

# Autonomni plovni objekti

---

**Pajković, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:012270>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**IVAN PAJKOVIĆ**

**AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI  
AUTONOMOUS VESSELS**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Upravljanje tehničkim sustavima

Mentor: Prof. dr. sc. Vinko Tomas

Komentor: dr. sc. Mile Perić

Student: Ivan Pajković

Studijski smjer: Brodostrojarstvo i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112072860

Rijeka, rujan 2023.

Student: Ivan Pajković

Studijski program: Brodostrojarstvo i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112072860

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA


Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom

Autonomni plovni objekti

izradio samostalno pod mentorstvom Prof. dr. sc. Vinko Tomas

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Ivan Pajković



Student: Ivan Pajković

Studijski program: Brodostrojarstvo i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112072860

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



## **SAŽETAK**

U diplomskom radu navedena je i opisana definicija autonomnih plovnih objekata. U radu se opisuje povijest razvoja autonomnih plovnih objekata do danas kao i buduća predviđanja. U radu su opisane tehnologije korištene na autonomnim plovnim objektima. Također je u radu opisana umjetna inteligencija koja upravlja upravo spomenutim tehnologijama. Nadalje, rad se dotiče teme sigurnosti i zaštite autonomnih plovnih objekata. Završno, rad opisuje legalan status autonomnih plovnih objekata.

Ključne riječi: autonomni brod, autonomija, tehnologija, umjetna inteligencija

## **SUMMARY**

In the thesis, the definition of autonomous maritime objects is stated and described. The paper provides an overview of the history of autonomous maritime object development up to the present day, as well as future predictions. The technologies used on autonomous maritime objects are described in the paper. Additionally, the paper discusses artificial intelligence that manages the aforementioned technologies. Furthermore, the paper touches on the topic of security and protection of autonomous maritime objects. Finally, the paper describes the legal status of autonomous maritime objects.

Keywords: autonomous ship, autonomy, technology, artificial intelligence

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>III</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA .....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	2
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5. STRUKTURA RADA .....	3
<b>2. DEFINICIJA AUTONOMIJE BRODOVA</b> .....	<b>4</b>
2.2. POVIJEST AUTONOMNIH BRODOVA U SJEVERNOJ AMERICI .....	13
2.3. AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI DANAS I SUTRA .....	17
2.4. KARAKTERISTIKE VELIKIH AUTONOMNIH BRODOVA .....	22
2.5. SISTEMSKA KOMPOZICIJA AUTONOMNIH BRODOVA .....	23
<b>3. KORIŠTENE TEHNOLOGIJE U AUTONOMNIM PLOVNIM OBJEKTIMA</b> .....	<b>26</b>
3.1. RADAR I LIDAR .....	27
3.2. VIZUALNI SENZORI .....	32
3.2.1. <i>Određivanje udaljenosti pomoću stereo kamera</i> .....	33
3.2.2. <i>Digitalne kamere za pomorsku upotrebu</i> .....	34
3.3. AUDIO SENZORI .....	36
3.4. AIS PRIJEMNICI .....	40
3.5. KLASIFIKACIJA KONTROLE POKRETA ZA AUTONOMNE BRODOVE ...	42
<b>4. UMJETNA INTELIGENCIJA AUTONOMNIH BRODOVA</b> .....	<b>47</b>
4.1. ZAHTJEVI ZA UMJETNU INTELIGENCIJU U SAS-U .....	49
4.2. INTERAKCIJA LJUDI S UMJETNOM INTELIGENCIJOM .....	50
4.3. VJERODOSTOJNA UMJETNA INTELIGENCIJA .....	51
4.4. TEHNIKE UMJETNE INTELIGENCIJE ZA AUTONOMNA PLOVILA I NJIHOVE POTEŠKOĆE .....	52



4.5. SVIJEST UMJETNE INTELIGENCIJE O VLASTITOJ SITUACIJI NA MORU.....	54
4.6. OTKRIVANJE I KLASIFIKACIJA POMORSKIH OBJEKATA .....	56
4.7. LOKALIZACIJA POMORSKOG OBJEKTA ZVUKOM .....	57
<b>5. SIGURNOST I ZAŠTITA AUTONOMNIH BRODOVA .....</b>	<b>59</b>
<b>6. LEGALAN STATUS AUTONOMNIH PLOVNIH OBJEKATA.....</b>	<b>66</b>
6.1. UNCLOS .....	66
6.2. JESU LI AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI BRODOVI? .....	69
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>72</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>73</b>

## **1. UVOD**

U današnjem sve brže mijenjajućem svijetu, tehnološki napredak oblikuje način na koji obavljamo mnoge svakodnevne aktivnosti. Automatizacija i autonomni sustavi postaju sveprisutni, mijenjajući način na koji se odvijaju industrijski procesi, promet, medicina, i mnoge druge djelatnosti. Jedno od područja koje se sve više istražuje i razvija su autonomni plovni objekti.

Autonomni plovni objekti predstavljaju revolucionarnu inovaciju u svijetu pomorstva i nautičke tehnologije. Ova plovila mogu se samostalno kretati, donositi odluke, izbjegavati prepreke i obavljati zadatke bez potrebe za ljudskom intervencijom na brodu. Oni predstavljaju sučelje između naprednih tehnologija, poput umjetne inteligencije, strojnog učenja, senzora, i klasičnih pomorskih sustava, te donose novu paradigmu u brodarstvu, akvakulturi, istraživanju oceana, sigurnosti i mnogim drugim sektorima.

### **1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA**

Glavni problem koji ovaj rad istražuje je koncept autonomnih plovnih objekata i njihova primjena u različitim industrijskim sektorima. Uz tehnološki napredak i porast interesa za automatizaciju, autonomni plovni objekti predstavljaju izazov i priliku za brojne industrije, uključujući pomorstvo, ribarstvo, istraživanje oceana, akvakulturu i druge sektore. Ovaj rad će istražiti ključne tehnologije, primjene, izazove i potencijalne koristi koje autonomni plovni objekti donose.

### **1.2. RADNA HIPOTEZA**

Sukladno bitnim odrednicama problema, predmeta i objekta istraživanja postavljena je radna hipoteza : Korištenje autonomnih plovnih objekata ima potencijal

značajno transformirati različite industrije, povećati njihovu učinkovitost, smanjiti operativne troškove i doprinijeti očuvanju okoliša, ali istovremeno postavlja izazove u regulativi, sigurnosti i društvenom prihvaćanju.

### **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Ciljevi i svrha istraživanja ovog diplomskog rada jesu:

- Istražiti koncept autonomnih plovnih objekata,
- Analizirati ključne tehnologije autonomnih plovnih objekata,
- Istražiti primjene autonomnih plovnih objekata u različitim sektorima,
- Identificirati izazove i rizike vezane uz autonomne plovne objekte,
- Razmotriti budućnost autonomnih plovnih objekata.

### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

U radu su korištenje sljedeće znanstvene metode:

- metoda deskripcije,
- metoda kompilacije,
- metoda komparacije,
- metoda sinteze i
- metoda analize.

Metoda deskripcije korištena je za opisivanje i definiranje pojma autonomnih plovnih objekata, njihovih karakteristika, primjena i tehnologija koje ih omogućuju. Metoda kompilacije je korištena za sakupljanje i organiziranje podataka iz različitih izvora. Metoda komparacije korištena je za usporedbu različitih tipova autonomnih brodskih plovila, njihovih tehnologija i primjena. Metoda sinteze je korištena za integraciju i

povezivanje različitih informacija i rezultata kako bi se stvorila cjelovita slika o temi. Metoda analize je korištena za detaljnu analizu ključnih tehnologija, izazova i prednosti tehnologije autonomnih brodskih plovila.

## **1.5. STRUKTURA RADA**

Diplomski rad podijeljen je u sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Definicija autonomije brodova
3. Korištene tehnologije u autonomnim plovnim objektima
4. Umjetna inteligencija autonomnih brodova
5. Sigurnost i zaštita autonomnih brodova
6. Legalan status autonomnih plovnih objekata
7. Zaključak

U prvom poglavlju se definira predmet i cilj istraživanja. Nakon toga slijedi drugo poglavlje gdje se definiraju autonomni plovni objekti kao i njihova podjela. U trećem poglavlju opisuju se sve tehnologije korištene u autonomnim plovnim objektima koje se koriste u navigaciji kao i kontrola pokreta autonomnih brodova. Četvrto poglavlje opisuje umjetnu inteligenciju autonomnih plovnih objekata kao i različite vrste te inteligencije, njenu interakciju s ljudima te njezine probleme i načine prepoznavanja ostalih pomorskih plovnih objekata. U petom poglavlju opisana je sigurnost autonomnih brodova u glede raznih napada na autonomni brod kao i zaštita istih od tih napada. Šesto poglavlje opisuje kako se razna pomorska pravila i konvencije odnose prema autonomnim brodovima u Svijetu. Sedmo poglavlje daje osvrt na cijeli rad te govori o prednostima i budućim izazovima koje donose autonomni plovni objekti.

## 2. DEFINICIJA AUTONOMIJE BRODOVA

Da bismo precizno procijenili autonomiju bespilotnog broda, potrebno je potpuno razumjeti pojam autonomije. Autonomija je sposobnost sustava da se upravlja samostalno donošenjem odluka, provođenjem odabranih izbora te provjerom razvoja takvih poduzetih akcija. Međutim, autonomni sustav sam donosi izbore. Nastoji postići svoje ciljeve lokalno, bez ljudske intervencije, čak i kad se suočava s neizvjesnošću ili neočekivanim događajima. Međutim, autonomni sustavi imaju automatski i automatizirani proces donošenja odluka.

Automatizacija se može smatrati najvišim stupnjem mehanizacije, a radi se o sposobnosti sustava da automatski obavlja procese ili izvodi radnje bez sudjelovanja operatora. Automatizirani sustav ne donosi odluke za sebe, već samo slijedi scenarij koji je već unaprijed kodiran. Autonomija u kontekstu autonomne robotike definirana je kao sposobnost sustava da donosi izbore, provodi svoje odluke primjenjujući akcije i procjenjuje rezultate takvih akcija. Stupanj autonomije je numerička vrijednost (realan broj) koja se daje autonomnim metrikama kako bi kvantitativno specificirala koliko autonomije sustav posjeduje [1].

U svijetu postoji čitav spektar različitih definicija razine autonomije sustava. Razina autonomije često se koristi za opis sustava do koje mjere on može samostalno djelovati. Brzi tempo promjena u autonomiji pomorskog sektora zahtijeva ažurirane i relevantne smjernice za vlasnike i operatere pomorskih autonomnih površinskih brodova.

Radna grupa za regulativu autonomnih sistema u pomorskom sektoru Velike Britanije ( Engl. Maritime UK Autonomous Systems Regulatory Working Group - MASRWG) je u studenom 2017. godine objavila prvi kodeks prakse koji je dobio globalno priznanje u industriji, a druga verzija je objavljena u studenom 2018. Iako nije pravni tekst, kodeks se koristi od strane proizvođača, pružatelja usluga i drugih kao dio njihovog svakodnevnog rada. Mnogi proizvođači su izvijestili da klijenti zahtijevaju usklađenost s kodeksom kao osnovu za pregovore o ugovorima. 'Maritime Autonomous Surface Ships (dalje: MASS) UK Code of Practice'

prepoznaje 6 razina autonomije broda koje se odnose na razine kontrole, kako je navedeno u tablici 1.

**Tablica 1: Definicije razine kontrole za pomorske autonomne površinske brodove prema "MASS UK Code of Practice".**

RAZINA	NAZIV	OPIS
0	S ljudskom posadom	plovilo upravljaju operatori na brodu.
1	rukovođeno	Pod nadzorom kontrole, sva kognitivna funkcionalnost kontrolira ljudski operator. Operator ima izravan kontakt s bespilotnim vozilom putem, primjerice, kontinuiranog radija i/ili kabela. Operator donosi sve odluke, usmjerava i kontrolira sve funkcije vozila i misije.
2	vođeno	Pod vođenom kontrolom neka razina zaključivanja i sposobnosti za odgovaranje implementirana je u bespilotnom vozilu. Ono može osjetiti okoliš, izvijestiti o svom stanju i predložiti jednu ili više radnji. Također može predložiti moguće radnje operatoru, poput traženja informacija ili donošenja odluka. Međutim, ovlast za donošenje odluka je kod operatora.
3	delegirano	Bespilotnom vozilu sada je dano ovlaštenje za izvođenje određenih funkcija. Može osjetiti svoje okruženje, izvijestiti o svom stanju, definirati radnje i izvijestiti o svojoj namjeri. Operator ima mogućnost protiviti se namjerama koje je izjavilo bespilotno vozilo tijekom određenog vremena, nakon čega će bespilotno vozilo djelovati.
4	Pod nadzorom	Bespilotno vozilo će osjetiti svoje okruženje i izvijestiti o svom stanju. Bespilotno vozilo definira radnje, donosi odluke, djeluje i izvještava o svojoj radnji. Operator može nadzirati događaje.
5	autonomno	Bespilotno vozilo će osjetiti svoje okruženje, definirati moguće radnje, donijeti odluku i djelovati. Autonomne funkcije pokreću se putem sustava na brodu u prigodama koje isti odabere, bez obavještavanja vanjskih jedinica ili operatora.

Izvor: Pripremio student prema: **The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats Andrzej Felski and Karolina Zwolak**

Također uz ove dvije ljestvice u novije vrijeme koristi se i ljestvica autonomije plovnih objekata od strane raznih klasifikacijskih društva, a jedna takva ljestvica globalno primjenjiva jest ona koju je izdala od strane Lloyd's Register u dokumentu "Cyber-enabled ships. ShipRight procedure-autonomous ships" objavljenog 2016. godine, prikazane u tablici 2: [3]

**Tablica 2: ljestvica autonomije brodova po Lloyd's Register-u [3].**

RAZINA	NAZIV	OPIS
AL 0	Ručno - bez autonomnih funkcija	Sve radnje i donošenje odluka izvode se ručno, tj. čovjek upravlja svim radnjama na razini broda. Napomena: sustavi na brodu mogu imati određeni stupanj autonomije, s "čovjekom u/na petlji
AL 1	Podrška odlučivanju na brodu	Sve radnje na razini broda provodi ljudski operator, ali alat za podršku u odlučivanju može prikazati opcije ili na drugi način utjecati na odabrane radnje
AL 2	Podrška odlučivanju na brodu i izvan broda	Sve radnje na razini broda provodi ljudski operator na brodu plovila, ali alat za podršku u odlučivanju može prikazati opcije ili na drugi način utjecati na odabrane radnje. Podaci mogu biti dostavljeni od strane sustava na brodu ili izvan broda, na primjer grafovi sposobnosti dinamičkog pozicioniranja, preporuke za konfiguraciju originalnih proizvođača opreme, ruta prema vremenskim uvjetima.
AL 3	'Aktivni' čovjek u petlji	Odluke i radnje na razini broda izvode se autonomno uz ljudski nadzor. Odluke koje imaju visok utjecaj implementiraju se na način koji omogućava ljudskim operatorima da interveniraju i prekorače ih. Podaci mogu biti dostavljeni od strane sustava na brodu ili izvan broda.
AL 4	Čovjek u petlji - operater/nadzornik	Odluke i radnje izvode se autonomno uz ljudski nadzor. Odluke koje imaju visok utjecaj implementiraju se na način koji omogućava ljudskim operatorima da interveniraju i prekorače ih.

AL 5	Potpuno autonomno	Nenadzirani ili rijetko nadzirani rad gdje odluke donosi i provodi sustav, odnosno utjecaj je na razini cijelog broda.
------	-------------------	--

Izvor: Pripremio student prema: **The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats Andrzej Felski and Karolina Zwolak**

Međunarodna pomorska organizacija (IMO), postavljajući okvir za regulativno obuhvaćanje vježbe 2018. godine, pristupila je ovoj klasifikaciji nešto drugačije, uzimajući u obzir mogućnost daljinski upravljanih brodova s posadom na brodu. Njihova ljestvica jest hijerarhijski najviša od svih navedenih.

**Tablica 3: Razina kontrole autonomnih plovni objekata prema IMO-u u okviru regulativnog istraživačkog obuhvata iz 2018. godine[3].**

<b>A</b>	<b>RAZIN</b>	<b>OPIS</b>
	1	Brodovi s automatiziranim procesima i podrškom za donošenje odluka.
	2	Brodovi s daljinskim upravljanjem i pomorcima na brodu.
	3	Brodovi s daljinskim upravljanjem bez pomoraca na brodu.
	4	Potpuno autonomni brodovi.

Izvor: Pripremio student prema: **The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats Andrzej Felski and Karolina Zwolak**

Također treba napomenuti da se razina kontrole većine bespilotnih brodova (ako ne i svih) može mijenjati tijekom operacije. Bratić i suradnici [5] također detaljno analiziraju različite interpretacije pojmova "autonomni" i "daljinski upravljani" brodovi, posvećujući pažnju pitanjima autonomije mehanizama broda i njegove pouzdanosti. Zapravo, bespilotni površinski brodovi testirani u stvarnim



uvjetima morskog okruženja danas se uglavnom ne kreću iznad razine 2 IMO klasifikacije.

Međutim, tempo razvoja i interes industrije za uvođenje autonomnih rješenja u operativne brodove toliko je visok da će samo relativno kratko vrijeme proći dok se ne uspostavi viša razina kontrole autonomnih brodskih plovila. Mogući izazovi i prijetnje s perspektive navigatora raspravljat će se u narednim poglavljima.

Nadalje postoje dvije vrste autonomije: pasivna autonomija i aktivna autonomija. Pasivna autonomija uključuje procjenu temeljenu na sposobnostima i određuje što autonomni plovni objekti potencijalno mogu autonomno raditi prema proizvodnji, bez uzimanja u obzir zadatka (misije s ciljevima).

Pasivni Stupanj autonomije određuje potencijalnu autonomiju besposadnih plovnih objekata dok aktivni Stupanj autonomije određuje autonomiju besposadnih plovnih objekata tijekom operacije. Aktivna autonomija uključuje procjenu temeljenu na ciljevima i određuje što besposadni plovni objekt potencijalno može autonomno raditi kada mu se dodijele zadaci (misija s ciljevima). Stoga klasifikacija autonomije na pasivnu i aktivnu autonomiju vodi do procjene dvaju različitih Stupnjeva autonomije i razina autonomije. Aktivni stupanj autonomije slijedi smjer utvrđen za prilagodljivu autonomiju gdje je razina autonomije varijabilna prema dodijeljenom zadatku [1].

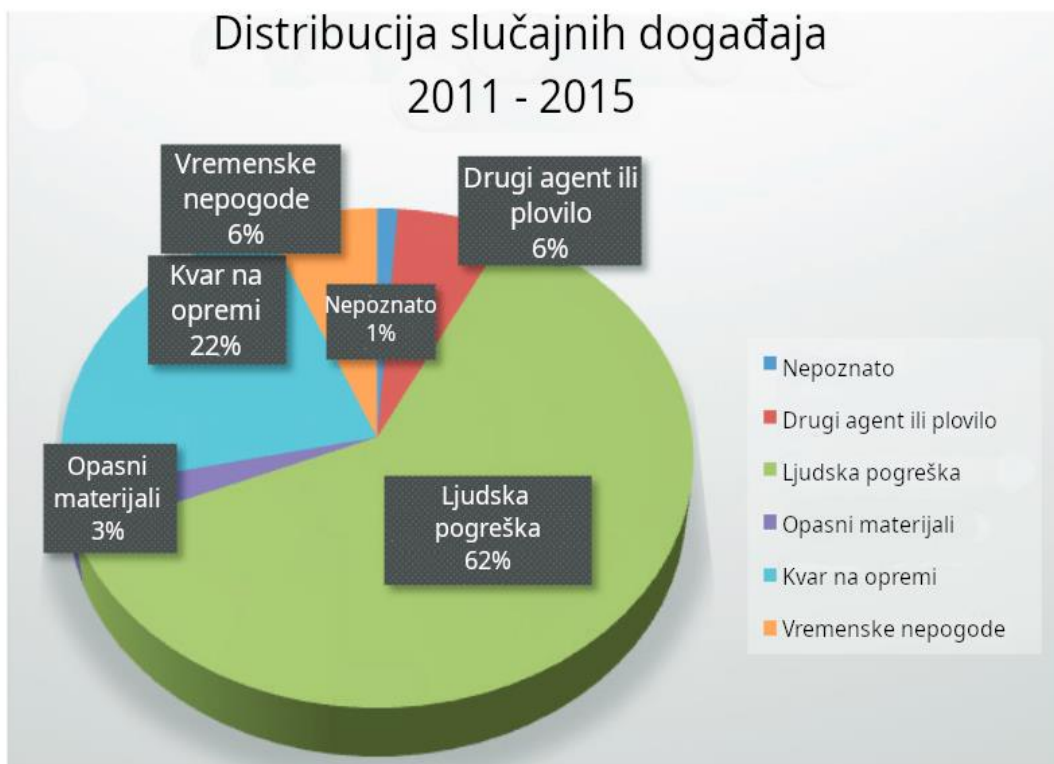
## **2.1.DEFINICIJA AUTONOMNIH PLOVNIH OBJEKATA**

Koncept daljinski upravljanih i autonomnih brodova datira još u 19. stoljeće, kada je uspostavljena ideja o autonomiji u pomorskom prometu. Ova ideja je opisana u patentu pod nazivom "Metoda i uređaj za upravljanje mehanizmom pokretnih brodova ili vozila". Iako koncept daljinski upravljanih i autonomnih brodova možda ne predstavlja novi koncept, njegova realizacija svakako jest. U posljednje vrijeme primijećen je brz napredak u vezi s realizacijom ovog koncepta. Istraživanje različite literature otkriva mnoge razloge za uvođenje ovog koncepta u pomorski sektor.

Utjecaji koje će ovi tipovi brodova imati mogu se samo pretpostaviti. Početno razdoblje eksploatacije trebalo bi odrediti prednosti i nedostatke njihovog uvođenja u pomorski promet. Trebali bi imati najveći utjecaj na tri aspekta:

- Financijski aspekt
- Sigurnost
- Zaštita okoliša

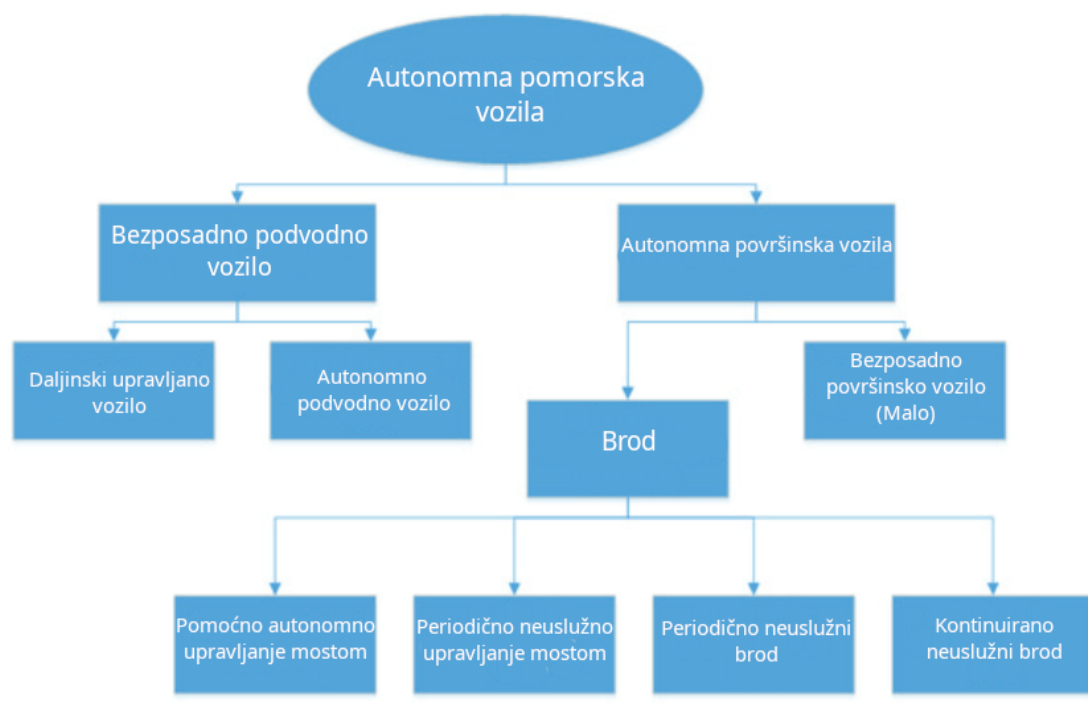
Sigurnost bi trebala biti od najveće važnosti. Slika 1 pokazuje da je od ukupno 880 slučajnih događaja analiziranih tijekom istraživanja, 62 % je bilo pripisano ljudskoj pogrešnoj radnji, koju je slijedilo otkazivanje opreme s udjelom od 22 %. Također je primijećeno da su brodske operacije predstavljale glavni doprinoseći faktor u 71 % ukupnih nesreća. Ti podaci ukazuju na pretpostavku da bi smanjenje ljudske aktivnosti u brodskim operacijama trebalo smanjiti vjerojatnost pojave nesreće.



**Slika 1: Disribucija slučajnih događaja [5].**

Istraživanje iz 2017. godine koje su proveli K.Wróbel, J. Matewka, P. Kujala podržava ovu pretpostavku [6]. Ovo istraživanje analiziralo je 100 nesreća koje su se dogodile od 1999. do 2015. godine. Cilj ovog istraživanja bio je procijeniti vjerojatnost pojave nesreće ako bi brod bio bez posade. Rezultati su pokazali da bi se vjerojatnost nasukavanja i sudara mogla značajno smanjiti, dok bi ozbiljne posljedice mogle nastati u slučaju nekih nesreća, poput požara na brodu.

Također, provedeno je istraživanje među operaterima brodova kako bi se utvrdio utjecaj tehnologije na sigurnost. Primijećeno je da što je veća razina automatizacije i tehnoloških procesa, manje je potrebno članova posade. Cilj viših razina tehnoloških procesa i automatizacije je poboljšati učinkovitost broda. Rezultat istraživanja doveo je do zaključka da promjene u organizaciji rada na brodu i napredak tehnologije mogu doprinijeti pojavi ljudske pogreške [7].



**Slika 2: Klasifikacija autonomnih plovih objekata [5].**

Izrazi "bez posade" i "autonomni" brodovi, iako imaju različito značenje, često se koriste kao sinonimi. Stoga je važno opisati upotrjebljene pojmove. Prema Rødsethu i Nordahlu, pojam "autonomni brod" odnosi se na brod koji može izvoditi skup definiranih operacija bez ili uz smanjen nadzor posade na mostu [8]. "Brod bez posade" odnosi se na brod na kojem posada može biti na brodu, ali nije prisutna na mostu za izvođenje ili nadzor funkcija broda. Slika 2 prikazuje klasifikaciju vrsta autonomnih brodova s pripadajućom terminologijom.

Pomorski autonomni površinski brod je privremeni termin predložen od strane Međunarodne pomorske organizacije (Engl. International maritime organization, dalje: IMO) te je to razlog zašto se ovaj termin često može koristiti kao opći izraz za upućivanje i definiranje autonomnog broda. Analiza terminologije pruža osnovu za sveobuhvatan pristup.

Bespilotna pomorska vozila su vozila koja su sposobna za kontrolirano, samopogonjeno kretanje u vodi bez ikakvog osoblja na brodu. Neke od ovih vozila prelaze površinu vode; to su bespilotni površinski brodovi. Drugi djeluju ispod površine vode, izlazeći na površinu samo prilikom oporavka i kad je potrebno prenositi podatke i primati upute; to su bespilotna podvodna vozila. Neke bespilotne pomorske brodove kontroliraju osobe na obali.

Ponekad se to radi upotrebom radiokomunikacija i putem globalnog sustava pozicioniranja (GPS) koordinate koje prenosi bespilotno pomorsko vozilo. Drugi bespilotni pomorski brodovi se kontroliraju pomoću sofisticiranih satelitskih komunikacijskih sustava poput iridijuma kako bi se bespilotno pomorsko vozilo kontroliralo preko horizonta. Daljinski upravljač ima pregled pozicioniranja bespilotnog pomorskog vozila na elektroničkoj karti, prima informacije i očitavanja s instrumenata na brodu bespilotnog pomorskog vozila, a može ga dodatno podržati kamerama i zvučnim sensorima na trupu ili šasiji bespilotnog pomorskog vozila koji prikazuju okolicu bespilotnog pomorskog vozila natrag obali.

Zbog ograničene brzine komunikacije, postoji mali zastoj, možda nekoliko sekundi, između očitavanja bespilotnog pomorskog vozila i vremena kada ih operater prima. Slično tome, postoji zastoj između trenutka kada operater daje nalog bespilotnom pomorskom vozilu i vremena kada ga bespilotno pomorsko vozilo primi

i djeluje prema nalogu. Slični zastoji vrijede i za snimke uživo okoline bespilotnog pomorskog vozila.

Drugi bespilotni pomorski brodovi su umjesto toga unaprijed programirani da izvrše unaprijed određenu nautičku rutu, potencijalno bez ikakvog ljudskog posredovanja. Oni se oslanjaju na kombinaciju senzora, uključujući radar. Podaci primljeni sa senzora obrađuju se i izvršavaju se putem naredbi koje pružaju algoritmi sustava za izbjegavanje sudara različite složenosti. Ovaj način se naziva "autonomni rad". Između autonomnog rada i daljinskog upravljanja postoje i druge razine autonomije. Također je moguća kombinacija metoda upravljanja. Na primjer, bespilotno pomorsko vozilo se može daljinski upravljati do određene lokacije, nakon čega se može staviti u autonomni način rada kako bi obavio istraživanje.

Trenutna industrijska upotreba bespilotnih pomorskih vozila uglavnom vrši tri glavne funkcije: primjenjuju se u istraživačkim aktivnostima, u znanstvenim istraživanjima mora i obrani te sve više u sektorima na moru. U kontekstu znanstvenih istraživanja mora, bespilotna pomorska vozila se koriste u širokom rasponu operacija, od rutinskog kartiranja morskog dna do istraživanja najekstremnijih dijelova oceanskog okruženja, uključujući ispod ledenih pokrivača na polovima.

U vojnom kontekstu se također koriste u raznim mornaričkim operacijama, uključujući misije nadzora i izviđanja te protumjere za protiv brodske mine. U sektoru na moru, bespilotna pomorska vozila se koriste u sektoru nafte i plina, posebno u potrazi za neživim podmorskim resursima za eksploataciju, kao i u održavanju cjevovoda i velikih instalacija na moru. Bespilotni površinski brodovi se trenutno koriste u izazovnim operacijama koje su ograničene na područja gdje postoji mali rizik od sudara s drugim plovilima i koje su ili pažljivo nadzirane, u mornaričkom i sektoru na moru, ili su inače suviše udaljene da bi predstavljale rizik za druge korisnike mora, u slučaju morskih istraživanja [4].

## 2.2 POVIJEST AUTONOMNIH BRODOVA U SJEVERNOJ AMERICI

Drugi svjetski rat vidio je prva eksperimentiranja s besposadnim plovnim objektima. Kanađani su prvi razvili koncept COMOX torpeda 1944. godine kao besposadni plovni objekt koncipiranog prije invazije na Normandiju kako bi postavljao dim tijekom invazije – poput zamjene za zrakoplove. COMOX je dobio oznaku torpeda jer je mogao biti programiran samo da slijedi fiksnu rutu. Iako COMOX nije bio upotrijebljen, vozilo je izrađeno i uspješno je testirano.

U isto vrijeme, američka mornarica razvila je i demonstrirala nekoliko vrsta "Demolition Rocket Craft" namijenjenih čišćenju mina i prepreka u obalnom pojasu. "Porcupine," "Bob-Sled" i "Woofus 120" bili su varijacije pretvorenih desantnih plovila koja su nosila različite konfiguracije raketa za čišćenje mina. Besposadno djelovanje bilo je dio koncepta, iako nije poznato koji, ako ikoji, od ovih vozila su bili demonstrirani kao autonomna plovila.

Nakon rata, primjene besposadnih plovnih objekata su se proširile, s američkom mornaricom koja je koristila bespilotne brodove za prikupljanje uzoraka radioaktivne vode nakon atomske bombe eksplozija Able i Baker na atolu Bikini u 1946. godini. Projekt DRONE Američkog laboratorija za obranu od mina u 1950-ima konstruirao je i testirao daljinski upravljani čamac za čišćenje mina 1954. godine.

Do 1960-ih godina, Mornarica je koristila ciljne drone brodove bazirane na daljinski upravljanim "avijacijskim spasilačkim" čamcima za vježbanje ispaljivanja raketa, a 'Ryan Firefish' ciljni drone brod je korišten za obuku gađanja topovima razarača. Slično kao kod bespilotnih letjelica, razvoj i upotreba ciljnih drone autonomnih plovnih objekata su se nastavili i razvijali tijekom godina [2].

I dok bespilotna površinska vozila datiraju još od Drugog svjetskog rata, tek je u 1990-ima došlo do velikog širenja projekata [3]. To je djelomično rezultat tehnološkog napretka, ali i potaknuto promjenom paradigme američke mornarice s puno većim fokusom na obalno ratovanje i misije protiv terorizma. Godine 2001., Ured za istraživanje mornaričkih poslova SAD-a predložio je koncept Obalnog borbenog broda. Obalni borbeni brod je optimiziran za fleksibilnost u obalnom

području kao sustav koji se može prekonfigurirati za različite misije, kako vođene tako i nevođene.

Obalni borbeni brod postiže svoj učinak množitelja sile združenih snaga putem upotrebe bespilotnih letjelica, površinskih i podvodnih vozila. Pametno nevođeno površinsko vozilo visoke brzine jasno se spominje u Obalnim borbenim brodovima zajedno s nevođenim podvodnim vozilima i bespilotnim letjelicama čini sustav nevođenog borbenog sustava. Sustav nevođenog borbenog sustava može zadovoljiti potrebe mornarice za pristupačnim, učinkovitim i tehnički ispravnim višenamjenskim sustavima sposobnim za razmještaj diljem svijeta za obalno ratovanje.



Mobile Ship Target (MST)



QST 33



QST-35/35A SEPTAR



High Speed Maneuverable Seaborne Target (HSMST)

**Slika 3: Autonomni plovni objekti američke mornarice ranih 1970-ih [2].**

Uspješne misije autonomnih plovnih objekata tijekom Drugog zaljevskog rata povećale su interes unutar američke mornarice za iste, a nekoliko modernih mornarica je slijedilo isti primjer. Autonomni plovnih objekti imaju potencijal, a u nekim slučajevima i demonstriranu sposobnost, smanjenja rizika za vojnike s posadom, obavljanja zadataka koje vođena vozila ne mogu obaviti, pružanja potrebne multiplikacije sile za suočavanje s tom prijetnjom i nastavak izvršavanja naših misija, i to na način koji je ekonomičan. Potencijalne misije autonomnih plovnih objekata mogu se kretati od malih uređaja za prikupljanje podataka veličine torpeda do velikih nevođenih brodova.

Od ranih 1970-ih američka mornarica je koristila nekoliko autonomnih plovnih objekata kao ciljne drone, uključujući Mobile Ship Target (MST), QST-33 i QST-35/35A SEPTAR ciljne drone, te High Speed Maneuverable Seaborne Target (HSMST).

Spartan Scout bespilotnog broda razvijen je 2002. godine od strane Američkog pomorskog centra za podvodni rat u Newportu, Rhode Island, u suradnji s tvrtkama Radix Marine, Northrop Grumman i Raytheon. Francuska mornarica i Singapurska mornarica također su se pridružile SPARTAN programu Američke mornarice 2003. godine. Osnovna svrha Spartan Scout bespilotnog broda bila je poboljšati sposobnosti ranog upozoravanja, upotrijebiti ga za izvidničke akcije te zaštitu protiv asimetričnih prijetnji. Cilj mu je bio potvrditi učinkovitost bespilotnih senzora i oružja uz minimiziranje ljudske uključenosti kako bi se smanjio rizik od gubitka života.

Spartan Scout bespilotni brod temelji se na komercijalnoj platformi od 7 metara s tvrdim napuhavanjem, koja teži dvije tone. Plovilo se može opremiti modularnim paketima za minsko ratovanje, zaštitu snaga, zaštitu luka, precizne udare protiv površinskih i kopnenih ciljeva, te možda protupodmorničkim ratovanjem.

Prototip Spartan Scout-a uspješno je lansiran i daljinski upravljani u Perzijskom zaljevu USS Gettysburg u prosincu 2003. godine. Početkom travnja 2005., Spartan Scout je izveo prvo testiranje s vatrom na daljinski upravljanoj bespilotnoj plovilici na Aberdeen Proving Grounds, Maryland. Tijekom testiranja, ispalio je daljinski upravljani mitraljez kalibra 12,7 mm sa visokom preciznošću dok se kretao po otvorenoj vodi.



Jedino osoblje potrebno za rukovanje Spartanom tijekom operacija je posada od dva člana koja ga lansiraju i vraćaju. Spartan se kontrolira putem podatkovne veze putem tri prijenosna računala u centru za borbeni smjer krstarice. Slika 4 prikazuje demonstraciju kako se daljinski upravlja modificiranom Spartan autonomnom plovilu.



**Slika 4: Autonomni brod Spartan Scout [2].**

Ovaj bespilotni brod sudjelovao je u operacijama "Enduring Freedom" i "Iraqi Freedom" te drugim borbenim misijama u Arapskom zaljevu. Mornarica vidi Spartanu kao nisko potrošno sredstvo za proširenje područja pomorske patrole i pružanje zaštite protiv terorizma za brodove i druge flotne resurse protiv malih, jurišnih neprijateljskih brodova i mina. Spartan je jedan od potencijalnih borbenih

sustava za novu klasu borbenih brodova Američke mornarice koja koristi zamjenjive module misija za izvođenje različitih zadataka [2].

### 2.3 AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI DANAS I SUTRA

Danas, autonomni plovni objekti su u fazi testiranja i poboljšanja. Klase autonomnih plovnih objekata su prikazane u tablici ispod, preuzetu iz kodeksa "MASS UK Code of Practice".

**Tablica 4: Reprezentativni brodovi u razvoju autonomnih brodova.**

<b>Klasa broda</b>	<b>Karakteristika</b>
<b>Ultra lagani</b>	Veličina ispod 7 metara
<b>Lagani</b>	Veličina između 7 i 12 metara
<b>Mali</b>	Veličina između 12 i 24 metara
<b>Veliki</b>	Veličina iznad 24 metara
<b>Velikih brzina</b>	Radna brzina $V$ nije manja od $V = 7.19 \nabla^{1/6}$ čvorova, gdje je $\nabla$ = Volumen oblikovane disperzije, u m <sup>3</sup> , plovila koji odgovara projektiranoj vodenoj liniji.

Izvor: Pripremio student prema: "MASS UK Code of Practice".

Prema težini bespilotnih površinskih vozila, mogu se podijeliti na:

- male (<1 tona),
- srednje (<1000 tona),
- velike (<1000 tona)
- super velike (>1000 tona) [2].

Razvoj autonomnih plovnih objekata prolazio je kroz različite faze, od automatizacije strojarnice do samonavigacije i automatskog izbjegavanja prepreka, što predstavlja pojavu embrionalnog oblika pametnih brodova, te se potom razvija prema potpunoj automatizaciji uzimajući u obzir upravljanje energetskom učinkovitošću. Autonomni brodovi se razvijaju prema fazi sveobuhvatnih pametnih brodova [9].

Trenutno su se već pojavili prvobitni bespilotni brodovi. U ovom radu, prema kronološkom redosljedju, prebrojavaju se reprezentativni brodovi od početka embrionalnog razvoja u 1960-ima, te se formira sljedeća tablica. Tablica može jasno prikazati tijek razvoja samostalnih brodova i trend budućeg razvoja.

**Tablica 5: Reprezentativni brodovi u razvoju autonomnih brodova.**

GODINA	REGIJA	BROD	OSOBINE
1964	Japan	"SELEM DAM 65"	Centralizirano upravljanje strojarnicom, daljinsko upravljanje motorom na mostu za navigaciju.
1970	Japan	"Starlight Maru"	Kontrola i upravljanje cijelim brodom postignuta je putem različitih pod rutina i sučelja.
1985	Kina	"Berlin Express"	Automatski sustav upravljanja, automatski navigacijski sustav, centar za upravljanje brodom, sveobuhvatno upravljanje cijelim brodom postignuto je putem računalnog sustava.
2008	Kina	"Tianxiang No. 1"	Inteligentna navigacija, pretraga radara, satelitske aplikacije, obrada i prijenos slika
2012	EU	MUNIN	Autonomni brod
2012	Kina	Autonomni brod	Besposadna tehnologija upravljanja robotom, tehnologija automatske navigacije, ultrazvučna tehnologija inteligentne zaštite zida, tehnologija

			stvarnog vremena komunikacije putem 3G mreže / GPRS-a.
2014	UK	"Mayflower"	Autonomni trimaran.
2016	Kina	Autonomni brod	Bezuvjetna automatska plovidba i izbjegavanje rizika, daljinske izviđačke operacije, profesionalno opremanje tereta, prijenos videa u 360 stupnjeva, glasovna komunikacija.
2016	Norveška	"Hronn"	Autonomni brod.
2016	USA	"Sea Hunter"	
2017	Kina	"Da Zhi"	Inteligentna navigacija, inteligentna strojarnica, inteligentno upravljanje energetsom učinkovitošću.
2018	Norveška	Yara Birkeland	Autonomni električni kontejnerski brod.
2020	Europa	One Sea	Neovisna kontrola morskog ekosustava od strane poduzeća, potpuno daljinsko upravljanje.
2020	UK	Rolls-Royce	Daljinsko upravljani autonomni brod.
2025	Europa	One Sea	Autonomno komercijalno djelovanje.
2035	UK	Rolls-Royce	Autonomni trgovački brod za oceanske plovidbe.

Izvor: Pripremio student prema: **Marine Autonomous Surface Ship - A Great Challenge to Maritime Education and Training Wang Deling, Wu Dongkui\*, Huang Changhai, Wu Changyue**

Mostovi mogu biti skupi i djelovati kao prepreka za morski promet. Električni trajekt može biti alternativa. Može biti jeftiniji od mosta i ima niski ekološki utjecaj. Na Norveškom sveučilištu znanosti i tehnologije razvijaju autonomni trajekt nazvan Milli Ampère. To je mali trajekt koji prelazi Ravnkloa i Vestre Kanalhavn u Trondheimu s najmanje 12 putnika [10]. To je kratko putovanje manje od 100 metara

i trajat će samo jednu minutu, ali putnici će biti pošteđeni 10-15 minuta hoda vožnjom trajektom [11].

Rolls-Royce Commercial Marine i globalni operater tegljenja Svitzer uspješno su razvili prvi komercijalni brod koji se može upravljati udaljeno [12]. Demonstracija je održana početkom 2017. u luci Kopenhagen u Danskoj, a razvoj je dio projekta SISU. Tegljač nazvan Svitzer Hermod izvodio je više manevara pod daljinskim upravljanjem.

Kapetan upravlja tegljačem iz Centra za udaljeno upravljanje. Rolls-Royce Commercial Marine također je razvio autonomni trajekt u suradnji s finskom državnom kompanijom za trajekte Finferries [13]. Auto trajekt Falco je prvi potpuno autonomni trajekt na svijetu i plovi u arhipelagu južno od grada Turku u Finskoj. Tijekom demonstracije, Falco je autonomno plovio između Parainenena i Nauvoa te je bio udaljeno upravljan na povratnom putovanju.

U lipnju 2022. godine autonomna verzija Mayflowera prešla je Atlantik 400 godina nakon što je originalni Mayflower to učinio. Plovio je iz Plymoutha u Velikoj Britaniji do Plymoutha u Massachusettsu, SAD, a putovanje je trajalo oko dva tjedna. Ovaj potpuno autonomni brod razvija istraživačka organizacija Promare, američka informacijska tehnološka tvrtka IBM i Sveučilište u Plymouthu, Velika Britanija. Mayflower koristi vjetar i solarnu energiju kao izvore energije, a za slučaj nužde ima i rezervni dizelski generator.

Tri istraživačka modula nose brod. Sadrže senzore i znanstvene instrumente kako bi se bolje razumjela karta razine mora, kibernetička sigurnost pomorske plovidbe, oceanske plastike i praćenje morskih sisavaca. Uzorci vode prikupljeni tijekom prelaska analizirani su na Sveučilištu u Plymouthu.



**Slika 5: autonomni brod Mayflower, izvor: <https://mas400.com/>, posjećeno 22.07.2023**

Osim ovih područja istraživanja, brod je aktivna testna platforma za algoritme strojnog učenja i umjetne inteligencije za izbjegavanje sudara. Kongsberg ima značajno iskustvo s autonomnim sustavima. Na primjer, razvili su električno autonomno podmorničko vozilo nazvano Hugin. Hugin je suradnja između Kraljevske norveške mornarice, Norveškog istraživačkog instituta za obranu, Kongsberga i Statoila, a započeo je 1995. godine. Može provoditi oceanografska i morsko-geološka istraživanja, inspekciju geofizičkih lokaliteta, cjevovoda i podmorske strukture te ekološko praćenje. To se može obaviti pod nadzorom, poluautomatski ili autonomno na dubinama do 6000 metara. Na primjer, koristi se za traženje mina na morskom dnu.

Yara Birkeland imat će istu "inteligenciju" kao i Hugin. Ostala autonomna podvodna vozila koja je razvila Kongsberg su Munin i Remus. Kongsberg Maritime,



također nazvan KM, razvija i drugi autonomni brod. To je suradnja s Askom, a brod koji razvijaju naziva se AutoBarge.

Projekt će rezultirati s dva autonomna, električna i nulte emisije vozila koja će prelaziti fjord Oslo. AutoBarge će moći prevoziti 16 poluprikolica i zamijeniti 150 kamionskih putovanja dnevno između Mossa u Østfoldu i Holmestrandu u Vestfoldu. To će rezultirati smanjenjem emisije CO<sub>2</sub> i poboljšanjem gužvi i sigurnosti na cestama. Svako od vozila ima ugrađenu redovitu pilotsku kabinu, ali će kasnije biti nadzirano iz Centra za upravljanje s obale, baš kao i Yara Birkeland [14].



**Slika 6: autonomni brod Yara Birkeland, izvor: <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/> posjećeno 22.07.2023.**

#### **2.4. KARAKTERISTIKE VELIKIH AUTONOMNIH BRODOVA**

Veliki autonomni brod opisan u ovom radu odnosi se na brod dulji od 150 metara prema IMO standardima za izgradnju brodova, koji se trenutno nalazi u fazi

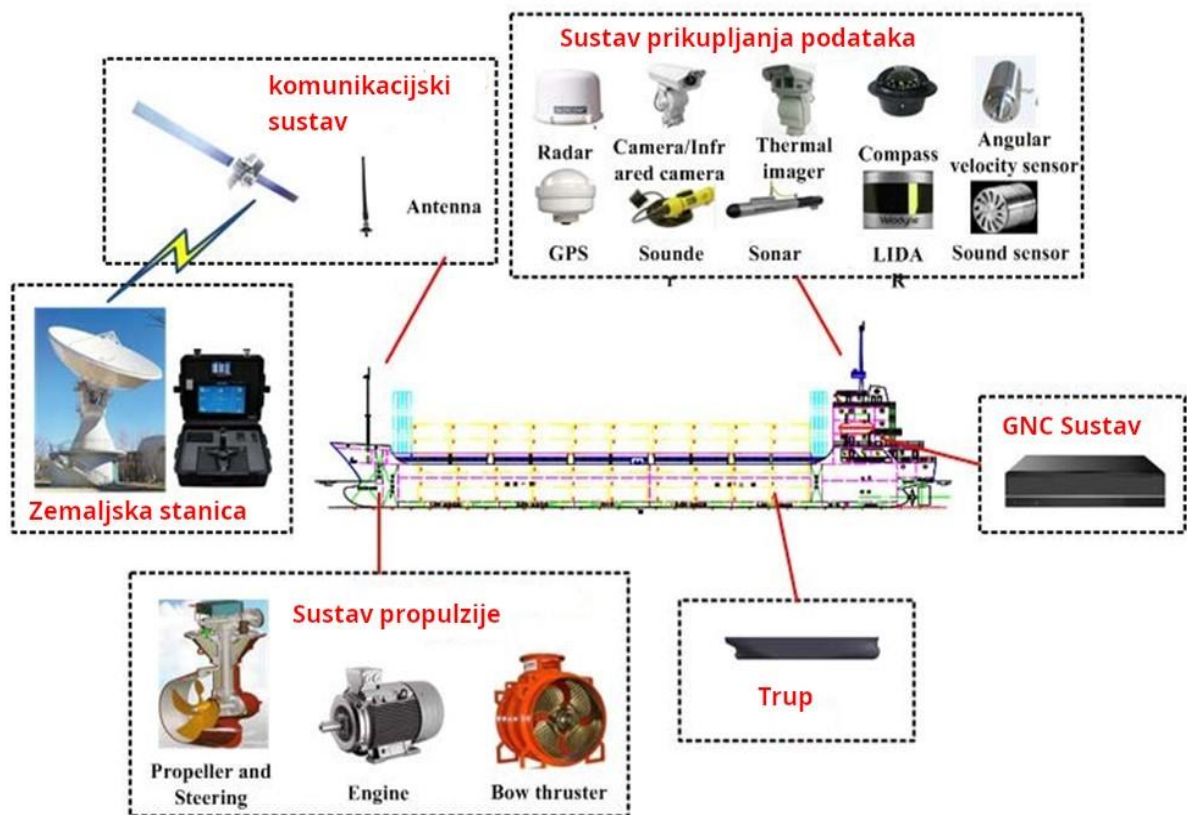
postupnog istraživanja. Istraživanje velikih konvencionalnih brodova usmjereno je na strukturu i upravljivost modela trupa, kontrolu pogona i energetskog sustava, analizu rizika i slično. Međutim, istraživanje kontrole kretanja u upravljanju kursom, pristajanju i praćenju putanje uglavnom se koncentrira u fazi simulacije i provjere. Bez obzira radi li se o velikim autonomnim brodovima ili konvencionalnim transportnim brodovima, karakteristike upravljivosti velikih brodova su sljedeće:

- Velika masa, velika inercija, dug hod, spor nestanak preostale brzine. Kada brod tek zaustavi, brzina broda brzo opada zbog velikog otpora. Međutim, kako brzina broda opada, otpor broda se smanjuje sukladno tome. Teže je potpuno zaustaviti brod. Općenito, kada brzina broda iznosi 3–4 čvora, nema učinka kormila, pa je performansa izvanrednog zaustavljanja loša.
- Loša sposobnost okretanja. Zbog svoje veličine, upravljanje kormilom ima određenu brzinu okretanja kormila, pa su stabilnost kursa i odziv slabi.
- Slaba reakcija kutova kormila. Kut kormila manji od  $5^\circ$  ima malo utjecaja i mora se korigirati s velikim kutom kormila.
- Osjetljivost na vanjske smetnje. S obzirom na veličinu broda, površina broda iznad vodene linije utječe na vjetar, a utjecaj struje se povećava. Kad veliki brod podnosi bočne vjetrove, njegova brzina klizanja može doseći 4–5% brzine vjetra[15].

## **2.5. SISTEMSKA KOMPOZICIJA AUTONOMNIH BRODOVA**

Struktura sustava autonomnih brodova prikazana je na slici ispod.





**Slika 7: Struktura sustava autonomnih brodova**

Ona koristi pogonski trup kao platformu, nosi komunikacijsku opremu, upravljačku opremu i posebnu funkcionalnu opremu te ostvaruje daljinsku kontrolu broda putem kopnenih baznih stanica ili središnjeg kontrolnog centra broda. Sustav autonomnog broda uglavnom je podijeljen na tri dijela: brodsku stanicu, obalnu stanicu i komunikacijski sustav. Među njima, brodska stanica uključuje strukturu trupa, pogonski sustav i energetske sustav, sustav za prikupljanje podataka te GNC (Engl. guidance navigation and control system – vođeni navigacijski i kontrolni sustav, dalje: GNC) sustav.

GNC sustav je jezgra sustava za upravljanje kretanjem autonomnih brodova i kontrolira rad brodova. Dobar GNC sustav ključan je za sigurnu i autonomnu navigaciju brodova. Nadalje, inteligencija autonomnog broda ne ogleda se samo u

korištenju različite napredne navigacijske opreme. Njezina svrha je omogućiti brodovima sposobnost opažanja, razmišljanja i rješavanja problema kao što to čini ljudska bića, što je jedna od ključnih i teških točaka za budući razvoj [15].

### **3. KORIŠTENE TEHNOLOGIJE U AUTONOMNIM PLOVNIM OBJEKTIMA**

Autonomni sustavi sastoje se od elemenata percepcije i kontrole. Na brodu, elementi percepcije uključuju pozicioniranje broda, RADAR i druge senzore koji skeniraju okolinu, dok elementi kontrole uključuju, na primjer, sustave za pogon i upravljanje. Kontrolni sustavi za manevriranje brodovima su dobro razvijeni, tako da se čak i najzahtjevnije potrebe za pogonom mogu zadovoljiti s tzv. azimutnim potisnicima. Svaki potisnik uključuje (često električni) motor i propelere u podložnom podu [16]. Ovi azimutni potisnici mogu se rotirati bez ograničenja za 360 stupnjeva oko nazvanog kuta, omogućujući čak i najvećim brodovima da brzo i sigurno uđu u uske luke.

Osim toga, kada se Globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS) integrira s kontrolnim sustavom u takozvani dinamički sustav pozicioniranja (DP), brod može djelovati protiv okolišnih sila koje djeluju na njega kako bi održao svoj položaj i smjer što je moguće bliže svom radnom položaju (bez sidra) ili može stabilno ostati na kursu umjesto da ga odnesu promjenjivi vjetrovi i valovi [17]. Za razliku od ovih prilično sofisticiranih kontrolnih sustava, integrirani sustavi percepcije za pomorsko okruženje još uvijek su nedovoljno razvijeni za autonomne operacije. Potrebno je nadopuniti dobro razvijene tehnike RADAR-a i GNSS-a drugim sensorima percepcije i višesenzorskim fuzijama putem umjetne inteligencije (AI).

Ključne prednosti višesenzorskih sustava percepcije su povećana dostupnost i integritet putem komplementarnog osjetila, tj. ciljevi koji se ne mogu otkriti jednim senzorom mogu biti otkriveni drugim senzorom, i redundancija, tj. promatranje se može križno provjeriti iz različitih izvora. Dok su višesenzorski sustavi percepcije dobro poznati u kontekstu autonomnih automobila, mobilnog kartiranja, daljinskog istraživanja zrakoplovima i bespilotnim letjelicama i robotike, pomorski kontekst je dobio manje pažnje.

To je zato što je istraživanje u području pomorskih sustava percepcije otežano zbog više faktora. Pomorska klima je teška, pogotovo u polarnim regijama. Oštra

klima čini pomorsko okruženje manje privlačnim za početna istraživanja senzora, budući da se senzorski sustavi moraju razvijati izvan prvih eksperimentalnih faza kako bi bili otporni na vremenske uvjete. Izvođenje istraživačkih eksperimenata na brodu može postati neprihvatljivo skupo ako ometa normalne operacije broda. Sustavi broda zaštićeni su vlasničkim sučeljima, što znači da pristup podacima zahtijeva podizvođenje i takvi podaci su rijetko jeftini. Tradicionalni pristup kibernetičkoj sigurnosti brodova, što je u mnogim slučajevima još uvijek norma za vlasnike brodova koji brinu o sigurnosti, temelji se na principu da su brodski sustavi izolirani od interneta i brodskih sustava kompanije.

Čak i kada se patentnom sučelju može pristupiti, prijenos podataka obično je serijski podatak i jednosmjernan. Pomorski protokoli sigurnosti i sustavi upravljanja sigurnošću kompanija (SMS) također postavljaju granice za eksperimentalnu brodsku instrumentaciju, budući da funkcionalnost ugrađenih sustava mora biti zajamčena. Međutim, ti čimbenici nisu obeshrabrivali istraživačku zajednicu da započne istraživanja u ovom području. Bijela knjiga inicijative Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) koju predvodi Rolls Royce [18] navodi niz senzora percepcije sa snagama i slabostima. Također prikazuje futurističku viziju manifestacije autonomnih brodova.

U posljednjim godinama, algoritmi umjetne inteligencije postigli su ogroman uspjeh kako u akademskom tako i u industrijskom sektoru. Stoga je prirodno tražiti primjenu AI tehnika i u problemima autonomne navigacije brodova i fuziji senzora. Postoji mnogo studija i primjena različitih pomorskih senzorskih podataka pomoću umjetne inteligencije, ali malo ih se usredotočuje na situacijsku svjesnost visokog nivoa.

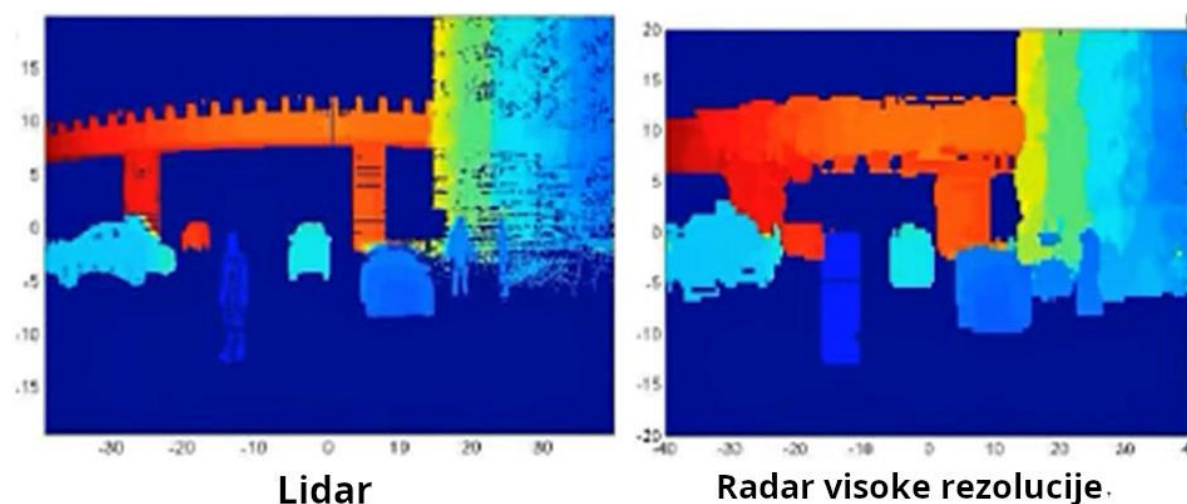
### **3.1. RADAR I LIDAR**

Engl. Radio Detection and Ranging (dalje: RADAR) i Light Detection and Ranging (dalje: LiDAR) mjere udaljenosti koristeći radio frekvencije odnosno

vizualno ili infracrveno svjetlo. Uređaji za mjerenje udaljenosti imaju odašiljač koji šalje signale i prijemnik koji mjeri vremensko kašnjenje dolaska i smjer dolaska impulsa reflektiranih s površine cilja. Intenzitet signala koji se reflektira od određene mete ovisi o karakteristikama mete, kao što su refleksija i veličina, odnosno njezin presjek.

Značajna razlika između RADAR-a i LiDAR-a je u prostornoj disperziji signala. RADAR-i koriste antene s relativno širokom širinom snopa, što ga čini vrlo teškim za razlikovanje malih strukturalnih detalja cilja. Moderni LiDAR-i, s druge strane, gotovo isključivo se temelje na laserima i stoga imaju vrlo uske i dobro fokusirane snopove.

Stoga LiDAR može konstruirati detaljniji model cilja, čak i iz daljine. Nedostatak LiDAR-a je što su vrlo osjetljivi na vremenske pojave, na primjer, oborine. Nasuprot tome, radio valovi prodiru kroz oblake, dim i maglu bolje od vidljivih valnih duljina i stoga su RADAR-i očigledan izbor za glavni sustav za daljinsko otkrivanje na brodovima za velike udaljenosti [19].



**Slika 8: Vizualne razlike RADAR i LIDAR tehnologije, izvor: <https://www.fierceelectronics.com/components/lidar-vs-radar> , posjećeno 30.07.2023**

Međunarodna konvencija propisuje uporabu X-čestotnih RADAR-a na brodovima čija bruto tonaža iznosi 300 ili više. Drugi, obično S-čestotni RADAR, potreban je na brodovima s bruto tonažom od 3000 ili više. Razlike između te dvije vrste radara prikazane su u tablici ispod.

**Tablica 6: Razlike između X i S-čestotnih RADAR-a**

	<b>X-čestotni radar</b>	<b>S-čestotni radar</b>
<b>frekvencija</b>	9 GHz	3 GHz
<b>Širina snopa (-3dB):</b>	0.75 -2.3 stupnja	1 – 4 stupnja
<b>Horizontalna</b>	20 - 26	24 - 30
<b>vertikalna</b>		
<b>Tipična maksimalna snaga</b>	5 – 50 kW	30 – 75 kW
<b>Brzina ponavljanja pulsa</b>	400 - 4000	400 – 4000
<b>Brzina rotacija antene</b>	20 – 60 okretaja u minuti	20 – 60 okretaja u minuti
<b>Generalne značajke</b>	<p>Detekcija visokog dometa,</p> <p>Prodire u oborine i bolje podnosi razne utjecaje atmosfere, veća antena.</p>	<p>Veća usmjerenost,</p> <p>Slabije prodiranje u oborinama,</p> <p>Manja antena.</p>

Izvor: Pripremio student prema: **S. Thombre et al.**, "Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.

Tipični minimalni radni raspon morskog RADAR-a ovisi o vertikalnoj širini snopa antene RADAR-a i stoga o visini između RADAR-a i cilja. Za veće brodove, na kojima se obično postavljaju RADAR-i na vrh broda, minimalni raspon može biti nekoliko stotina metara

Implementacija i tehnologija RADAR-a korištenih u komercijalnim i civilnim brodovima ostala je relativno nepromijenjena tijekom nekoliko desetljeća i može se smatrati zreloom i pouzdanom. Najznačajniji nedavni trend leži u sve većoj uporabi dizajna potpuno čvrstih stanica za odašiljače. Ti sustavi prevladavaju pitanja pouzdanosti i upravljivosti u tradicionalnim dizajnim temeljenim na magnetronu, omogućavajući novije i fleksibilnije metode obrade signala, na primjer, kompresiju impulsa. Kompresijom impulsa moguće je poboljšati raspon razlučivosti i otkrivanje cilja.

Osim toga, doplerova mjerenja mogu se izvoditi iz pojedinačnog eha impulsa. Nadalje, smatra se da su čvrsti stanovi za odašiljače stabilniji s manje unutarnje buke, što omogućava veću osjetljivost. Nove tehnologije vrhunskih sustava u drugim primjenama RADAR-a uključuju faze antena koje omogućavaju elektroničko skeniranje i upravljanje snopom. Iako takvi sustavi i tehnologija svakako pružaju bolju izvedbu, nejasno je bi li utjecaj na navigacijsku sigurnost nadmašio značajno veće troškove i složenost tih sustava.

S obzirom da će se vjerojatno koristiti razred brodova za autonomnu navigaciju koji će imati barem jedan obvezni RADAR, čini se razumnim iskoristiti te postojeće RADAR-e u najvećoj mogućoj mjeri. Kako postojeći RADAR-i ispunjavaju obvezne zahtjeve i ključna su oprema za sigurnu navigaciju, očekuje se da su trenutačno dostupni sustavi dovoljni za autonomne sustave.

Postoje razlozi zbog kojih se LiDAR-i trenutačno ne koriste u pomorskom otkrivanju. Na primjer, njihova uporaba ograničena je činjenicom da snaga laserima obično ne može biti povećana zbog problema sigurnosti očiju. Niže cijene komercijalnih LiDAR-a obično su usmjerene prema automobilskim primjenama, gdje su zahtjevi za dometom ispod 300 metara, a glavni ciljevi dizajna su veličina i trošak. Za te LiDAR-e, tipični operativni raspon je od 0,1 m do 200 m za ciljeve s 80% reflektivnosti. Za tamnije ciljeve raspon brzo opada. Budući da je raspon tih uređaja

ograničen, obično imaju prilično nisku kutnu razlučivost. To također ograničava operativni raspon, budući da manji ciljevi mogu proći nezapaženo kada su dovoljno daleko. Stoga se ti LiDAR-i mogu smatrati neprikladnima za veće brodove [19].

LiDAR-i većeg dometa proizvode se, na primjer, u svrhu geoloških istraživanja, i ti instrumenti mogu postići mjerenje udaljenosti od nekoliko kilometara. Ovaj porast dometa obično se postiže većim i učinkovitijim optikama za prikupljanje podataka. Nažalost, ova veza između veličine optike i dometa ima eksponencijalni odnos, što optička poboljšanja čini sve skupljima. Stoga se istraživanje LiDAR optike i elektronike trenutačno usmjerava na tehnike s jednim fotonima [18].

Pri razmatranju LiDAR-a za pomorsko okruženje, osim opsega mjerenja i kutne razlučivosti, od posebnog su interesa uzorak skeniranja ili horizontalno i vertikalno polje gledišta (Field-of-View - FOV). Prvi komercijalni LiDAR-i koristili su rotirajuće optike kojima je omogućeno 360 stupnjeva pregleda vodoravno, dok je vertikalni FOV bio ograničen brojem diskretnih parova odašiljač-prijemnik lasera na uređaju i njihovim kutnim razmacima. Zbog visokih troškova implementacije slobodno rotirajuće optike, noviji dizajni LiDAR-a usvojili su različite tehnike skeniranja koje obično imaju više ograničena horizontalna i vertikalna polja gledišta. Novi tehnologije LiDAR-a, poput flash LiDAR-a i optičkog upravljanja snopom, inherentno su ograničene u FOV-u.

Stoga je potrebno koristiti nekoliko uređaja ako je potrebno 360-stupanjska horizontalna i vertikalna polja gledišta. Za manje brodove, 360-stupanjski skenirajući uzorci mogli bi biti prikladni jer se LiDAR može postaviti na vrh broda bez značajnih slijepih točaka oko broda. Za veće brodove, slijepi kutovi mogu postati značajni, pa bi se stoga morali koristiti različiti LiDAR uređaji raspoređeni oko broda za potpunu pokrivenost.

Osim toga, ako se koriste LiDAR-i s 360-stupanjskim pregledom, značajan dio vremena skeniranja gubi se zbog prekida prikaza broda. Nadalje, odgovarajući dijelovi vjerojatno bi se morali uklanjati u stvarnom vremenu iz podataka u oblaku točaka zbog problema s propusnošću. Stoga se čini razumnim koristiti više diskretnih LiDAR uređaja s ograničenim FOV-om raspoređenih oko broda. To također



omogućava precizniju kontrolu razlučivosti u ključnim smjerovima, na primjer, s prednje strane broda. [19]

Kada se razmatra odabir LiDAR-a za autonomne brodove, očito je da je niska cjenovna kategorija trenutno dostupnih komercijalnih LiDAR-a neprikladna za većinu slučajeva. S druge strane, LiDAR-i razine ispitivanja su neprihvatljivo skupi i većinom nisu dizajnirani za teške uvjete, na primjer, konstantno kretanje i ekstremne vremenske uvjete. Najvažnije je da LiDAR-i za dugi domet obično imaju lasere koji prelaze granice sigurnosti očiju, čineći njihovu uporabu upitnom.

Za veće brodove moglo bi se razmotriti korištenje kombinacije jeftinih i naprednijih uređaja. Također je vjerojatno da će napredak u tehnologiji LiDAR-a poboljšati domet i razlučivost u bliskoj budućnosti, omogućavajući klasu s dobrom cijenom i performansama prikladnim za pomorsku uporabu. Testiranje prikladnosti i performansi LiDAR-a u pomorskom okruženju moglo bi se provoditi pomoću jeftinih senzora, a zatim ih skalirati kad se tehnologija poboljša [19].

### **3.2. VIZUALNI SENZORI**

Pod vizualnim sensorima podrazumijevaju se svi senzori koji snimaju barem dvodimenzionalnu sliku, sličnu ljudskom oku. To uključuje RGB (crveno-zeleno-plavo), monokromatske i infracrvene digitalne kamere. Digitalne kamere mogu se koristiti za pozicioniranje, određivanje udaljenosti te detekciju i klasifikaciju objekata, što su sve ključne zadatke za autonomni sustav. Međutim, u uvjetima otvorenog mora nema orijentira za pozicioniranje na temelju kamere.

Mjerenje slika, odnosno fotogrametrija, dugo se koristi u geodetskim i raznim industrijama [20]. Za situacijsku svijest, optički sustav treba biti dizajniran tako da ima odgovarajući efektivni domet, što se određuje kroz koncept (zemaljske) udaljenosti uzorkovanja. To je udaljenost između dvije točke izmjerene na površini cilja. Primjerice, uzorkovanje udaljenosti od 0,5 m na dometu od 1 km rezultiralo bi time da brod širine 30 m prikazan na slici ima prednji dio širok 60 piksela. To

postavlja ograničenja za preciznost određivanja udaljenosti i klasifikaciju objekata. Određivanje udaljenosti kamerama obično se obavlja pomoću postavka stereo kamere, gdje se koriste dvije kamere i cilj formirajući strukturu trokuta [19].

### 3.2.1. Određivanje udaljenosti pomoću stereo kamera

Stereo kamera sastoji se od dvije monokularne kamere. Ove kamere moraju snimati slike istodobno (vremenska sinkronizacija), a relativan položaj dviju kamera jedne prema drugoj mora biti poznat. Ovaj uređaj omogućuje određivanje udaljenosti pomoću triangulacije. U praksi postignuta je detekcija objekata u pomorskom okruženju na udaljenosti od 500 m. Međutim, vjerojatno je da su mnogo veće udaljenosti dostupne s odgovarajućom optikom i metodologijom.

Pogreška procjene udaljenosti  $\Delta Z$  temelji se na kvadratu udaljenosti  $Z$ , linearno na pogrešci dispariteta  $\Delta D$  i obrnuto proporcionalno osnovnoj  $B$  (tj. udaljenosti između dviju kamera) i žarišnoj duljini leće  $f$  [20].

$$\Delta z = \frac{z^2}{fB} \cdot \Delta D$$

Žarišna duljina i pogreška dispariteta obično se izražavaju u pikselima. Može se primijetiti ulogu koju igra udaljenost uzorkovanja: čak i s visokom rezolucijom kamere, određivanje udaljenosti ovisi o optici i geometriji mjernog trokuta. Ukratko, određivanje udaljenosti postaje manje precizno što je cilj dalji.

Ograničenja uključuju robusnost (i moguće frekvencije) kalibracije stereo konfiguracije. Iako se stereoskopija obično provodi koristeći kamere veće razlučivosti, to jest RGB ili monokromatske kamere, iste tehnike direktno se primjenjuju i za infracrvene kamere [20].

### 3.2.2. Digitalne kamere za pomorsku upotrebu

Kratak sažetak usporedbe različitih vrsta kamera prikazan je u tablici 7. Monokromatske i kamere u boji imaju svoje prednosti i nedostatke, a izbor ovisi o primjeni. Za dobivanje slika u boji kamere koriste niz filtera za boje i filtere za rezanje infracrvenih zraka. To će smanjiti broj fotona i ograničiti valne duljine koje mogu dosegnuti senzor. To čini monokromatske kamere boljim u situacijama s niskim svjetlom i u situacijama gdje nije potrebna boja.

**Tablica 7: Primjeri tržišnih kamera i njihovih karakteristika**

	<b>Monokromne kamere</b>	<b>Kamera u boji</b>	<b>Infracrvene kamere</b>
<b>Rezolucija</b>	Odlična	Odlična	Slaba
<b>Rad pri slabom osvjetljenju</b>	Srednji	Slab	Visok
<b>Klasifikacija objekata</b>	Niska/srednja	Visoka	Srednja/visoka
<b>Korištenje u procjeni udaljenosti</b>	Srednje	Srednje	Nisko
<b>cijena</b>	Niska/srednja	Niska/srednja	Visoka

Izvor: Pripremio student prema: S. Thombre *et al.*, "Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.

Stoga su u idealnim pomorskim uvjetima kolor kamere su bolje prikladne za detekciju i klasifikaciju objekata, ali u ne idealnim uvjetima monokromatske kamere vjerojatno su bolje za to. U stvari, ove dvije vrste kamera mogu se smatrati međusobno komplementarnima, i mnogi senzorski sustavi koriste obje.

Ograničenja RGB i monokromatskih kamera uključuju ovisnost o dobroj vidljivosti i stoga su snažno pogođeni kišom, maglom, tamom i drugim fenomenima koji utječu na vidljivost. Međutim, treba napomenuti da tijekom noći većina površinskih brodova koristi svjetla, koja se mogu vidjeti na slikama.

Infracrvene (Engl. Infrared camera dalje: IR) kamere registriraju toplinsko zračenje. To ih čini zanimljivim izborom u pomorskim uvjetima jer većina objekata od interesa, poput brodova i ljudi, ima vrlo različitu temperaturu u usporedbi s vodom. Stoga će ovi objekti općenito biti jasno vidljivi na slikama, čak i noću. Međutim, IR kamere imaju niz nedostataka.

Trenutno su mnogo skuplje i imaju prilično lošiju razlučivost u usporedbi s kamerama koje rade na vidljivoj svjetlosti, što ograničava preciznost određivanja udaljenosti i detekciju i klasifikaciju objekata. Unatoč tome, IR kamere već se koriste u pomorskim uvjetima. Ako se tehnologija dalje poboljša i učini IR kamere dostupnijima, mogu postati ključni senzor u autonomnim brodovima [21].

Fuzija kamera s RADAR-om i AIS-om (Automatic Identification System – automatski identifikacijski sistem), čini se privlačnim rješenjem. Kamere trebaju zaštitno kućište ili se trebaju nalaziti unutar broda, na primjer na mostu. Pogotovo na velikim brodovima, mnogi prozori imaju hidrofobni premaz, što omogućava kamerama dobru vidljivost čak i iznutra sa mosta. Međutim, većina infracrvenih valnih duljina ne prodire kroz staklo prozora, stoga bi se infracrvene kamere trebale postaviti izvan broda [19].

### 3.3. AUDIO SENZORI

Mikrofoni, a posebno mikrofonski nizovi, imaju potencijal pružiti vrijedne informacije za kontekstualno razumijevanje u pomorskim aplikacijama. Različite vrste plovila mogu se detektirati, klasificirati, locirati i pratiti analizirajući zvukove koje proizvode, poput zvukova motora (npr. pogon, ventilacija, dizalice) i brodskih sirena. Također, automatsko otkrivanje određenih događaja (npr. otkrivanje kvara, pad objekta/osobe u vodu) može biti moguće analizom zvukova. U nekim slučajevima analiza zvuka može pružiti nove relevantne informacije koje poboljšavaju situacijsku sliku, poput pozicije malih brodova koji nisu opremljeni AIS-om.

U drugim slučajevima, informacije koje se dobiju mogu biti slične onima dobivenim iz drugih senzora, poput AIS poruka. U tim slučajevima redundancija se može koristiti za međusobnu provjeru i pokretanje različitih razina alarma. Ovaj potencijal čini mikrofonske nizove vrijednima za daljnje proučavanje u vezi s aplikacijama za kontekstualno razumijevanje u pomorskim uvjetima [19].

#### 3.3.1. Opće razmatranje za pomorske aplikacije

Što se tiče kontekstualnog razumijevanja u pomorskim aplikacijama, i s općeg, visokog funkcijskog gledišta, postoje nekoliko kriterija koje treba uzeti u obzir pri odabiru odgovarajućeg mikrofona koji će se koristiti samostalno ili kao dio mikrofonskog niza. Prvo, mikrofon se mora postaviti na otvorenom. Dakle, očigledno mora izdržati teške vremenske uvjete i druge teškoće povezane s dugotrajnim vanjskim pomorskim postavkama, kao što su vjetar, kiša, snijeg, varijacije temperature, izloženost suncu i slana voda.

Drugo, njegova opća izvedba mora biti dobro definirana, stabilna i predvidljiva tijekom vremena. To je posebno kritično kod mikrofonskih nizova, gdje izvedba svih

elemenata niza mora odgovarati. Treće, mora biti optimiziran za suočavanje i minimiziranje učinaka različitih izvora buke koje se mogu očekivati iz konteksta, poput vjetra, mora, kiše i buke koju brod stvara sam.

Akvizicija akustičnih signala na otvorenom relativno je razvijeno područje, a njezin razvoj tijekom vremena donio je stabilnije mikrofone u teškim vremenskim uvjetima, kao i bolje sustave zaštite od vjetra i vode, poput rešetki, pjena i krzna. Međutim, ove zaštite ne uklanjaju potpuno učinke okolišnih faktora, i neki od njih i dalje mogu značajno utjecati na performanse registracije i analize zvuka. Posebno važna je buka uzrokovana vjetrom koja se proizvodi interakcijom vjetra s elementima oko mikrofona i samim mikrofonom, uključujući zaslon protiv vjetra, jer može spriječiti izvlačenje korisnih kontekstualnih informacija [22].

Očigledno, mikrofoni trebaju imati najsuvremenije zaslone protiv vjetra, ali oni ne mogu potpuno nadoknaditi učinke vjetra. Srećom, različite tehnike obrade signala mogu se koristiti za izolaciju i ublažavanje tih efekata [23].

Druga pitanja koja se odnose na postavljanje mikrofona također treba uzeti u obzir. Više pozicija (npr. postavljanje na jarbolima na najvišem palubu) obično će smanjiti buku koju brod stvara (uključujući morsku buku) te povećati vidljivi kut. S druge strane, povećat će izloženost vjetru. Potrebno je stoga napraviti kompromis, za što može biti korisna preliminarna terenska studija [24].

### **3.3.2. Odabir mikrofona**

Odabir mikrofona: Zadatak mikrofona je pretvaranje oscilacija zračnog tlaka kako dolaze do senzora u električne signale. Postoje različiti fizički principi koji se mogu iskoristiti za tu konverziju, i ovisno o tome koji se koristi, možemo pronaći mikrofone temeljene na ugljiku, magnetske/dinamičke, kondenzatorske, piezoelektrične i optičke mikrofone, svaki sa svojim karakteristikama koje ih čine prikladnijima za različite primjene. Najčešći su kondenzatorski i dinamički tipovi.

Mjerni mikrofoni razlikuju se od običnih mikrofona po tome što su optimizirani za jedan ili više tih parametara, ovisno o primjeni, i za stabilnost tijekom vremena. Mjerni mikrofoni za praćenje okoliša obično su, ako ne i uvijek, tipa kondenzatora. Postoje različiti aspekti konfiguracije koji se moraju odlučiti pri odabiru kondenzatorskog mjernog mikrofona na temelju posebnosti aplikacije i signala koji se treba snimiti.

- Promjer membrane najviše utječe na frekvencijski odziv. Oni s promjerom od pola inča imaju dobre karakteristike za opću upotrebu.
- Sami mikrofoni utječu na zvuk koji snimaju. Postoje tri vrste mikrofona optimizirane za minimiziranje njihova učinka u različitim mjerenjima: slobodno polje, tlak i slučajna incidencija. Oni slobodnog polja optimizirani su za zvuk koji dolazi uglavnom iz jednog smjera.
- Kondenzatorski mikrofoni trebaju polarizaciju dijafragme. Postoje mikrofoni s vanjskom polarizacijom (zahtijevaju napajanje od 200 V, obično vode do skupljih postavki) i pretvorbenih mikrofona (koriste jednostavnije kabele, poput koaksijalnih, što obično dovodi do nižih troškova postavki).

Osim toga, odabir pojačala ključan je i treba ga obaviti tako da njegove karakteristike ne ograničavaju karakteristike samog mikrofona. Obično proizvođači mikrofona i pojačala pružaju uslugu zajedno [25].

Osjetljivost mikrofona dobar je pokazatelj njegove ispravnosti, stoga praćenje osjetljivosti najbolji je način za procjenu stabilnosti mikrofona. Mjerni mikrofoni, posebno za vanjsku upotrebu, zahtijevaju redovitu provjeru i kalibraciju, na primjer, na terenu svaka tri mjeseca i svakih 18 mjeseci u certificiranom laboratoriju, ovisno o aplikaciji i uvjetima rada.

Najtipičnija upotreba mjernih mikrofona na otvorenom je praćenje razine buke u urbanim scenarijima i na aerodromima. Ciljevi su obično razumjeti temeljne fenomene, procijeniti učinkovitost mjera protiv buke i/ili mjeriti tlak ili jačinu buke

tako da se žalbe mogu provjeriti s točnošću koja omogućuje provedbu zakona. Druge upotrebe s bližim zahtjevima za kontekstualno razumijevanje u pomorskim scenarijima su one koje ciljaju na lokalizaciju izvora zvuka i prepoznavanje konteksta pomoću mikrofonskih nizova.

Kao primjer komercijalno dostupnog rješenja, Rionov sustav za praćenje buke zrakoplova koristi četveroelementni mikrofonski niz montiran na istom jarbolu kako bi otkrio i procijenio smjer dolaska zvuka zrakoplova. Također prepoznaje zrakoplove na temelju podataka o njihovim transponderima i povezuje mjerenja buke s određenim zrakoplovima.

**Tablica 8: Primjeri vanjskih mjernih mikrofona i njihove karakteristike**

	<b>Brüel &amp; Kjær 4952-A</b>	<b>GRAS 41AC-3</b>	<b>Roga MR-10</b>
<b>Domet frekvencije</b>	8 Hz – 20 kHz	3.15 Hz – 20 kHz	20 Hz – 20 kHz
<b>Dinamički raspon</b>	16 – 130 dB	17 dB – 138 dB	30 dB – 130 dB
<b>Senzitivnost</b>	31.6 mV/Pa	50 mV/Pa	50 mV/Pa
<b>Inherentna buka</b>	16 dB	17 dB	30 dB
<b>Temperaturi domet</b>	-30 do 60 °C	-30 do 70 °C	-10 do 50 °C
<b>Domet vlažnosti</b>	0 do 100%	0 do 95%	Nije naglašeno
<b>Vodena zaštita</b>	IP44	IP55	Nije naglašeno

Izvor: Pripremio student prema: S. Thombre *et al.*, "Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.

Također može klasificirati aktivnost zrakoplova (npr. slijetanje, polijetanje i ispitivanje motora) na temelju analize zvuka. Druge slične dostupne mogućnosti uključuju sustave za stvarno vrijeme za detekciju zvučnih pucnjeva. Oni procjenjuju



položaj izvora pucnja analizom udarnih valova i eksplozija iz cijevi nastalih projektilima i primljenih od strane niza senzora/mikrofona.

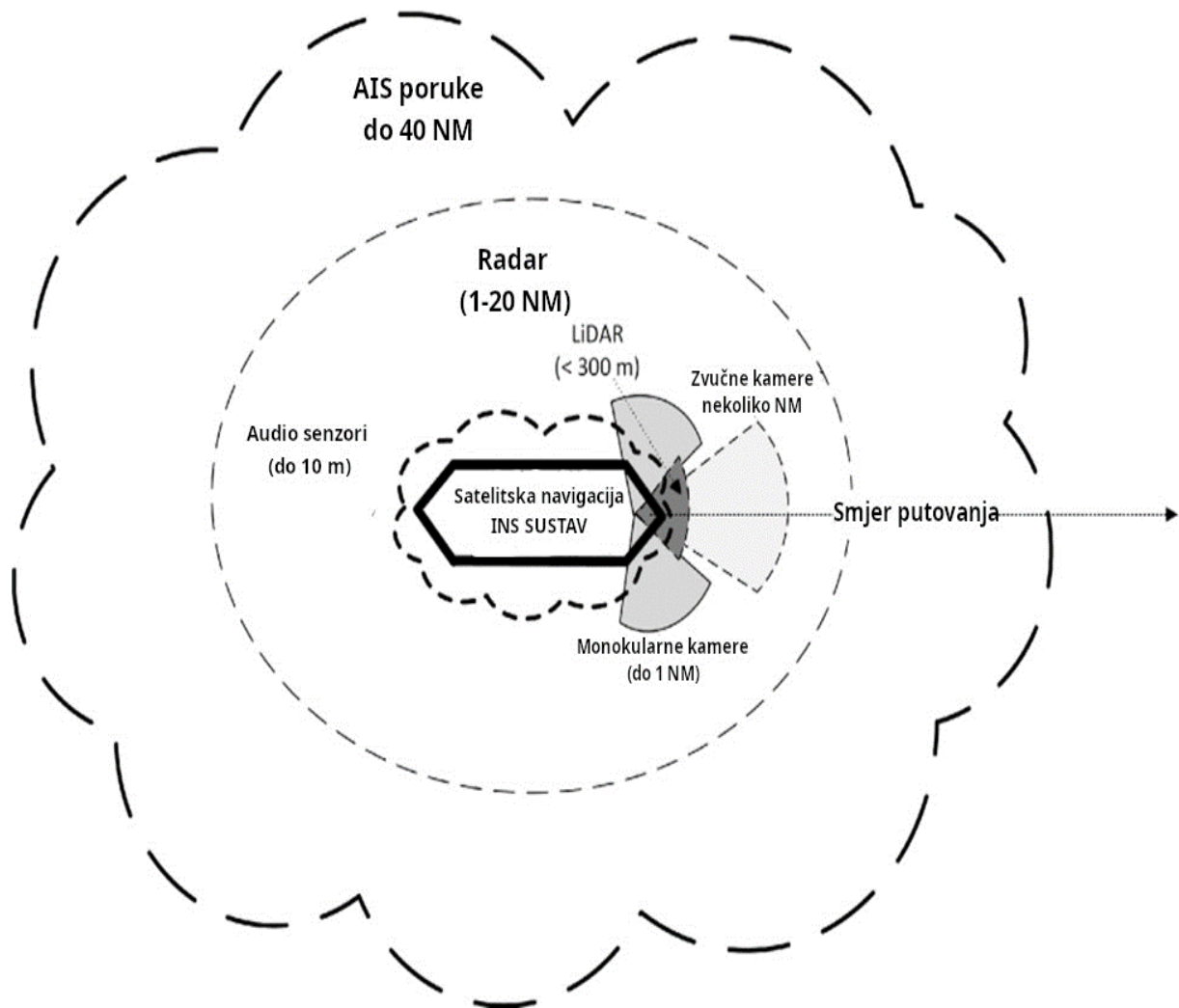
Na kraju, tablica 8 prikazuje primjere vanjskih mjernih mikrofona koji se mogu pronaći na tržištu zajedno s nekim od njihovih glavnih karakteristika [25].

### 3.4. AIS PRIJEMNICI

Sustav za automatsko identificiranje (Engl. Automatic identification system, – dalje: AIS) je sustav visoke frekvencije (Engl. Very high frequency, dalje: VHF) koji se koristi za emitiranje položaja plovila, fiksnih i plutajućih pomorskih pomoćnih znakova ili drugih prepreka na moru poput naftnih platformi i vjetroelektrana. Plovilo opremljeno AIS prijammnikom moći će locirati te objekte u svojoj blizini bez obzira na uvjete vidljivosti ili ako se susjedno plovilo približava izvan vidokruga na unutarnjim ili arhipelaškim vodenim putovima.

Osim položaja, AIS poruke također mogu sadržavati dinamičke informacije o plovilu, statičke informacije i informacije o putovanju. Većina komercijalnih plovila emitirat će vlastite informacije putem AIS poruka. Takva plovila stoga nose odašiljač (također nazvan transceiver) koji je sposoban i za slanje i za primanje AIS poruka [26].

Za komunikaciju se koriste dva VHF kanala, nazvana AIS1, ili kanal 87B (161,97 MHz) i AIS2, ili kanal 88B (162,025 MHz). Stoga AIS prijammnici mogu biti jednokanalni ili dvokanalni. Prednost dvokanalnih prijammnika je što će prikazati više informacija, potpune poruke i češće ažurirane informacije od jednokanalnih prijammnika. Osnovna sklopka za AIS prijammnik uključuje modul prijammnika, VHF antenu s kabelima, prijenosno računalo s softverom za zapisivanje i tumačenje toka poruka, te zasebni izvor napajanja ako se sklopka ne napaja putem prijenosnog računala.



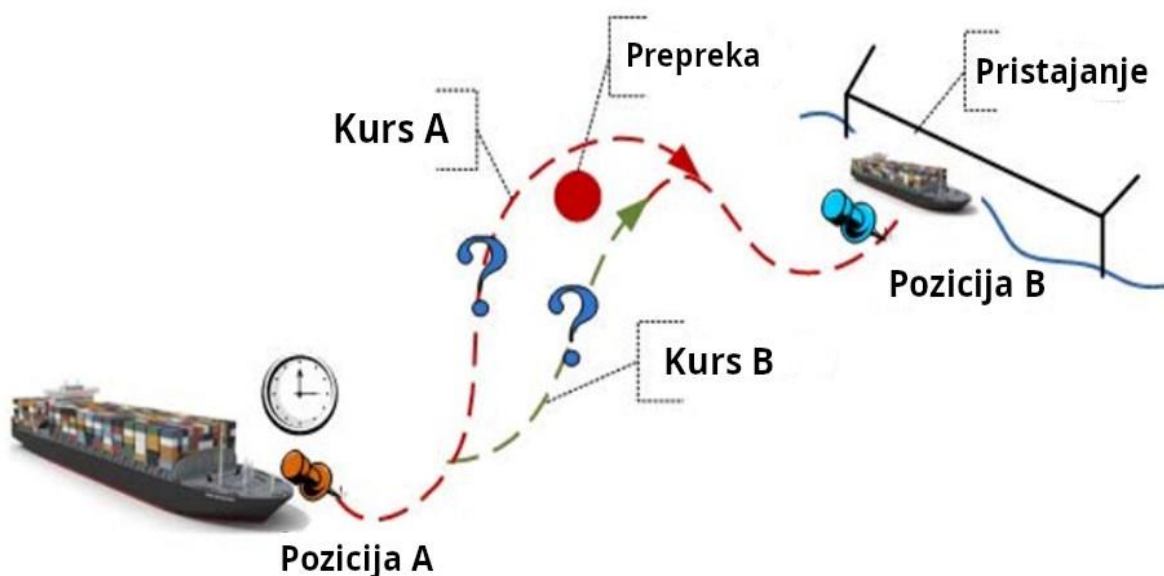
**Slika 9: Potencijalna strategija razmještaja senzora [25].**

Komercijalni AIS uređaji nude širok izbor modela i marki koji se mogu uspoređivati na temelju podržanih frekvencijskih kanala (jednokanalni ili dvokanalni), prostorne udaljenosti (u nautičkim miljama (NM)), formata za izlazne podatke (npr. NMEA0183) i veze (USB ili drugi), vrste napajanja i cijene [25].

Potencijalna strategija razmještaja svih gore nabrojanih senzora prikazana je na slici 9.

### 3.5. KLASIFIKACIJA KONTROLE POKRETA ZA AUTONOMNE BRODOVE

Kako precizno kontrolirati brod od destinacije A do destinacije B je složen proces. Zahtijeva klasifikaciju stanja kretanja tokom cijelog puta i traži precizne metode kontrole za različite vrste kretanja.



Slika 10: Shematski prikaz kontrole kretanja autonomnog broda [25].

Na temelju mehaničke strukture, površinski brodovi se mogu podijeliti na brodove s punim aktuatorima i brodove s nedovoljnim aktuatorima. Razlika između brodova s punim aktuatorima i brodova s nedovoljnim aktuatorima je u tome da li dimenzija kontrolnog ulaza odgovara stupnju slobode broda. Iako je model brodova s punim aktuatorima i brodova s nedovoljnim aktuatorima različit, vrste kretanja broda su iste. Shematski prikaz kontrole kretanja autonomnog broda prikazan je na slici 10, a vrste su prikazane u tablici 9.

**Tablica 9: Vrste kontrola kretanja autonomnog broda.**

Vrste kontrola	Objekt kontrole	Sustav napajanja i propulzije	Kontrolne varijable
1 – Kontrola brzine broda	Brzina	Motor i propeler	Brzina rotacije propelera
2 – Kontrola kursa	Kurs	Kormilo	Kut kormila
3 – Stabilizacija	Kurs, brzina i put	Motor, propeler i kormilo	Brzina rotacije propelera i kut kormila
4 – Slijedenje puta	Put	Motor, propeler i kormilo	Brzina rotacije propelera i kut kormila
5 - Praćenje putanje	Putanja	Motor, propeler i kormilo	Brzina rotacije propelera, kut kormila i vrijeme
6- Planiranje putanje, izbjegavanje prepreka i vođenje	Put	Motor, propeler i kormilo	Brzina rotacije propelera i kut kormila
7 – Automatsko pristajanje	Kurs, brzina i put	Motor, kormilo i krmeni/pramčani potisnici	Brzina pramčanih/krmernih potisnika
8 - Kooperativna kontrola formacije više brodova	Kurs, brzina i put	Motor, propeler i kormilo brodova, sistemi za komunikaciju između brodova	Brzina rotacije propelera i kut kormila

Izvor: Pripremio student prema: Wang, L., Wu, Q., Liu, J., Li, S., & Negenborn, R. (2019). *State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships. Journal of Marine Science and Engineering*, 7(12), 438.

Od navedenih kategorija, posljednje tri se usredotočuju na odabir odgovarajuće kontrolne strategije, a suština je i dalje kontrola kursa, putanje i brzine. Osim toga,

kooperativna kontrola formacije više brodova dodaje složene komunikacijske sustave. Konačni cilj autonomnog pristajanja je održavanje orijentacije, pa se stoga svrstava u stabilizaciju. Stoga ovaj rad opisuje samo prvih pet stavki.

1. Kontrola brzine broda - Za tradicionalne brodove s dizelskim motorima, brzina se kontrolira putem motorne telegrafije i prilagođava se različitim razinama. Za brodove s električnim pogonom, kontrola brzine se uglavnom odnosi na upravljanje brzinom rotacije propelera, koja se može prilagoditi proizvoljno unutar određenog raspona. To ima veliku važnost za navigaciju autonomnih brodova, održavanje kursa i navigaciju broda prema propisanoj ruti.
2. Kontrola kursa - U kontroli orijentacije broda, kontrola kursa je vrlo važna. Za brodove s upravljanjem kormilom i propelerom, kontrola kursa se može pripisati kontroli kormila. Za brodove s vektor-potisnicima poput podnog pogona i potisnicima bez osovine, kurs se kontrolira putem upravljanja vektor-potisnicima. Kontrola kursa obuhvaća uglavnom stabilnost i pokretljivost. Kako bi se smanjilo vrijeme plovidbe i potrošnja goriva, brod može održavati konstantnu navigaciju pri određenoj brzini, što označava stabilnost kursa broda. Kada brod treba izbjeći druge brodove ili prepreke dok plovi unaprijed određenom rutom, ili plovi unutar ograničenog kanala, potrebno je pravodobno mijenjati brzinu i kurs. Dizajn općeg kontrolera kursa nema kontrolu brzine. Budući da istovremeno kontroliranje kursa i brzine povećava složenost, obično su neovisni. Međutim, kod broda s dvostrukim potisnicima, potrebno je prilagoditi brzinu dvostrukih propelera kako bi se postigla kontrola kursa. U tom trenutku kontrola kursa i kontrola brzine su spojeni na upravljanje [23].

3. Kontrola stabilizacije - Zbog zahtjeva različitih praktičnih misija, autonomni brod se mora održavati na istom položaju oslanjajući se na sebe, što se naziva kontrola stabilizacije. To uključuje glavno dinamičko pozicioniranje (Engl. DP – dynamic positioning– dalje: DP) i kontrolu sidrenja. Kontrola sidrenja je mnogo teža od kontrole praćenja, jer se mora stabilizirati svaki stupanj slobode (Engl. DOF – degree of freedom) konfiguracije ili orijentacije sustava. Zbog važnosti i izazova teorijskog istraživanja, kontrola stabilizacije postala je fokus pažnje. Trenutno se veliki teretni brodovi uglavnom oslanjaju na potisnike, ali u budućnosti bi autonomni brod trebao automatski pristajati.
  
4. Kontrola slijeđenja puta - Problem slijeđenja puta je geometrijsko praćenje položaja bez obzira na vrijeme. Prema geometriji puta, problem kontrole slijeđenja puta može se podijeliti na dvije kategorije: linearnu kontrolu slijeđenja puta i kontrolu krivudave putanje. S gledišta kontrolnog objekta, nema bitne razlike između njih, ali s gledišta dizajna kontrolora, glavna razlika je da je linearna kontrola slijeđenja puta stabilizacijska kontrola u manjem području blizu ravnotežnog položaja. To znači da određeno ravnanje modela ili zanemarivanje lateralnog odstupanja može zadovoljiti zahtjeve kontrole u određenim uvjetima. Za razliku od toga, kontrola krivudave putanje zahtijeva razmatranje manevra broda, a lateralno odstupanje ne može se zanemariti.
  
5. Kontrola praćenja putanje - Problemi praćenja putanje zahtijevaju da se sustav pojavi na određenom položaju u određeno vrijeme, što je općenito puno teže od slijeđenja puta. Međutim, u slučaju nesigurne brzine, zbog lateralnog odstupanja, problem kontrole praćenja krivudavog puta nije lakše implementirati od problema kontrole praćenja putanje. Osim toga, praćenje putanje često se odnosi na parcijalne varijable, pa je nerealno zahtijevati da sve varijable sustava samostalno prate svoje trajektorije.

Završno, promjena brzine i trajektorije broda ostvaruje se putem kontrole kormila i propelera. Kontrola slijeđenja puta, kontrole trajektorije i kontrola stabilizacije su tipični problemi kontrole sa nedovoljnim aktuatorima. Ako su instalirani potisnici pramca/krme, cijeli kontrolni sustav će se približiti punoj kontroli. Kontrola praćenja puta je kontrola fiksne putanje, a kontrola praćenja trajektorije je praćenje koje se mijenja s vremenom. Postoji progresivni odnos između njih. Dinamičko pozicioniranje je najosnovnija stabilizacija fiksnog položaja. Osim potrebe za stabilizacijom fiksnih točaka tijekom navigacije, kada brod prestane s navigacijom, može se automatski pristajati [25].

## 4. UMJETNA INTELIGENCIJA AUTONOMNIH BRODOVA

Umjetna inteligencija (Engl. AI- artificial intelligence – dalje: AI) koristi različite tehnologije, a ovaj rad neće pokušavati dati potpunu klasifikaciju tih tehnologija. Od 1990-ih godina, statističke metode, posebno različite oblike umjetnih neuronskih mreža i strojno učenje (Engl. ML – machine learning – dalje: ML), ponovno su postale najvažnije područje primjene umjetne inteligencije. Strojno učenje razlikuje se od "Dobre stare umjetne inteligencije", kao što su simbolička i nejasna logika, u tome što njihov odgovor na podražaje više nije objašnjiv eksplicitno specificiranim računalnim kodom ili bazom podataka.

Većina umjetnih neuronskih mreža koje se danas koriste su duboke neuronske mreže, što znači da sadrže nekoliko "skrivenih" slojeva osim ulaznih i izlaznih slojeva. Metode strojnog učenja obično se kategoriziraju prema algoritmima za nadzirano učenje, nenadzirano učenje i učenje poticajem. Mnoge od ovih metoda temelje se na treniranju umjetnih neuronskih mreža s podacima, pri čemu mreža uspostavlja unutarnje ponderiranje različitih karakterističnih faktora ulaznih podataka, na primjer, za otkrivanje određenih uzoraka ili davanje prijedloga za odgovarajuće radnje.

Umjetne neuronske mreže pružaju vrhunske performanse u računalnom vidu, omogućujući otkrivanje i klasifikaciju objekata, na primjer, brodova. Nadalje, može se koristiti za zadatke regresije mapiranjem nelinearnih odnosa koji se mogu koristiti za predviđanja, na primjer, budućeg puta plovila [25].

Sustav autonomnih brodova sastoji se od mnogo komponenti koje se nalaze i na brodu i izvan broda, kao što je u Središnjem centru za daljinsko upravljanje (Engl. RCC -remote control center – dalje: RCC). Umjetna inteligencija može se koristiti u mnogim ovim komponentama, ali u ovom radu razmotriti će se dvije specifične primjene:



- 1) Sustav svjesnosti o situaciji (Engl. Situation Awareness System – dalje: SAS), odnosno podsustav koji prikuplja podatke o brodu i okolini te gradi računalni model objekata koji mogu utjecati na rad autonomnog broda (npr. otkrivanje i klasifikacija)
- 2) Sustav autonomne navigacije (Engl. Autonomous Navigation System – dalje: ANS), odnosno sustav koji kontrolira kretanje broda kako bi osigurao siguran prolaz, uključujući upravljanje putanjom i brzinom te izbjegavanje sudara (npr. procjena budućih situacija i planiranje odgovarajućih akcija).

Objekti funkcije SAS-a i ANS-a temeljito su istražene. Međutim, postoji fundamentalna razlika između ove dvije funkcije. Uspješan SAS u principu ovisi samo o dovoljnoj količini senzorskih podataka i dovoljno dobrim algoritmima za pružanje visokokvalitetnog modela okoline. ANS, s druge strane, može na kraju morati donositi odluke na temelju onoga što će ili neće učiniti časnik na brodu s kojim se susreće. Konvencija o međunarodnim pravilima za sprječavanje sudara na moru iz IMO-a (1972), poznata kao COLREGs, međunarodno je dogovoreni okvir za ponašanje brodova kako bi se izbjegli sudari.

To uključuje upotrebu svjetlosnih i zvučnih signala, kao i smjernice za manevriranje tijekom susreta između brodova u različitim situacijama i uvjetima vidljivosti. Međutim, ove smjernice obično su važeće samo za dva broda odjednom i također se pozivaju na "dobre pomorske običaje" u vezi s izbjegavanjem sudara. Stvarne radnje u određenoj situaciji stoga će u velikoj mjeri ovisiti o afinitetima osoblja na mostu broda.

Stoga je vrlo malo vjerojatno da će sustav automatizacije, s AI ili bez njega, moći nositi se sa svim situacijama s kojima se brod može susresti, posebno u situacijama u kojima se susreće više od dva broda ili kada se drugi brod ponaša nestabilno. Bez promjena u COLREGs-u, to u principu nije moguće postići s 100% sigurnošću. Najčešća trenutna pretpostavka je da će autonomnom brodu trebati ljudski operater da intervenira u takvim situacijama.

Sustav automatizacije će, međutim, moći upravljati brodom većinu vremena i ne može se pouzdati u to da će operater ostati dovoljno oprezan tijekom automatskog rada da brzo shvati kada je potrebno za preuzimanje kontrole. To zahtijeva da sustav automatizacije i njegova umjetna inteligencija mogu odrediti kada se približavaju njegove granice i upozoriti operatera na vrijeme za sigurnu primopredaju. Ovo se vjerojatno najbolje može implementirati sustavom temeljenim na pravilima. AI je vjerojatno najprikladniji za upotrebu u SAS-u, gdje su najrelevantnije primjene AI otkrivanje i klasifikacija objekata, jer je domena ovih funkcija prilično ograničena [25].

#### **4.1 ZAHTJEVI ZA UMJETNU INTELIGENCIJU U SAS-U**

Osnovna i najvažnija zahtjevnost za SAS u smislu izbjegavanja sudara je da može detektirati sve objekte s potencijalom izazivanja sudara. Izbjegavanje sudara također ovisi o predviđanju kretanja kako vlastitog broda tako i broda (ili objekta) s kojim se može sudariti, odnosno ciljnog broda. Drugim riječima, buduća putanja vlastitog broda i ciljnog broda mora biti predviđena.

Stoga SAS mora procijeniti položaj, smjer i brzinu ciljnog broda, kao i vlastitog broda. Takve prognoze će, međutim, biti povezane s značajnom nesigurnošću, budući da se ljudi neće uvijek pridržavati očekivanog ponašanja u svim slučajevima. Točnost detekcije objekata, procjena stanja (brzina objekta, smjer, itd.) i kategorizacija moraju uvijek biti procijenjeni od strane SAS-a kako bi ANS mogao odlučiti jesu li podaci dovoljno pouzdani za izbjegavanje sudara.

Važan dio toga je kontinuirano provjeravanje i verifikacija integriteta senzora. Kada se okolina detektora ne može odrediti s dovoljnom točnošću, ANS mora zatražiti podršku od RCC. Međutim, pozivanje RCC-a treba svesti na minimum. To znači da SAS mora biti dizajniran da dovoljno dobro funkcionira u svim uvjetima u kojima se očekuje da će autonomni brod operirati.

Pitanje kako ocijeniti i odobriti primjene AI i ML koje se koriste na brodovima ne bi trebalo ciljati samo na određeni algoritam ili model, već bi trebalo obuhvatiti cjelokupno upravljanje modelom u obradi podataka koje se koriste [25].

## 4.2. INTERAKCIJA LJUDI S UMJETNOM INTELIGENCIJOM

RCC (Središnji centar za daljinsko upravljanje) ključan je element budućih autonomnih brodskih sustava. Stoga će ljudi pružiti ključnu komponentu pouzdanosti sustava, budući da će situacije koje automatizacija broda nije u mogućnosti riješiti biti rješavane od strane ljudskih operatora. Predviđa se da će AI imati ključnu ulogu u RCC-ima, s ciljem smanjenja opterećenja za operatore odgovorne za praćenje i upravljanje autonomnim plovilima, kao i poboljšanje njihovih sposobnosti donošenja odluka.

Općenito, AI bi trebao pomoći ljudskom operatoru u postizanju visoke situacijske svijesti. Međutim, pokazano je da povećani stupnjevi automatizacije mogu imati negativne učinke, poput pristranosti u donošenju odluka. Osim toga, složeni sustavi koji su teški za razumjeti mogu dovesti do situacije izvan petlje, jer operatori nisu u mogućnosti identificirati problem.

Rødseth i suradnici [8] razgovarali su o upotrebi operativnog okvira kao alata za pomoć sučelju između čovjeka i stroja u kontekstu autonomnih brodova. U situacijama gdje se rizik smatra previsokim za automatizaciju, mora doći do prijenosa kontrole s automatizacije na ljudskog operatera, ili se ne smije dozvoliti za minimalno rizične uvjete.

Automatizacija mora stoga imati visok stupanj pouzdanosti unutar ograničenog područja, kao i sposobnost procjene rizika povezanih s različitim situacijama. U situacijama gdje je rizik iznad određenog praga, bit će uključen operator. Visokorizične situacije mogu, na primjer, uključivati situacije susreta brodova ili visoku prometnu zagušenost. Nadalje, to se može proširiti na situacije s visokom nesigurnošću ML modela, odnosno situacije u kojima ML modeli mogu loše izvoditi.

Operativni okvir će definirati što se očekuje da će automatizacija broda rješavati u tom kontekstu.

### **4.3. VJERODOSTOJNA UMJETNA INTELIGENCIJA**

Pouzdana umjetna inteligencija pokušava procijeniti nesigurnost modela. Kako bi se prevladali izazovi odobravanja AI temeljenih modela za uporabu u autonomnoj plovidbi, može se implementirati sustav temeljen na nesigurnosti. Odobrenje sustava tada bi se temeljilo na sposobnosti ljudskog operatora da preuzme kontrolu kada je nesigurnost modela visoka.

Stoga odobrenje sustava ne bi zahtijevalo visoku točnost modela u svim mogućim situacijama, već bi se usmjerilo na njihovu sposobnost predviđanja svojih ograničenja. U većini slučajeva, tj. kada je ulaz u algoritam blizu srednje vrijednosti podataka o obuci, nesigurnost modela će biti niska. Međutim, ML modeli su sklони netočnostima kada ulaz u algoritam leži daleko od distribucije podataka na kojima je treniran, ili u područjima visoke varijabilnosti u trening podacima.

U takvim slučajevima, nesigurnost modela će biti visoka. Iako se nesigurnost statističkih modela često može izračunati eksplicitno, nesigurnost ANN modela nije tako lako kvantificirati. Model nesigurnosti općenito se smatra sastavljenim od aleatorne i epistemičke nesigurnosti. Aleatorna nesigurnost proizlazi iz inherentne slučajnosti u skupu podataka, odnosno šuma u podacima. Takva nesigurnost, stoga, nije smanjiva. Epistemička nesigurnost, s druge strane, odnosi se na nesigurnost u parametrima modela zbog nedostatka informacija. Stoga se smatra smanjivom povećanjem količine podataka o obuci.

U slučaju klasifikacije objekata u navigaciji broda, to može biti izazovno zbog ograničenih dostupnih skupova podataka u usporedbi s onima koji se obično koriste u računalnom vidu. Visok stupanj epistemičke nesigurnosti stoga ukazuje na to da model nema dovoljno podataka o obuci za pouzdanu predikciju. Obavješćavanje

operatora o takvim situacijama može povećati povjerenje u takve modele, pogotovo u slučajevima s ograničenim podacima o obuci [25].

#### **4.4. TEHNIKE UMJETNE INTELIGENCIJE ZA AUTONOMNA PLOVILA I NJIHOVE POTEŠKOĆE**

Sigurnost je ključna u autonomnim pomorskim sustavima, stoga algoritmi trebaju biti otporni u različitim operativnim situacijama. PAC (Engl. Probably Approximately Correct - Vjerojatno približno točan, dalje: PAC) navodi da bismo mogli postići bolju izvedbu generalizacije određenog modela s većim skupom podataka za obuku [27].

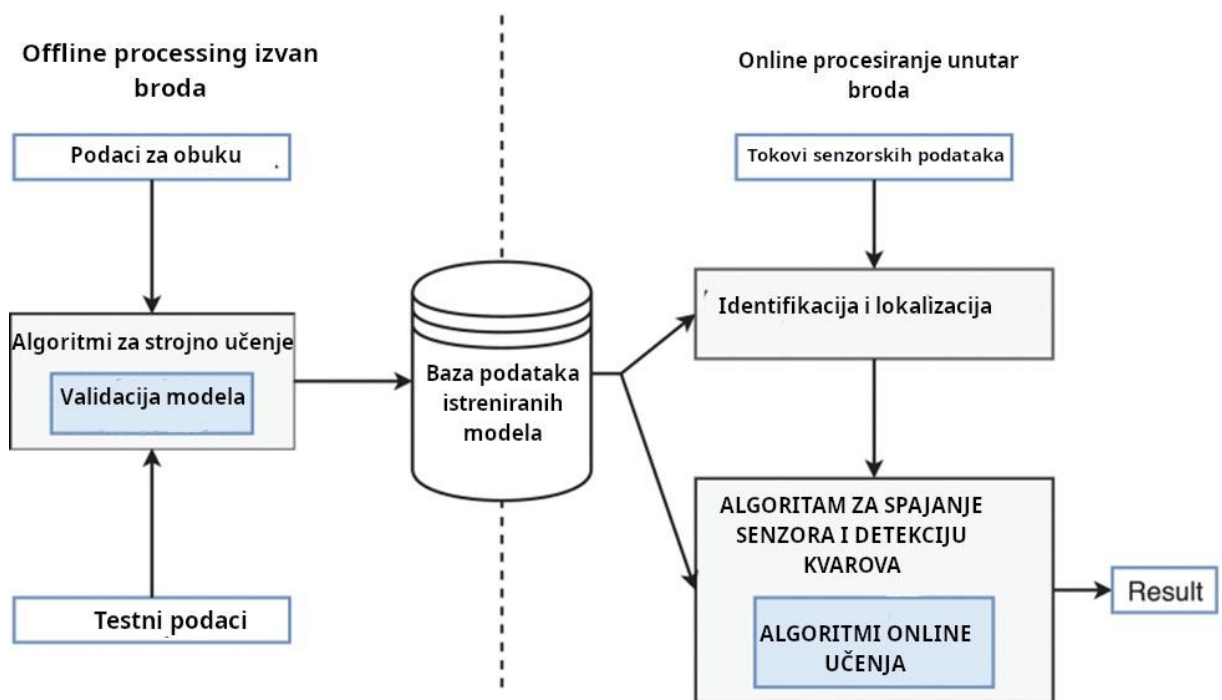
Međutim, to zahtijeva da algoritmi mogu analizirati velike količine podataka, što može biti problematično u mnogim slučajevima. Skup podataka smatra se velikim kada je dimenzionalnost zapisa podataka ili broj zapisa velik. Na primjer, mnoge medicinske slike (npr. retinopatija i histologija) smatraju se visoko-dimenzionalnim podacima jer obično sadrže milijune piksela.

Poznato je da su metode dubokog učenja [28] dobre u radu s vrlo velikom količinom podataka ako je osigurano dovoljno računalnih resursa, ali se još uvijek loše ponašaju za podatke velikih dimenzija. Povećanje dimenzija dovodi do ogromnog rasta parametara koji se mogu trenirati za modele dubokog učenja. Međutim, liječnici opće prakse imaju problema s velikim količinama podataka, budući da se računalna složenost kubično povećava s brojem zapisa podataka [29].

U pomorskim scenarijima vrsta podataka može dosta varirati, što zahtijeva upotrebu različitih metoda umjetne inteligencije za različite vrste podataka. Na primjer, podaci AIS-a ili GNSS-a obično su niskodimenzionalni s brojem promatranja koji se obično nakuplja brzinom od 1 Hz. S vremenom ti podaci mogu postati veliki. Modeli dubokog učenja, posebice rekurentne neuronske mreže [30], mogli bi imati bolje mogućnosti za analizu putanje broda.

Za pomorske audio signale broj dimenzija je velik. Na primjer, audio komad s 44,1 kHz i duljinom od 1 s ima 44100 dimenzija. Umjesto toga, moguće je upotrijebiti, na primjer, kratku Fourierovu transformaciju (STFT) za transformaciju audio signala u spektralnu domenu i koristiti spektro-vremensku reprezentaciju (sliku) kao značajku.

Za metode dubokog učenja, nije lako dobiti prediktivnu distribuciju jer su uključene složene hijerarhijske neuronske mreže prilikom izračunavanja integrala za dobivanje posteriora. Međutim, u mnogim slučajevima metoda Gaussovih procesa može dati rješenje zatvorenog oblika za prediktivnu distribuciju [29].



**Slika 11: Različiti algoritmi strojnog učenja [25].**

Još jedan zahtjev za algoritmima strojnog učenja je sposobnost online i offline učenja. Kao što je prikazano na slici ispod, računanje može biti potrebno izvršiti u stvarnom vremenu ili offline, ovisno o različitim situacijama.

Na primjer, dok se učenje klasificiranja objekata može obaviti offline, kada lokaliziramo pomorske objekte s kamere ili mikrofona, procjena se mora obaviti u stvarnom vremenu. Online i offline karakteristike definiraju način učenja iz podataka i predviđanja algoritma strojnog učenja. Online metode učenja uče iz senzorskih podataka u hodu, na primjer Bayesove metode procjene stanja [31] i online probabilističke metode strojnog učenja [32].

Ove su metode posebno prikladne za modele dinamike učenja i predviđanja. Izvanmrežno učenje, koje nazivamo metodom skupnog nadziranog strojnog učenja, zahtijeva unaprijed definirane podatke o obuci. Oni uče iz cijelog skupa podataka za obuku odjednom i ne koriste nove podatke za usavršavanje naučenog modela. Duboko učenje i probabilističko strojno učenje tipične su offline metode strojnog učenja. Ove izvanmrežne metode posebno su primjenjive na zadatke identifikacije i klasifikacije u analizi slike i zvuka.

Na temelju gore navedenih zahtjeva, odabrani algoritmi strojnog učenja moraju uzeti u obzir sljedeće aspekte: opseg podataka, nesigurnost predviđanja i potrebu za online učenjem.

#### **4.5. SVIJEŠT UMJETNE INTELIGENCIJE O VLASTITOJ SITUACIJI NA MORU**

Glavni zadatak u postizanju potpune situacijske svijesti o plovidbi je predstaviti analizu razine sigurnosti i abnormalnosti. Razinu abnormalnosti uglavnom nazivamo nesigurnošću identifikacije i lokalizacije objekta. Kao što je prikazano na slici ispod, takve se informacije mogu dostaviti korištenjem AI metoda i spajanjem podataka s pomorskih senzora, kao što su AIS/GNSS, slike i audio signali navedeni ranije u ovom radu.

Ako se atributi iz otkrivanja i klasifikacije podudaraju s meta podacima iz AIS poruka, na primjer, možemo smatrati da je postignuta pozitivna svijest o situaciji.

Ovo čini osnovu za sljedeću fazu, a to je praćenje identificiranih susjednih objekata i izračunavanje vjerojatnosti sudara korištenjem predviđenih putanja.



**Slika 12: Opći pogled na pomorski situacijski sustav vođen umjetnom inteligencijom [25].**

Područja primjene metoda umjetne inteligencije u pomorskoj navigaciji i situacijskoj svijesti plovila identificirana su kao identifikacija objekata, lokalizacija i analiza putanje. Održivost takve podjele podzadataka i fokusiranja na dubinsko učenje i Gaussove procese za ukupne pomorske situacijske sustave demonstrirana je u Fridmanovom industrijskom radu iz 2017. u kojoj se predlaže korištenje dubokog učenja i različite fuzije senzora kako bi se plovila dala situacijska svijest [33].



#### 4.6. OTKRIVANJE I KLASIFIKACIJA POMORSKIH OBJEKATA

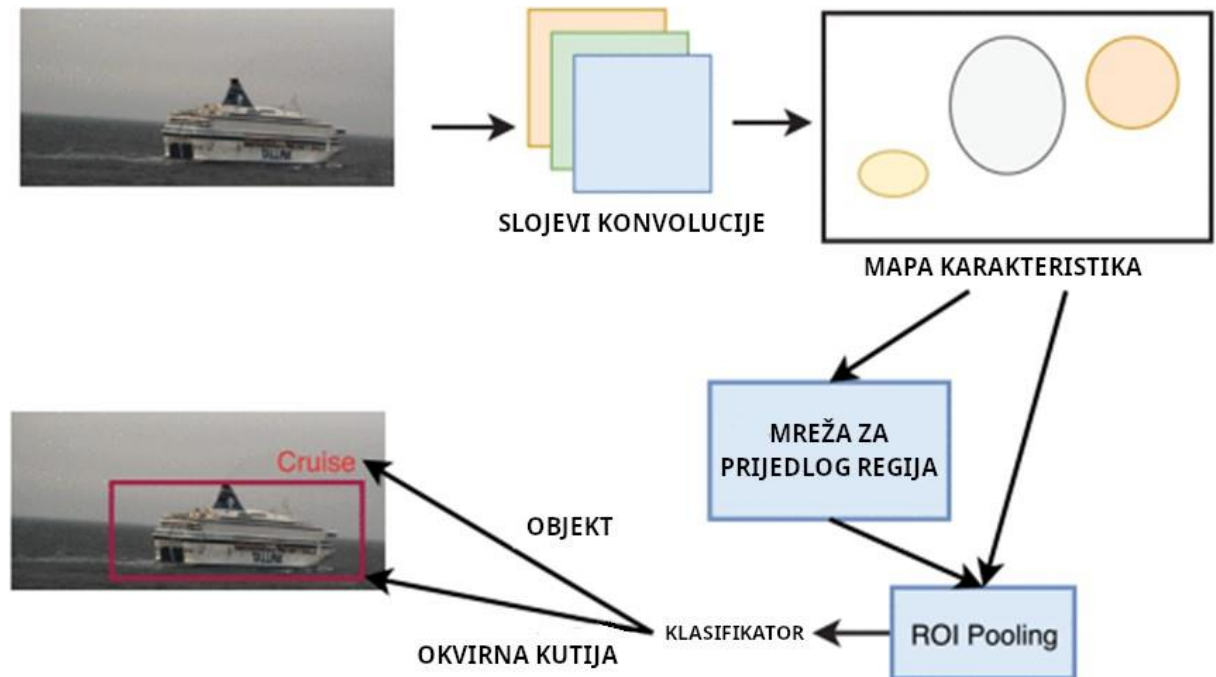
Pojam "objekti" ovdje se odnosi na sve što se manifestira na morskom krajoliku i razlikuje se od pozadine, na primjer, brodovi, morske ptice i motorni čamci. Cilj je otkriti ili klasificirati objekte u dometu senzora plovila. Takvi se zadaci obično izvode pomoću jedne ili više kamera zbog napretka tehnika obrade slike i jednostavnosti implementacije.

Audio podaci se također mogu primijeniti ovdje u tu svrhu. Zanimljivo je da se zapravo vrlo rijetko proučava za pomorske primjene. Radi velikog udjela pozadinske buke iz okoline (npr. kiša, vjetar, morski valovi, zvukovi ptica, ljudska vika i vlastiti motor), korištenje zvuka za detekciju i klasifikaciju pomorskih objekata zahtijeva dodatni signal kondicioniranja. Glavni izazov korištenja slikovnih podataka za otkrivanje objekata je taj što je dimenzija podataka prilično velika.

Izravno korištenje klasičnih CNN-ova (Engl. Convolutional neural networks - Konvolucijske neuronske mreže, dalje: CNN) nije trivijalno, jer su klasični CNN-ovi dizajnirani za klasifikaciju slika, a ne za otkrivanje/klasificiranje višestrukih objekata sa slike. U praksi se mali klizni prozor primjenjuje za rekurzivno pretraživanje cijelog područja velike slike.

Nedostatak je u tome što zahtijeva veliku količinu računalnih napora, a veličina kliznog prozora mora se odrediti unaprijed. To nije uvijek moguće u pomorskom scenariju jer veličina objekata na slici varira ovisno o udaljenosti. Mreža regionalnih prijedloga (Engl. RPN-Region Proposal Network, dalje: RPN ) je potencijalni kandidat za rješavanje ovog problema.

Kao što je prikazano na slici ispod, glavna razlika između klasičnog CNN-a i RPN-a je sloj prijedloga regije, koji daje potencijalno područje manifestacije objekta. Ovo značajno smanjuje područje pretraživanja objekata na slici. Osobito je korisno kada objekti (kao što je mali čamac) pokrivaju vrlo malo područja u smislu piksela.



Slika 13: Opći okvir za otkrivanje brodova pomoću RPN-a [25].

#### 4.7. LOKALIZACIJA POMORSKOG OBJEKTA ZVUKOM

Prednosti korištenja audio podataka za lokalizaciju su u tome što oni mogu biti svesmjerni s pravilnom postavkom mikrofonskog niza, a algoritmi za lokalizaciju su izvedivi nakon što se poduzmu odgovarajuće mjere za uklanjanje pozadinske buke. Jedan od trenutno najsuvremenijih binauralnih okvira za lokalizaciju zvuka naziva se Head-Related Transfer Function (HRTF). Ideja je obnoviti način na koji ljudska uha primaju i percipiraju zvuk i tretirati ljudski način lokaliziranja zvuka kao prijenosnu funkciju.

Umjesto značajki ručne izrade za lokalizaciju izvora zvuka (SSL), duboka neuronska mreža to može postići na način od kraja do kraja. Ključni uvid je kako formulirati problem SSL-a u regresiji/klasifikaciji neuronske mreže i kako dizajnirati ili odabrati odgovarajuću arhitekturu. Provedeno je nekoliko studija o smanjenju buke vjetra.

Međutim, za pomorski scenarij to je još uvijek otvoren problem. Zvuk u morskom okruženju također ima tendenciju putovanja s vjetrom, što može poremetiti postupak lokalizacije objekta putem zvučnih podataka. Srećom, informacije o jačini i smjeru vjetra mogu biti dostupne na brodu (npr. vremenska prognoza i senzor vjetra), što se može uključiti u obuku od kraja do kraja kao apriori znanje za uklanjanje problema s vjetrom [25].

## 5. SIGURNOST I ZAŠTITA AUTONOMNIH BRODOVA

Sigurnost je zaštita od slučajnih incidenata, što znači neželjenih incidenata koji se događaju kao rezultat jedne ili više slučajnosti. Koristi se za sprječavanje nesreća i štiti od ozljeda, rizika ili opasnosti ili ih čini malo vjerojatnim. Gubitak zbog sigurnosnih problema obično je povezan s ljudskim ozljedama ili smrću i pouzdanošću industrijske imovine. S obzirom na sigurnost koda, izraz se koristi da označi da je softver siguran i pouzdan za korištenje.

Sigurnost, s druge strane, znači zaštititi entitet od prijetnji poput mogućeg napada ili drugog zločina. Takvi entiteti mogu biti ljudi, zemlje, organizacije, zgrade ili imovina. To je mjera kojom se osigurava da samo ovlaštene osobe imaju pristup računalnim datotekama. Sigurnost štiti od namjeranih incidenata, što znači željeni incident kao rezultat namjernog i planiranog čina.

Eirik Albrechtsen [34] definirao je sigurnost kao: Uvjet zaštite od planiranih, zlonamjernih i kriminalnih incidenata iz širokog spektra prijetnji, gdje su ono što je zaštićeno sve vrste vrijednosti za organizaciju/pojedinca i incidenti se događaju zbog želje za željenim rezultatom/posljedicom za napadača. Gubitak zbog sigurnosnog incidenta obično se odnosi na informacije i fizičku imovinu. Prema Stuartu Fosteru [33], sigurnost koda je sprječavanje nezakonitih ili neželjenih aktivnosti u softveru, što pomaže osigurati da su sustavi sigurni tijekom napada i sprječava neovlaštene osobe od pristupa.

### *Ranjivosti*

Postojalo je vrijeme kada su predmeti poput tostera, hladnjaka, automobila i posuda samo obavljali zadatke za koje su izvorno dizajnirani. Danas komuniciraju i s internetom. Pomorski sektor polako je shvatio da su brodovi, kao i sve ostalo, sada dio kibernetičkog prostora. Cyber sigurnost ne može biti naknadna misao, mora biti

uključena u arhitekturu i planiranje svega što se razvija, od samog početka. Postoji više čimbenika koji otežavaju kibernetičku sigurnost u pomorskoj industriji. Na primjer, postoji nekoliko različitih plovila koja rade u različitim okruženjima i imaju tendenciju koristiti različite računalne sustave.

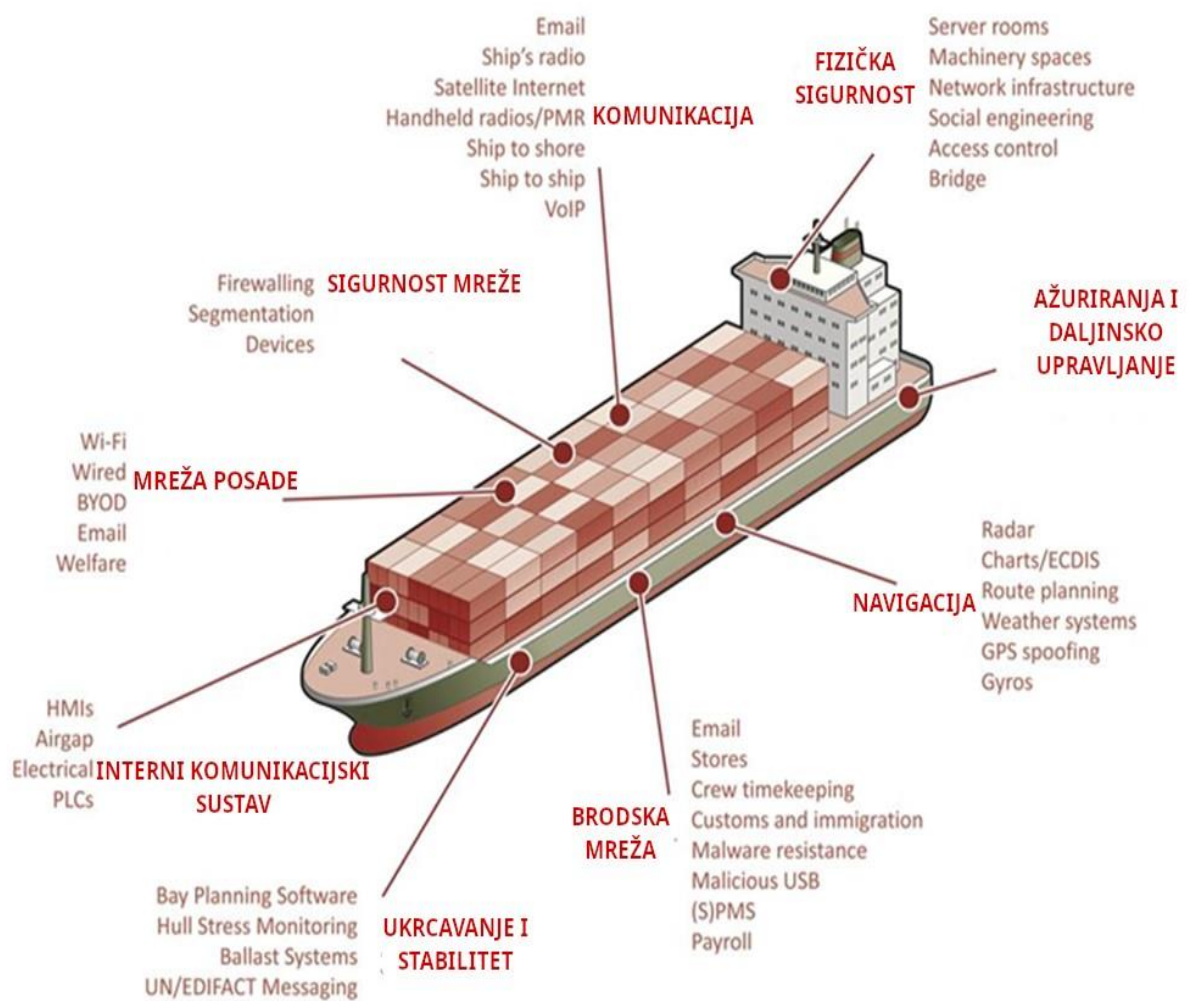
Sustavi su često napravljeni da traju mnogo godina, a kao posljedica toga mnogi su zastarjeli i pokreću operacijske sustave koji više nisu podržani. Moderna pomorska industrija koja koristi informatičke sustave u upravljanju plovilima, navigaciji, istovaru i utovaru, komunikaciji, praćenju kontejnera, rukovanju teretom te računalne sustave koji se koriste u lukama i na obali, čini je ranjivijom na kibernetičke napade. Posljedice više nisu ograničene na plovilo ili vlasnika tereta, već mogu utjecati i na druga plovila.

Ako cyber-napad onesposobi brod u Panamskom kanalu koji blokira kanal, to bi utjecalo na rad obližnjih brodova s potencijalno velikim gubicima (Bajraktari, 2019.). Važnije je nego ikad riješiti inherentne ranjivosti s povećanom upotrebom i oslanjanjem na komunikacijske i digitalne tehnologije, uz integraciju više elektroničkih sustava i naprednu automatizaciju. Osjetljive informacije za brod mogu uključivati njegovu poziciju, pojedinosti o teretu, status i očitavanje operativne tehnologije (OT), potvrde i ovlaštenja. CIA-trijada se može koristiti za procjenu ranjivosti i utjecaja [36]:

- Povjerljivost: Neovlašteni pristup informacijama ili podacima o brodu, putnicima, posadi i teretu.
- Cjelovitost: Kako brod može nastaviti sigurno i učinkovito funkcionirati nakon neovlaštene izmjene, gdje su podaci i informacije izgubili svoj integritet.
- Dostupnost: Uništavanje podataka i informacija ili prekid usluga rezultira gubitkom dostupnosti podataka ili informacija.

Ljudske pogreške pomažu napadačima da uspiju u svojim pokušajima pristupa sustavu. Futureautics Ltd [37] je napisao da je u 2015. 60% kibernetičkih napada

bilo zbog ljudskog kvara. Napravili su istraživanje posade koja se sastojala od 3000 ljudi i pokazalo se da 88% njih nije imalo nikakvu obuku o cyber svijesti. Obuku o svijesti o kibernetičkoj sigurnosti treba proći svaki zaposlenik. Treba ih obučiti i upoznati s kibernetičkim prijetnjama koje postoje. To će smanjiti količinu napada koji su mogući zbog ljudskih pogrešaka.



Slika 14: Kako brod izgleda iz perspektive hakera [14].

Svaka tvrtka treba provesti procjenu prijetnji koja sagledava potencijalne i realne prijetnje s kojima se može suočiti. Pomorski sektor trebao bi razmotriti postupke i sustave na brodu u pogledu njihove otpornosti na trenutnu razinu prijetnje. Složenost broda nastavlja rasti, a s time dolazi i sve veća površina za napad. Osim toga, brodovi postaju sve više povezani s uslugama koje pružaju obalne mreže putem interneta [36]. Slika 14 ilustrira kako bi brod mogao izgledati napadaču. Okolina uključuje dvije različite kategorije tehnologije. Prvo, informacijska tehnologija (IT) gdje se podaci koriste za informacije.

Na primjer, to mogu biti mreže, računari, e-pošta, elektronički priručnici, dozvole i administracija. Drugo, Operativna tehnologija (OT) je mjesto gdje se podaci koriste za industrijske procese. OT sustavi mogu biti SCADA, ECDIS, AIS, GPS, dinamičko pozicioniranje, daljinska podrška, mjerenje i kontrola na brodu, na primjer. Cyber-napad na IT-sustave može naštetiti ugledu ili financijama tvrtke, dok napad na OT-sustave može dovesti do posljedica koje štete životu, okolišu ili imovini [38].

Informacijska i komunikacijska tehnologija (ICT) dovodi pomorsku industriju u eru 'digitalnih brodova'. Pojam je proširenje IT-a i pokriva svaki proizvod koji će dohvaćati, pohranjivati, manipulirati, primati ili prenositi informacije elektroničkim putem u digitalnom obliku. Na tradicionalnim brodovima, ICT i OT korišteni su odvojeni s nekoliko procesa usmjerenih na čovjeka i stoga je dopušten korak po korak pristup cyber ICT sigurnosti.

Sustavi mostova ranjivi su na kibernetičke napade jer su navigacijski sustavi digitalni, povezani s mrežom i imaju sučelja s mrežama na kopnu za izvođenje ažuriranja i pružanje usluga. Sustavi mostova koji nisu povezani s drugim mrežama mogu biti jednako ranjivi. Često dobivaju ažuriranja putem prijenosnih medija s drugih kontroliranih ili nekontroliranih mreža. Rezultati kibernetičkog događaja mogu biti manipulacija ili uskraćivanje usluge, što utječe na svu povezanu navigaciju. To uključuje AIS, ECDIS, VDR, GNSS, Radar, GPS i ARPA. Imaju značajne ranjivosti u kibernetičkoj sigurnosti.

Ovi navigacijski sustavi nemaju nikakvu metodu za provjeru autentičnosti ili šifriranje signala. Sustavima se često upravlja s administratorskim pravima i bez potrebe za unosom lozinke. Oni su, primjerice, osjetljivi na ometanje. Još jedan

sustav mosta je Voyage Data Recorders (VDR). Može se usporediti s crnom kutijom u avionu. Prikuplja podatke iz različitih pomorskih sustava za izvještavanje o incidentima. Imaju ranjivosti poput slabe enkripcije, provjere autentičnosti, mehanizama ažuriranja firmvare sustava i drugih opasnih ranjivosti softvera.

Napad može rezultirati neispravnim ili nedostajućim podacima. VDR bi mogao spremati relevantne podatke za cyber istrage u budućnosti [39]. GNSS je skraćenica za Global Navigation Satellite System i koristi više satelita za globalne podatke o položaju. To je jedan od najsloženijih sustava na modernim mostovima. GPS je GNSS sustav. Njegovi signali imaju nisku energiju i jednostavno preopterećenje. Ako je GNSS pogođen, to može rezultirati kvarom drugih sustava, poput AIS-a. Mogući napadi s ograničenim naporom su ometanje i prijevara. Također su osjetljivi na modificiranje paketa.

AIS je skraćenica od Automated Identification System i to je obvezni sustav praćenja plovila za sve putničke i komercijalne brodove iznad 300 tona. Djeluje tako da dobiva GPS koordinate i razmjenjuje identitet plovila, poziciju, kurs, status plovidbe i neke druge informacije s obližnjim plovilima, instalacijama na moru i baznim stanicama. Informacije se emitiraju putem pomorskog radija ili satelita. Obično se koristi kombinacija GPS-a i VHF-radio komunikacije. AIS signali se oslanjaju na izbjegavanje sudara i praćenje situacije. Također se koristi u Službi za promet plovila, za operacije traganja i spašavanja te istrage nesreća. Sustav automatizirane identifikacije ranjiv je na mnoge napade.

Postoji poznata slabost u signalima i protokolima koji se koriste za slanje podataka. Mogući su i napadi temeljeni na implementaciji i napadi specifični za protokol. AIS nema nikakve provjere autentičnosti niti provjere integriteta. Omogućuje stvaranje lažnih plovila, otimanje komunikacije postojećih plovila, modificiranje detalja broda, lažiranje signala, trajno onemogućavanje AIS praćenja i pokretanje lažnih SOS upozorenja ili upozorenja o sudaru. Budući da se AIS podaci prenose putem VHF radija, prima ih bilo tko s AIS prijarnikom. Posljedično, mogli bi ga iskoristiti kriminalci, pirati ili drugi napadači kako bi dobili informacije o lokaciji određenih brodova i tereta.



Druga moguća posljedica je gubitak dostupnosti. U područjima visoke gustoće gdje puno brodova prenosi AIS poruke, izazov je učinkovito prikupiti, obraditi i preuzeti ih sve. To dovodi do gubitka mnogih poruka zbog kolizije podataka. Istraživanje je pokazalo da satelitski AIS prima manje od 50% poruka u područjima srednje do visoke gustoće. Pružatelji moraju očistiti ili "ukloniti" podatke, što dodaje značajno kašnjenje u isporuku poruka. Napadač može iskoristiti ovu ranjivost pokretanjem flooding napada.

Ne postoje provjere valjanosti. Stoga je moguće poslati AIS poruku s bilo kojeg mjesta za plovilo na drugom mjestu. Još jedna ranjivost je nedostatak vremenskih provjera. Vremenske oznake nisu uključene u poruke što omogućuje ponavljanje valjanih i postojećih AIS informacija. Osim toga, kvar GPS-a/loš prijenos kvar AIS-a, greške u bitovima AIS-a i zatajenje podataka može utjecati na dostupnost i/ili cjelovitost. Na temelju sadržaja AIS podataka, kriminalci i teroristi vjerojatno su najviše zainteresirani za izvođenje napada.

Također bi moglo biti zanimljivo natjecateljima i aktivistima. Vjerojatnost da će biti uhvaćen je manja ako napadač može zbuniti ili sakriti svoje aktivnosti. Nema jednostavnih rješenja za ublažavanje problema s AIS-om jer ona također postoje u jezgri protokola. Buduće verzije trebale bi uključivati provjere valjanosti i autentifikacije te enkripciju [40].



## **6. LEGALAN STATUS AUTONOMNIH PLOVNIH OBJEKATA**

Pomorsko pravo je funkcionalan izraz koji se koristi za opisivanje čitavog niza zakona i drugih izvora koji reguliraju pravni okvir vezan za brodove i njihovu operaciju. Obuhvaća različite pravne sustave, od međunarodnog prava do regionalnih i nacionalnih pravila pa sve do lokalnih propisa. Obuhvaća pitanja javnog interesa kao što su sigurnost, zaštita okoliša, kao i civilna pravna pitanja poput ugovora o prijevozu, odgovornosti i naknade štete, spašavanja te pravila vezanih uz pomorske rizike i osiguranje.

### **6.1. UNCLOS**

Konvencija o Međunarodnim pravilima za sprečavanje sudara na moru iz 1972. godine (International Regulations for Preventing Collisions at Sea, dalje: COLREGS) primarni je međunarodni instrument u vezi s sprečavanjem sudara na moru i pravilima navigacije. Konvencija COLREGS predstavlja pokušaj da se plovidba učini sigurnijom uspostavljanjem zajedničkih obrasci ponašanja pri navigaciji i standardizacijom određene opreme na brodovima.

Pravilo 2 COLREGS propisuje da "ništa u COLREGS-u neće osloboditi bilo koji brod, vlasnika, zapovjednika ili posadu od posljedica bilo kakvog zanemarivanja usklađivanja s ovim pravilima ili zanemarivanja bilo koje mjere predostrožnosti koja može biti potrebna uobičajenoj praksi mornara ili posebnim okolnostima slučaja". Pravilo 5 COLREGS navodi da "svaki brod mora uvijek održavati odgovarajući nadzor pogledom i sluhom, kao i svim dostupnim sredstvima prikladnim u vladajućim okolnostima i uvjetima kako bi se potpuno procijenila situacija i rizik sudara".

Na temelju navedenih pravila, čini se da se očekuje da će posada uvijek biti na brodu kako bi osigurala ispunjavanje zahtjeva nadzora pogledom i sluhom. Međutim, postoje argumenti da se to može zadovoljiti korištenjem audio-vizualne tehnologije s obzirom na to da su sudovi prepoznali upotrebu informacija iz obalnog radarskog postrojenja u slučaju Nordic Ferry i korištenje radara kao odgovarajućeg sredstva.

Unatoč tome, važno je da autonomni brod bude sposoban odgovarajuće reagirati u složenim i promjenjivim situacijama. Prema tome, osim ako autonomni brod može zadovoljiti zahtjev iz Pravila 5 i reagirati na potencijalne sudare barem s istom razinom vještine i intuicije kao iskusni pomorac, COLREGS bi mogao trebati biti izmijenjen kako bi se omogućilo legalno djelovanje autonomnih brodova.

Također, u vezi s pitanjem sudara, Konvencija o sudarima iz 1910. godine usvaja režim utemeljen na krivnji i odgovornosti. Mnoga pitanja mogu nastati u vezi s poštovanjem ove konvencije. Utvrđivanje tko je kriv u slučaju neupravljanog broda može predstavljati problem. Može li umjetna inteligencija biti "kriva" i stoga odgovorna? Bi li situacija bila drugačija ako bi došlo do sudara između vođenog broda i neupravljanog broda?

S obzirom na pretpostavku da računala ne prave greške, hoće li odgovornost biti isključivo na vođenom brodu? Imajući na umu da brod kao objekt ne može biti kriv, treba li proširiti krug osoba koje će biti odgovorne za postupke neupravljanog broda, kao što su proizvođači sustava ili operatori? Treba li uvesti režim stroge odgovornosti? Soyer [41] sugerira da se za autonomne brodove usvoji režim stroge odgovornosti.

Naravno, upotreba režima stroge odgovornosti nije nova u međunarodnim konvencijama. Opravdanje za to je da će u izgradnji autonomnog broda biti uključen velik broj pojedinaca. Sudovi će se tada baviti raspodjelom odgovornosti između proizvođača hardvera, programera senzora, razvojnih programera i drugih relevantnih osoba. To će biti vremenski zahtjevno i može biti nepravedno prema trećim stranama.

Još jedan argument za režim stroge odgovornosti je taj da se tijekom godina inteligentni strojevi prilagođavaju uputama koje primaju od ljudi koje nisu bile korištene pri njihovom stvaranju. Ako je to istina, testiranje odgovornosti utemeljene na krivnji može biti nemoguće u situaciji u kojoj se autonomni brod prilagodio

naknadnim uputama dobivenim tijekom svog rada, a te upute su drugačije od onih koje su prvobitno programirane u brod.

Soyer [41] također predlaže da postoje iznimke od režima stroge odgovornosti. Na primjer, ako se autonomni brod sudari dok nije u operaciji, režim stroge odgovornosti ne bi trebao biti primijenjen jer rad broda nije stvorio rizik za plovidbu. Soyer [41] dalje tvrdi da se kada je brod u nadležnosti operatora, treba koristiti sustav utemeljen na krivnji u raspodjeli odgovornosti.

Dodatno komplicirajući pitanje odgovornosti u slučaju sudara, tko bi trebao snositi odgovornost u slučaju kibernetičkog napada koji dovodi do sudara? Predlaže se da je pošteno da odgovornost snosi vlasnik broda koji je pustio autonomni brod na more znajući da će, jednom kad dođe do napada, biti teško da obalni kontrolori interveniraju. čak i kada se uspostavi režim stroge odgovornosti, postavlja se pitanje tko je odgovoran, proizvođač ili vlasnik broda?

Privlačno je reći da bi proizvođač softvera trebao snositi odgovornost za sudar s obzirom na to da razumije svaki detalj softvera i trebao bi biti odgovoran za gubitke povezane s kvarom softvera. Međutim, pragmatičnije je tvrditi da bi odgovornost trebala snositi vlasnik broda zbog sljedećih razloga:

- dugo je pomorsko načelo da bi svatko tko se bavi opasnom djelatnošću trebao snositi odgovornost;
- očekuje se da će vlasnik broda održavati i pregledavati softver nakon isporuke broda;
- P&I klubovi imaju pokriće koje se proširuje na vlasnike brodova kako bi osigurali da treća strana bude pravedno nadoknađena za gubitke zbog sudara.

Prema tome, važnost sigurnosti ne može se dovoljno naglasiti. Stoga je ključno da se pitanje usklađivanja autonomnih brodova s COLREGS-om riješi. To se može postići stvaranjem novog skupa pravila za plovidbu takvih brodova. Takva pravila će uzeti u obzir regulaciju prometa između autonomnih brodova i vođenih brodova.

Također će uzeti u obzir etičke dileme povezane s autonomnim brodovima. Ta će pravila činiti dio međunarodne regulacije i revizije pomorskog prometa. Uistinu, pitanje utvrđivanja odgovornosti u slučaju sudara izuzetno je važno i trebalo bi se pažljivo razmotriti [41].

## 6.2. JESU LI AUTONOMNI PLOVNI OBJEKTI BRODOVI?

Brodovi su definirani putem nekoliko međunarodnih konvencija. Međutim, prije nego što se može raspravljati o primjenjivosti pomorskog prava, važno je utvrditi može li se reći da je plovilo bez posade, tj. bespilotni brod, zapravo brod. Teško je složiti se oko jedinstvene definicije broda. Gahlen [42] navodi da postoje određene karakteristike inherentne plovilu.

Te karakteristike uključuju plovnost; sposobnost kontroliranog kretanja po vodi; sposobnost prijevoza tereta i putnika preko svoje mase; i sudjelovanje u pomorskoj plovidbi. Bork [43] napominje da, osim navedenih značajki, takvo plovilo ne smije biti zanemarive veličine. Dodatno, i međunarodne konvencije se ne slažu oko jedne definicije. Konvencija UN-a o pravu mora ne definira brod.

Konvencija UN-a o uvjetima za registraciju brodova definira brod kao "svako samopokretno plovilo koje se koristi u međunarodnoj plovidbi za prijevoz tereta, putnika ili oboje, osim plovila manjih od 500 bruto registarskih tona". Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja brodova također definira "brod" kao "plovilo bilo koje vrste koje djeluje u morskome okolišu i uključuje hidroavione, vozila na zračnom jastuku, podmornice, plutajuće objekte i fiksne ili plutajuće platforme". Konvencija o suzbijanju nezakonitih radnji protiv sigurnosti pomorske plovidbe (SUA konvencija) opisuje brod kao "plovilo bilo koje vrste koje nije trajno pričvršćeno za morsko dno, uključujući dinamički podržane brodove, podmornice ili bilo koja druga plutajuća plovila".

Konvencija o međunarodnim pravilima za sprječavanje sudara na moru (COLREGS) određuje da je "plovilo" "svaki opis vodenih vozila, uključujući vodene

letjelice i hidroavione, koji se koriste ili se mogu koristiti kao sredstvo prijevoza po vodi". Nairobi međunarodna konvencija o uklanjanju olupina definira brod kao "morsko plovilo bilo koje vrste i uključuje hidroavione, vozila na zračnom jastuku, podmornice, plutajuće objekte... osim kada su takve platforme na lokaciji uključene u istraživanje, eksploataciju ili proizvodnju mineralnih resursa morskog dna".

Prema Međunarodnoj konvenciji o unifikaciji određenih pravila zakona o teretnicama (Haaške pravilo), "brod" znači "svako plovilo koje se koristi za prijevoz tereta morem". Unatoč razlikama u navedenim definicijama, može se primijetiti da nijedna od njih ne zahtijeva da brod ima ljudsku posadu na brodu ili da bude upravljana ljudskom posadom kako bi se smatralo brodom. Sve navedene definicije, uključujući i druge koje nisu razmatrane ovdje, ne uzimaju u obzir prisutnost posade, uključujući kapetana, kao bitan dio pojma broda u regulatornim definicijama broda.

Daljnje istraživanje nacionalnih zakona sugerira isti stav. Britanski Zakon o trgovačkom pomorstvu iz 1995. godine definira brod kao "svaki opis plovila koje se koristi u plovidbi". Nigerijski Zakon o trgovačkom pomorstvu također definira brod kao "plovilo bilo koje vrste koje djeluje u morskome okolišu i uključuje hidroavione, vozila na zračnom jastuku, podmornice, plutajuće objekte i fiksne ili plutajuće platforme ili mobilne odobalne jedinice kada se takve platforme ili jedinice ne nalaze na lokaciji angažirane u istraživanju, eksploataciji, skladištenju ili proizvodnji mineralnih resursa morskog dna".

Članak 11 UAE Pomorskog zakona definira brod kako slijedi: "1. Plovilo znači svaku konstrukciju koja se normalno koristi ili je napravljena za plovidbu morem, bez obzira na njegovu snagu, tonu ili svrhu zbog koje plovi. Primjenom odredbi Zakona, letjelice na zračnom jastuku koje se koriste u komercijalne ili nekomercijalne svrhe smatrat će se brodovima. Sve prateće dijelove broda potrebne za njegovo funkcioniranje smatra se dijelom broda i iste prirode."

Zanimljivo je primijetiti da ne postoje međunarodne konvencije ili nacionalni zakoni koji čine prisutnost posade kriterijem za to da se vodeni brod ili konstrukcija smatra brodom. Mnogi stručnjaci se slažu da bi za potrebe Pomorskog prava bespilotni brodovi trebali biti smatrani "brodovima", kako bi ih se moglo integrirati u

postojeće pravne okvire, jer će njihova operacija predstavljati mnoge iste rizike od sudara i onečišćenja kao i kod brodova s posadom [44].



## 7. ZAKLJUČAK

Autonomni plovni objekti predstavljaju inovativnu revoluciju u pomorskom sektoru, obećavajući potencijalne prednosti učinkovitosti, sigurnosti i održivosti. Istraživanja su istaknula niz prednosti koje autonomni plovni objekti donose, uključujući povećanu sigurnost, veću efikasnost operacija na moru i smanjenje ljudskih grešaka.

Analizirani su i tehnički aspekti autonomnih plovila, uključujući senzorske sustave, upravljačke mehanizme i komunikacijsku infrastrukturu. Rezultati ukazuju na ključnu ulogu tehnoloških inovacija, kao što su umjetna inteligencija i senzorska tehnologija, u razvoju autonomnih sistema.

Istraženi su također izazovi i potencijalne prepreke u širokoj implementaciji autonomnih plovnih objekata, kao što su pravne i regulatorne poteškoće i etički aspekti. Rad naglašava da će autonomni plovni objekti odigrati ključnu ulogu u budućnosti pomorske industrije. Da bi se ostvarila ta budućnost, neophodna je suradnja sa regulatornim tijelima, uspostavljanje strogih sigurnosnih standarda i ulaganje u obuku i prilagodbu radne snage.

Konačno, autonomni plovni objekti predstavljaju transformaciju koja će oblikovati budućnost pomorske industrije. Njihova implementacija zahtijeva multidisciplinarni pristup i saradnju različitih stručnjaka kako bi se osiguralo da budući razvoj autonomnih plovila bude siguran, efikasan i održiv.

## LITERATURA

- [1] Metric assessment of autonomous capabilities in unmanned maritime vehicles, Carlos C. Insaurralde , David L. Lane
- [2] Unmanned Surface Vehicles – A Survey, Volker Bertram
- [3] The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats Andrzej Felski and Karolina Zwolak
- [4] - The Legal Status and Operation of Unmanned Maritime Vehicles Robert Veala , Michael Tsimplisb , and Andrew Serdyc
- [5] Bratić, K.; Pavić, I.; Vukša, S.; Stazić, L. Review of Autonomous and Remotely Controlled Ships in Maritime Sector. *Trans. Marit. Sci.* 2019
- [6] Wróbel, K., Montewka, J. & Kujala, P., 2017. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety.
- [7] Mišković, D., Bielić, T. & Čulin, J., 2018. Impact of Technology on Safety as Viewed by Ship Operators. *Transactions on Maritime Science*, 7(1), pp.51–58.
- [8] Rødseth, O.J., Nordahl, H., 2017. Norwegian Forum for Autonomous Ships. *Definitions for Autonomous Merchant Ships.*
- [9] LI Wenhua, ZHANG Junyan, LIN Shanying. The Development Path of Maritime Autonomous Surface Ships Technology [J]. *SHIP ENGINEERING*, 2019, 41 (07): 64-73.
- [10] Borkamo, R., Solvoll, G. and Wetting, K. B. (2018) Autonome skip er på vei.
- [11] Skoglund, U. (2018) Førerløse ferger kan erstatte gangbruer, Gemini.no.
- [12] <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2017/20-06-2017-rr-demonstrates-worlds-first-remotely-operated-commercial-vessel.aspx> ,posjećeno 21.07.2023
- [13] <https://www.finferries.fi/en/news/press-releases/finferries-falco-worlds-first-fully-autonomous-ferry.html> , 20.7.2023.
- [14] Safety and security of autonomous vessels Based on the Yara Birkeland project, Marte Hvarnes Evensen

- [15] State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships Le Wang 1 , Qing Wu 1 , Jialun Liu 2,3,\* , Shijie Li 1 and Rudy R. Negenborn
- [16] C. C. Liang and W. H. Cheng, "The optimum control of thruster system for dynamically positioned vessels", *Ocean Eng.*, vol. 31, str. 97-110, 2004.
- [17] R. Skjetne et al., "AMOS DP research cruise 2016: Academic full-scale testing of experimental dynamic positioning control algorithms onboard R/V Gunnerus", *Proc. ASME 36th Int. Conf. Ocean Offshore Arctic Eng.*, vol. 1, Jun. 2017.
- [18] Remote and autonomous ships-the next steps, E Jokioinen, J Poikonen, R Jalonen, J Saarni, 2016.
- [19] J. Kostamovaara et al., "On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques", *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 2, str. 1-15, 2015.
- [20] S. Thombre *et al.*, "Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.
- [21] W. Förstner and B. P. Wrobel, *Photogrammetric Computer Vision*, Cham, Switzerland:Springer, 2016.
- [22] W. S. Kim, A. I. Ansar, R. D. Steele and R. C. Steinke, "Performance analysis and validation of a stereo vision system", *Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 2, str. 1409-1416, 2005.
- [23] M. Bertozzi, A. Broggi, C. Caraffi, M. Del Rose, M. Felisa and G. Vezioni, "Pedestrian detection by means of far-infrared stereo vision", *Comput. Vis. Image Understand.*, vol. 106, no. 2, str. 194-204, 2007.
- [24] O. Eldwaik and F. F. Li, "Mitigating wind induced noise in outdoor microphone signals using a singular spectral subspace method", *Technologies*, vol. 6, no. 1, str. 19, 2018.
- [25] Wang, L., Wu, Q., Liu, J., Li, S., & Negenborn, R. (2019). *State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships. Journal of Marine Science and Engineering*, 7(12), 438.
- [26] E. Nemer and W. Leblanc, "Single-microphone wind noise reduction by adaptive postfiltering", *Proc. IEEE Workshop Appl. Signal Process. to Audio Acoust.*, str. 177-180, 2009.

- [27] A. Norris, Radar and AIS: Integrated Bridge Systems, London, U.K.:The Nautical Institute, vol. 1, 2008.
- [28] M. J. Kearns and U. V. Vazirani, An Introduction to Computational Learning Theory, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 1994.
- [29] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville, Deep Learning, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2016.
- [30] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, Gaussian Processes for Machine Learning, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2006.
- [31] D. P. Mandic and J. A. Chambers, Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms Architectures and Stability, Hoboken, NJ, USA:Wiley, 2001.
- [32] S. Särkkä, Bayesian Filtering and Smoothing, Cambridge, U.K.:Cambridge Univ. Press, 2013.
- [33] K. P. Murphy, Machine Learning: A Probabilistic Perspective, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2012.
- [34] Albrechtsen, E. (2003) Security vs safety
- [35] Foster, S. (2020) Software Safety vs. Software Security: Understanding the Difference.
- [36] BIMCO, CLIA, ICS, INTERCARGO and INTERTANKO (2016)
- [37] Futureautics Ltd (2016) Autonomous Ships.
- [38] Fosen, J. (2019) Cyber Security Awareness - in the maritime industry.
- [39] Jones, K. and Tam, K. Cyber-Risk Assessment for Autonomous Ships.
- [40] Craiger, J.P., Haass, J. C. & Kessler, G.C. (2018) A Taxonomy Framework for Maritime Cybersecurity: A Demonstration Using the Automatic Identification System, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 12(3), s. 429-437.
- [41] Soyer, Barış, Autonomous Vessels and Third-Party Liabilities,
- [42] Gahlen, Sarah Fiona, Ships Revisited: A Comparative Study, (2014)
- [43] Bork, Katharina and others, The Legal Regulation of Floats and Gliders—In Quest of a New Regime? (2008)

[44] Unmanned ships: coping in the murky waters of traditional maritime law  
damilola Osinuga, 2020.