivenosti. Iz snimki visoke razlučivosti može se izvući značajna količina korisnih informacija jer sadrže spektralne i geometrijske karakteristike te značajke teksture, a koriste se u gospodarenju šumama, upravljanju poljoprivrednim zemljištem, urbanom kartiranju, kao i praćenju okoliša. [30] Najčešće tehnike snimanja iz zraka koriste RGB, multispektralne, hiperspektralne i toplinske senzore.

### 5.2.1. RGB senzori

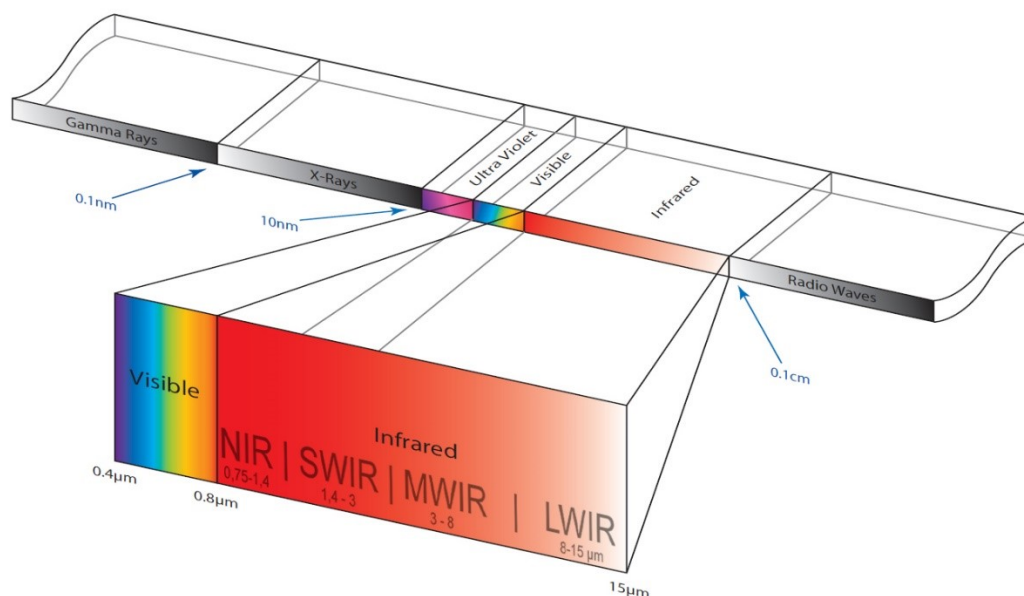
Najčešći senzor kojim je opremljena velika većina besposadnih letjelica jest RGB (engl. *Red Green Blue*) senzor. Samo ime označava crvenu, zelenu i plavu svjetlost, dio elektromagnetskog spektra kojeg hvata i ljudsko oko tako da navedeni senzor zapravo predstavlja prosječnu kameru čije snimke odgovaraju onome što vidimo u stvarnosti. Važan parametar čini razlučivost RGB senzora. Prostorna razlučivost određena je visinom na kojoj se može letjeti bez gubitka značajnih detalja na slikama. To znači da će letjelice sa senzorom niže prostorne razlučivosti morati letjeti bliže objektu promatranja kako bi snimile iste detalje kao letjelice sa senzorom visoke prostorne razlučivosti koje lete na većoj visini. [43] Označava se kao vrijednost koja predstavlja duljinu jedne stranice kvadrata - prostorna razlučivost od 100 m znači da jedan piksel predstavlja područje veličine 100 x 100 m na tlu. Što je manja dimenzija piksela, veća je prostorna razlučivost slike i vidljivo je više detalja. (Slika 33.)



Slika 30. Primjeri prostorne razlučivosti [44]

### 5.2.2. Multispektralni senzori

Uz crvenu, zelenu i plavu svjetlost, refleksija drugih valnih duljina elektromagnetskog spektra također može biti o velike koristi. Multispektralni senzori mogu detektirati do 15 različitih valnih područja, pa čak i izvan spektra vidljive svjetlosti, poput bliskog infracrvenog (engl. *NIR* - *Near-infrared*), kratkovalnog infracrvenog (engl. *SWIR* - *Short-wave infrared*) i dugovalnog infracrvenog (engl. *LWIR* – *Long-wave infrared*) područja čiji su intervali prikazani na slici 21. [45] Uobičajeni izvori multispektralnih podataka su NASA-ini sateliti Landsat i ASTER (engl. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Prikupljeni podaci koriste se za karakterizaciju stijena i tla, mogu pružiti i informacije o vremenskim uvjetima te površinskoj poroznosti i hrapavosti, a korišteni su i u geotermalnim istraživanjima za otkrivanje plitkih podzemnih toplinskih anomalija. Zdrave biljke reflektiraju više bliskog infracrvenog (NIR) zračenja nego nezdrave pa se multispektralni senzori mogu koristiti i za procjenu abnormalnosti u vegetaciji. No povećava li se spektralna razlučivost, smanjit će se prostorna razlučivost, što znači da letjelica mora letjeti na nižoj nadmorskoj visini da bi se uočila ista količina prostornih detalja u vegetaciji koja bi se postigla RGB kamerama.

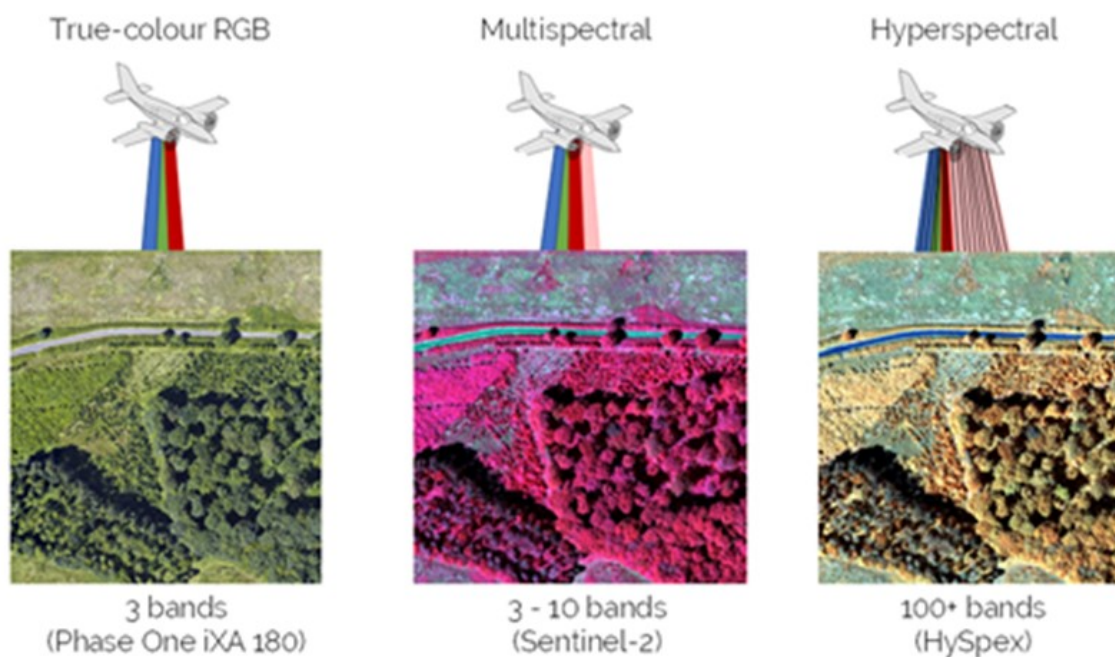


Slika 31. Raspon valnih duljina vidljive svjetlosti i infracrvenog zračenja [45]

### 5.2.3. Hiperspektralni senzori

Multispektralni senzori polako bivaju zasjenjeni napretkom hiperspektralnih senzora, budući da hiperspektralni senzori pokazuju Zemlju ili objekt koji promatraju u stotinama valnih područja u vidljivom, NIR, SWIR i LWIR rasponu valnih duljina. Iako se u industriji još uvijek mnogo cijene multispektralne snimke dobivene od Landsata i ASTER-a, karte za geotermalna istraživanja stvorene iz podataka dobivenih iz hiperspektralnih senzora su mnogo preciznije, točnije, te bogatije informacijama. [45] Hiperspektralne snimke također omogućuju različite primjene u razumijevanju šuma jer otkrivaju biokemijski i strukturni sastav s prostornog i spektralnog aspekta kao što prikazuje slika 35., a sve se više koriste i za detektiranje i mjerenje emisije onečišćujućih plinova.



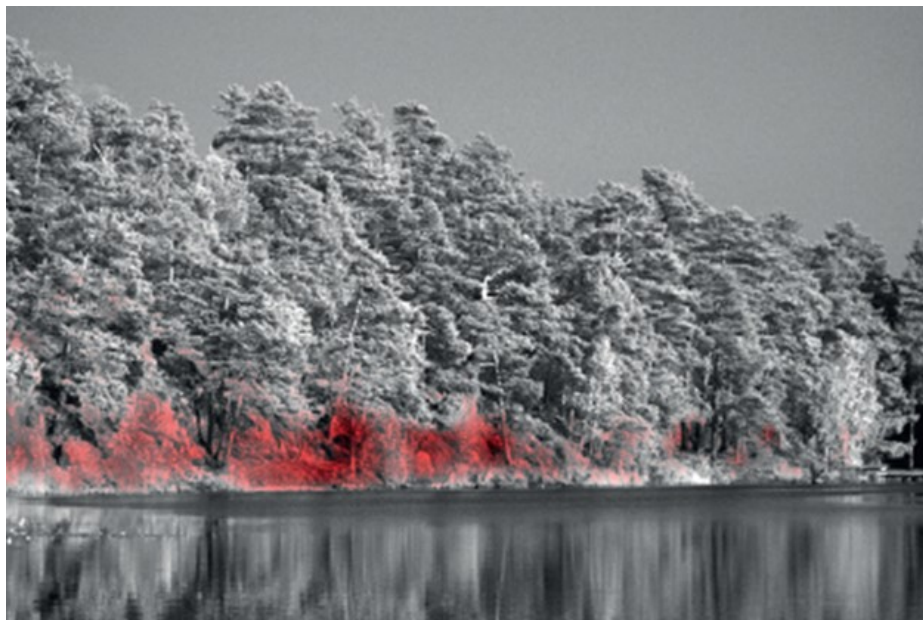


Slika 32. Slika šume dobivena RGB, multispektralnim i hiperspektralnim senzorom [46]

#### 5.2.3.1. The Hyper-Cam

The Hyper-Cam, tvrtke Telops, s mogućnošću detektiranja valnih duljina u rasponu od 7,38 do 8,2  $\mu\text{m}$ , napredni je pasivni infracrveni hiperspektralni sustav snimanja koji kombinira visoku prostornu i spektralnu rezoluciju, a koristi se za detekciju i identifikaciju plina metana, budući da je upravo u tom intervalu metan uočljiv i mjerljiv (slika 36). Njegova inačica Hyper-Cam Airborne Mini dizajnirana je da bi se koristila kod letjelica i tako omogućila mjerenje metana u stvarnom vremenu iz zraka. Jednostavna je za montiranje, teži manje od 24 kg te može detektirati izuzetno male količine plina do razine ppm - dijelova na milijun (engl. *parts per million*). [47] (slika 37)





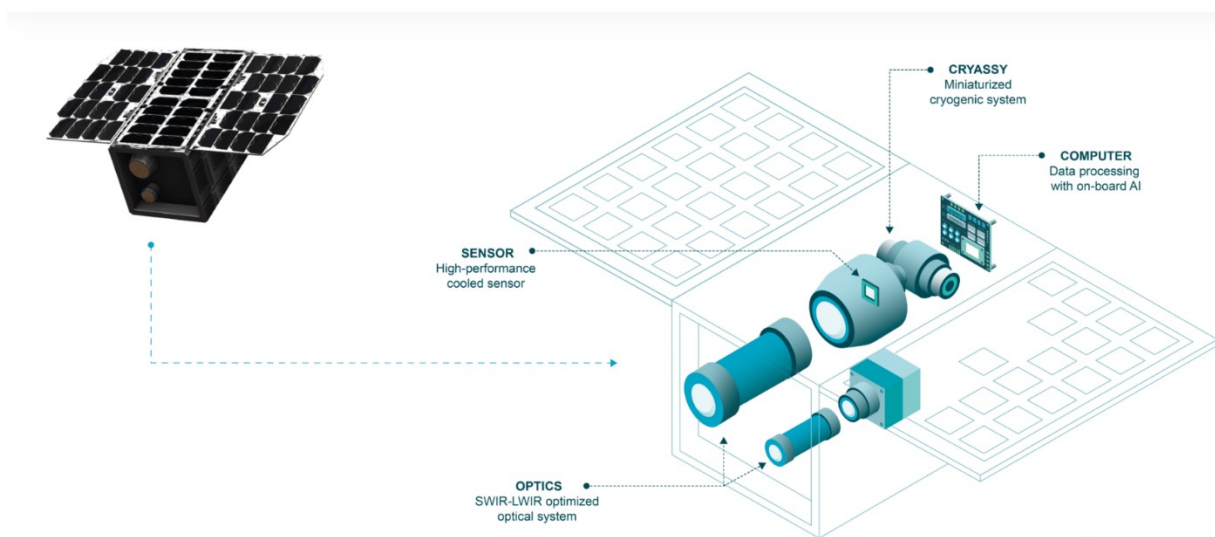
*Slika 33. Snimka emisija metana iz jezera pomoću hiperspektralne kamere Hyper-Cam [47]*



*Slika 34. Hiperspektralna kamera Hyper-Cam Airborne Mini [47]*

### 5.2.3.2. Sateliti za hiperspektralno snimanje emisija

Sateliti se koriste i za prikupljanje podataka o stakleničkim plinova. GOSAT (engl. *Greenhouse Gases Observing Satellite*) japanski je satelit za promatranje stakleničkih plinova metodom daljinskom istraživanja koji mjeri koncentracije na više od 56 000 točaka u atmosferi. NASA-in OCO2 (engl. *Orbiting Carbon Observatory-2*) satelit je koji motri količinu ugljikovog dioksida u atmosferi te prati njegove izvore. Prvi europski satelit za mjerenje emisije ugljikovog dioksida, MicroCarb, bit će lansiran 2024. godine. Među salitelitima za hiperspektralno snimanjem može se pronaći i satelit GESat, razvijen od tvrtke Absolut Sensing, koji se koristi za mjerenje emisija metana, budući da one dostižu rekordne razine. Omogućuje prikupljanje i obradu podataka u dugovalnom infracrvenom području u stvarnom vremenu i osigurava točne povratne informacije koje se mogu koristiti u civilne, vojne ili pak znanstvene svrhe. Uz senzor, optički i računalni sustav, sadrži i Cryassy, kriogeni sustav promatranja s vrlo niskim vibracijama i mogućnošću integriranja nekoliko linearnih detektora. (Slika 38.) Njegova tehnologija pokriva infracrveno zračenje od SWIR do LWIR pa tako i multispektralno i hiperspektralno snimanje podataka. [48]



Slika 35. Shema GESat satelita tvrtke Absolut Sensing [48]

#### 5.2.4. Toplinski senzori

Stefan-Boltzmannov zakon objašnjava odnos između temperature objekta promatranja i količine zračenja koje on emitira. [49] Matematički izražen kao

$$E = \sigma T^4$$

gdje je:

$E$  – maksimalna brzina zračenja ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ )

$T$  – temperatura objekta (K)

govori da svaki objekt čija je temperature iznad temperature apsolutne nule emitira infracrveno zračenje. Ovisno o temperaturi, emitirat će blisko infracrveno (NIR), kratkovalno infracrveno (SWIR) ili dugovalno infracrveno (LWIR) zračenje. Iako topliji objekti emitiraju kraće infracrvene valne duljine, većina zemaljskih objekata ima temperaturu koja emitira dugovalno infracrveno zračenje za što je potreban toplinski ili LWIR senzor. [45] Koriste se za istraživanje divljine budući da su mnoge životinje bolje vidljive preko LWIR senzora, no u praksi se pokazalo da snimanja toplinskim senzorom nisu moguća kada temperatura zraka prijeđe  $10\text{ }^\circ\text{C}$  jer zbog zagrijavanja drveća i terena dolazi do smanjivanja kontrasta pa samim time i otežane detekcije promatrane divljači. Toplinski senzori koji se koriste za nadzor često daju monokromatsku sliku budući da ona pruža najveći kontrast koji je potreban kod potrage za nestalim osobama ili pak za već spomenuto praćenje životinja, što i prikazuje slika 39. [50]



Slika 36. Divlje svinje snimljenje toplinskim senzorom [50]

## 6. ZAKLJUČAK

Besposadne letjelice mogu se koristiti za zadatke koje su do sada obavljale letjelice s posadom, ali uz znatno nižu cijenu, na nižim visinama, s manjim brzinama, manjim doprinosom onečišćenju zraka, manjom smetnjom zrakoplovnom prometu, a ujedno su i sigurnije za korištenje. Primjene besposadnih letjelica u posljednjih godina proširile su se na više područja zbog činjenice da su prikupljanje podataka i sama mogućnost integracije više senzora fleksibilniji način prikupljanja informacija od dosadašnjih. Iako su se do sada koristili NDIR senzori za mjerenje koncentracija onečišćujućih tvari, s razvojem tehnologije dolazi i do razvoja novih metoda mjerenja, poput EDAR-a, što ukazuje na konstantno istraživanje i razvoj. Zbog velikog utjecaja onečišćujućih tvari na okoliš i zdravlje ljudi, poput ugljikovih i dušikovih oksida, aromatskih ugljikovodika, lebdećih čestica i metana, besposadne letjelice za mjerenje emisija kao i senzori koje sadrže, sve su prisutniji i dostupniji, budući da su promjene klime uzrokovane onečišćujućim tvarima, poput globalnog zatopljenja, konačno zadobile pažnju šire javnosti koju zaslužuju.

## 7. LITERATURA

- [1] Službena internetska stranica Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) – Zagađenje zraka, [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1), 3.1.2023.
- [2] Steinhaus, T., Theim, M., Beidl, C., NO<sub>2</sub>-immission assessment for an urban hot-spot by modelling the emission–immission interaction, *Automotive and Engine Technology*, 2021, [https://www.researchgate.net/publication/352048048\\_NO2-immission\\_assessment\\_for\\_an\\_urban\\_hot-spot\\_by\\_modelling\\_the\\_emission-immission\\_interaction](https://www.researchgate.net/publication/352048048_NO2-immission_assessment_for_an_urban_hot-spot_by_modelling_the_emission-immission_interaction), 23.2.2023.
- [3] Samad, A., Alvarez Florez, D., Chourdakis, J., Vogt, U., Concept of Using an Aerial Vehicle (UAV) for 3D Investigation of Air Quality in the Atmosphere – Example of Measurements Near a Roadside, *Atmosphere*, 2022, <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/5/663>, 5.1.2023.
- [4] Službena internetska stranice Europske unije – Okoliš, [https://environment.ec.europa.eu/topics/air\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/air_en), 5.2.2023
- [5] Wikipedia – Kisele kiše, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kisele\\_ki%C5%A1e](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kisele_ki%C5%A1e), 23.2.2023.
- [6] Aliouche, H., What are the Health Effects of Exhaust Emissions?, <https://www.news-medical.net/health/What-are-the-Health-Effects-of-Exhaust-Emissions.aspx>, 9.1.2023.
- [7] Poplašen, D., Aromatski ugljikovodici - Izloženost i utjecaj na zdravlje, *Sigurnost* 57 (1) 65 – 67, 2015, 5.2.2023.
- [8] EVOMED – Što su PM čestice?, <https://evomed.hr/sto-su-pm-cestice/>, 5.2.2023.
- [9] Environmental Defence Fund – How Methane Impacts Health, <https://globalcleanair.org/methane-and-health/>, 23.2.2023.
- [10] Bonačić Bartolin, P., Kvaliteta zraka i utjecaj motornih vozila na nju, Istraživački seminarski rad, FSB, 2016, 5.2.2023.
- [11] World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index, <https://waqi.info/#/c/45.784/16.003/7.9z>, 5.2.2023.
- [12] Čavrak, M., Čarija, Z., Mrša Z., Modeliranje disperzije onečišćujućih tvari kao postupak za procjenjivanje industrijskim izvorima uzrokovanog zagađenja zraka, *Znanstveni članak*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2017, 6.2.2023.
- [13] Milošević Pujo, B., Hrvoje Radovan, H., Sprječavanje onečišćenja mora po MARPOL-konvenciji, „Naše more“ 52(5-6)/2005, 21.2.2023.

- [14] Wikipedia – MARPOL 73/78, [https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL\\_73/78](https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL_73/78), 21.2.2023.
- [15] The Shipowners' Club – Louise Hall: Sulphur requirements in IMO emission control areas, 2015., <https://www.shipownersclub.com/louise-hall-sulphur-requirements-imo-emission-control-areas/>, 21.2.2023.
- [16] Službene stranice IMO – Prevention of Air Pollution from Ships, <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/air-pollution.aspx>, 21.2.2023.
- [17] S. Fang and H. Wang, Optimization-Based Energy Management for Multi-energy Maritime Grids, Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping 11, [https://www.researchgate.net/publication/351040889\\_Introduction\\_to\\_the\\_Multi-energy\\_Maritime\\_Grids](https://www.researchgate.net/publication/351040889_Introduction_to_the_Multi-energy_Maritime_Grids), 21.2.2023.
- [18] Charan Kakarla, S., Ampatzidis Y., Types of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Sensing Technologies and Software for Agricultural Applications, AE565, 2021, <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE565>, 15.1.2023.
- [19] Službena stranica tvrtke DJI, <https://www.dji.com/hr/products/camera-drones#mavic-series>, 7.2.2023.
- [20] Službena stranica tvrtke Yuneec, <https://us.yuneec.com/about-us/>, 7.2.2023.
- [21] Službena stranica tvrtke Alpha Unmanned Systems, <https://alphaunmannedsystems.com/product/uav-helicopter-alpha-800/>, 7.2.2023.
- [22] Službena stranica tvrtke Jouav – Unmanned Aircraft System, <https://www.jouav.com/products/cw-25e.html>, 7.2.2023.
- [23] Službena stranica tvrtke Nordic Unmanned, <https://nordicunmanned.com/services/maritime/emission-monitoring/>, 8.2.2023.
- [24] Službena stranica tvrtke Flylogix, <https://www.flylogix.co.uk/services/methane/>, 8.2.2023.
- [25] EMSA – EMSA's remotely piloted aircraft are assisting Spanish authorities in actively monitoring sulphur emissions from ships transiting the busy Strait of Gibraltar, 2021., <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/press-releases/item/4533-emsa%E2%80%99s-remotely-piloted-aircraft-are-assisting-spanish-authorities-in-actively-monitoring-sulphur-emissions-from-ships-transiting-the-busy-strait-of-gibraltar.html>, 22.2.2023.
- [26] Službena stranica tvrtke Explicit, <https://www.explicit.dk/maritime/>, 22.2.2023.
- [27] Službena stranica tvrtke Air Q, <https://airq-ad.com/>, 22.2.2023.

- [28] Remote Sensing: Definition, Classification, Methods, <https://civilengineeringnotes.com/remote-sensing-definition-classification-methods/>, 18.1.2023.
- [29] Službene internetske stranice NASA-e – What is Remote Sensing?, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing/>, 9.2.2023.
- [30] Službene internetske stranice NASA-e – What are passive and active sensors?, [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt\\_passive\\_active.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html), 23.1.2023.
- [31] OES Data Analytics – Types Of Remote Sensing: Technology Changing The World, <https://eos.com/blog/types-of-remote-sensing/>, 23.1.2023.
- [32] SensorsONE – Radar Distance Sensing, <https://www.sensorsone.com/radar-distance-sensing/>, 22.2.2023.
- [33] Wikipedija – Radar, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Radar>, 23.1.2023
- [34] The National Science Foundation's National Ecological Observatory Network (NEON) – Lidar, <https://www.neonscience.org/data-collection/lidar>, 23.1.2023.
- [35] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – What is lidar?, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>, 23.1.2023.
- [36] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – What is sonar?, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sonar.html>, 23.1.2023
- [37] Stanford News – Stanford engineers combine light and sound to see underwater, <https://news.stanford.edu/2020/11/30/combining-light-sound-see-underwater/>, 9.2.2023.
- [38] CO2metar.com - How does an NDIR CO2 Sensor Work?, <https://www.co2meter.com/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>, 10.2.2023.
- [39] Wikipedia – Nondispersive infrared sensor, [https://en.wikipedia.org/wiki/Nondispersive\\_infrared\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Nondispersive_infrared_sensor), 10.2.2023.
- [40] Službena stranica tvrtke HEAT – <https://www.heatremotesensing.com/edar>, 23.2.2023.
- [41] Hager, J.S., Yerem G., Method and device for quantification of 50ase sin plumes by remote sensing, Patent No. US 8,654,335 B2, 2014, 23.2.2023.
- [42] NASA – Passive Sensors, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/passive-sensors>, 11.2.2023.
- [43] Jia, J., Sun, H., Jiang, C., Karila, K., Karjalainen, M., Ahokas, E., Khoramshahi, E., Hu, P., Chen, C., Xuel, T., Wang, T., Chen, Y., Hyypä, J., Review on Active and Passive Remote Sensing Techniques for Road Extraction, Remote Sens. 2021, <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/21/4235#>, 24.1.2023.

- [44] Wikipedia – Remote Sensing,  
[https://wiki.seg.org/wiki/User:JudySmith/Remote\\_Sensing](https://wiki.seg.org/wiki/User:JudySmith/Remote_Sensing), 24.2.2023.
- [45] GEONADIR – Types of environmental sensors for drones, <https://geonadir.com/types-environmental-sensors-for-drones/>, 11.2.2023
- [46] Hyspex - Understanding Forests from A Hyperspectral Glance,  
<https://www.hyspex.com/use-cases-application-notes/forestry-management/>, 11.2.2023.
- [47] Službena stranica tvrtke Telops, <https://www.telops.com/products/hyperspectral-cameras/>, 19.2.2023.
- [48] Službena stranica tvrtke Absolut Sensing, <https://absolut-sensing.com/>, 19.2.2023.
- [49] NASA - Correlation Between Temperature and Radiation,  
<http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/correlation-between-temperature-and-radiation.php>, 25.2.2023.
- [50] Tomljanović, K., Nosek, H., Pernar, R., Grubešić, M., Mogućnosti primjene lakih bespilotnih letjelica u prebrojavanju krupne divljači, Šumarski list, 2018, 18.2.2023.