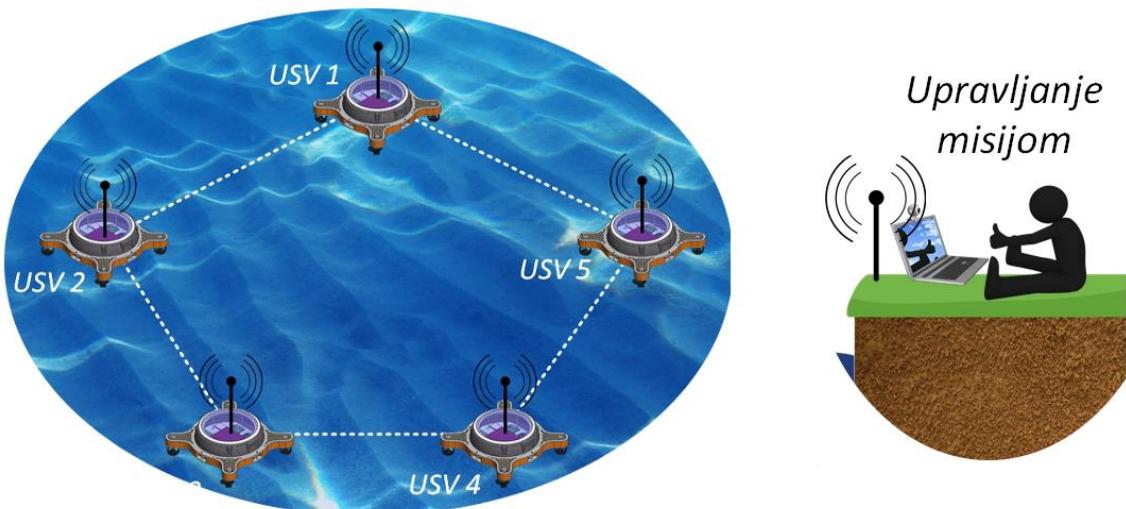




## D6.4 Izvještaj o validacijskim eksperimentima Scenarija 3



Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije



10. prosinca 2021.

## Sadržaj

Uvod	2
Validacija scenarija 2	2
Validacija algoritma adaptacije orijentacije formacije smjeru morske struje	2
Validacija metode formacije vozila koja povećava energetsku efikasnost	6
Zaključak	9

## Uvod

Ovaj dokument predstavlja rezultate validacije okolišno-adaptivnog algoritma za distribuirano upravljanje formacijom bespilotnih površinskih plovila. Tehnički podaci plovila korištenih tijekom izvođenja eksperimenata detaljnije su opisani u D6.1. Kao vodič eksperimentalne validacije algoritama u D3.1 je definiran scenarij 2. S obzirom na kompleksnost ostvarivanja povoljnih uvjeta na moru eksperimenti potrebni za validaciju scenarija su obavljeni u simulaciji i u laboratorijskim uvjetima. Cilj scenarija je validacija funkcionalnosti algoritma povezane s prilagodbom orientacije linijske formacije na smjer strujanja vode u svrhu štednje energije sustava.

Dokument predstavlja rezultat aktivnosti T6.5. „Scenarij 3: Upravljanje formacijom USV-ova s adaptacijom u odnosu na okoliš.“ Shodno tome rezultati validacije predstavljaju i važan korak u dostizanju cilja 5 „Eksperimentalna validacija razvijenih kooperativnih upravljačkih algoritama primijenjenih na flotu bespilotnih plovila i bespilotnu ronilicu“.

## Validacija scenarija 2

Eksperimente opisane u scenariju 2 smo podijelili na dvije cjeline. Prva cjelina se bavi validacijom funkcionalnosti algoritma upravljanja formacijom s adaptacijom na morske struje, odnosno održavanje orientacije linijske formacije više plovila u smjeru toka morske struje. Eksperimenti u stvarnim uvjetima su teško izvedivi zbog nemogućnosti utjecanja na morskou struju. Iz tog razloga smo odlučili validirati algoritam u simulacijskim uvjetima što je prikazano u slijedećem poglavlju.

Slijedeća cjelina nastoji validirati metodu minimizacije utroška energije robotskog sustava sastavljenog od više agenata u morskoj struci formirajući linijsku formaciju u smjeru toka. Kako bi testirali postavljenu hipotezu uštade energije postavljanjem vozila u liniju s tokom morske struje bilo je nužno kreirati kontrolirane uvjete za prikladnu analizu. Kao sistematičan način odabrali smo generiranje strujnog toka u unutarnjem bazenu dok vozila održavaju poziciju.

## Validacija algoritma adaptacije orientacije formacije smjeru morske struje

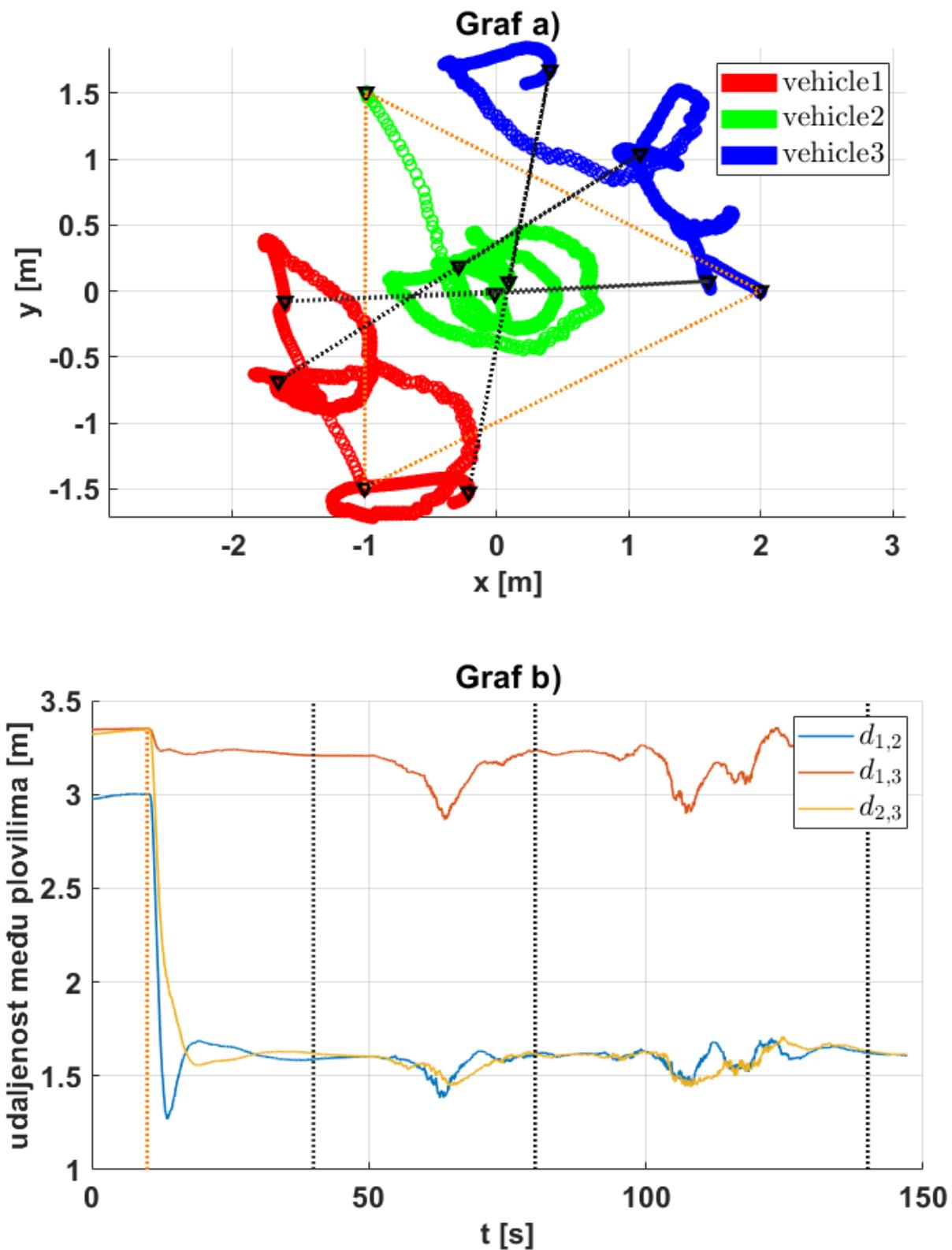
Unutar simulatora realiziranog unutar ROS okruženja smo iskoristili modeli vozila prikladne za ovu validiranje ovog algoritma. Sva tri plovila su simulirana unutar programskog alata ROS na jednom računalu. Strujanje vode smo modelirali kao homogeni tok koji utječe na plovilo po modelu objašnjrenom u D3.4.

Na slici Slika 1 i Slika 2 su prikazani odzivi simulacijskog eksperimenta s tri površinska plovila. Na grafovima su posebno naznačeni značajni trenutci tijekom eksperimenta

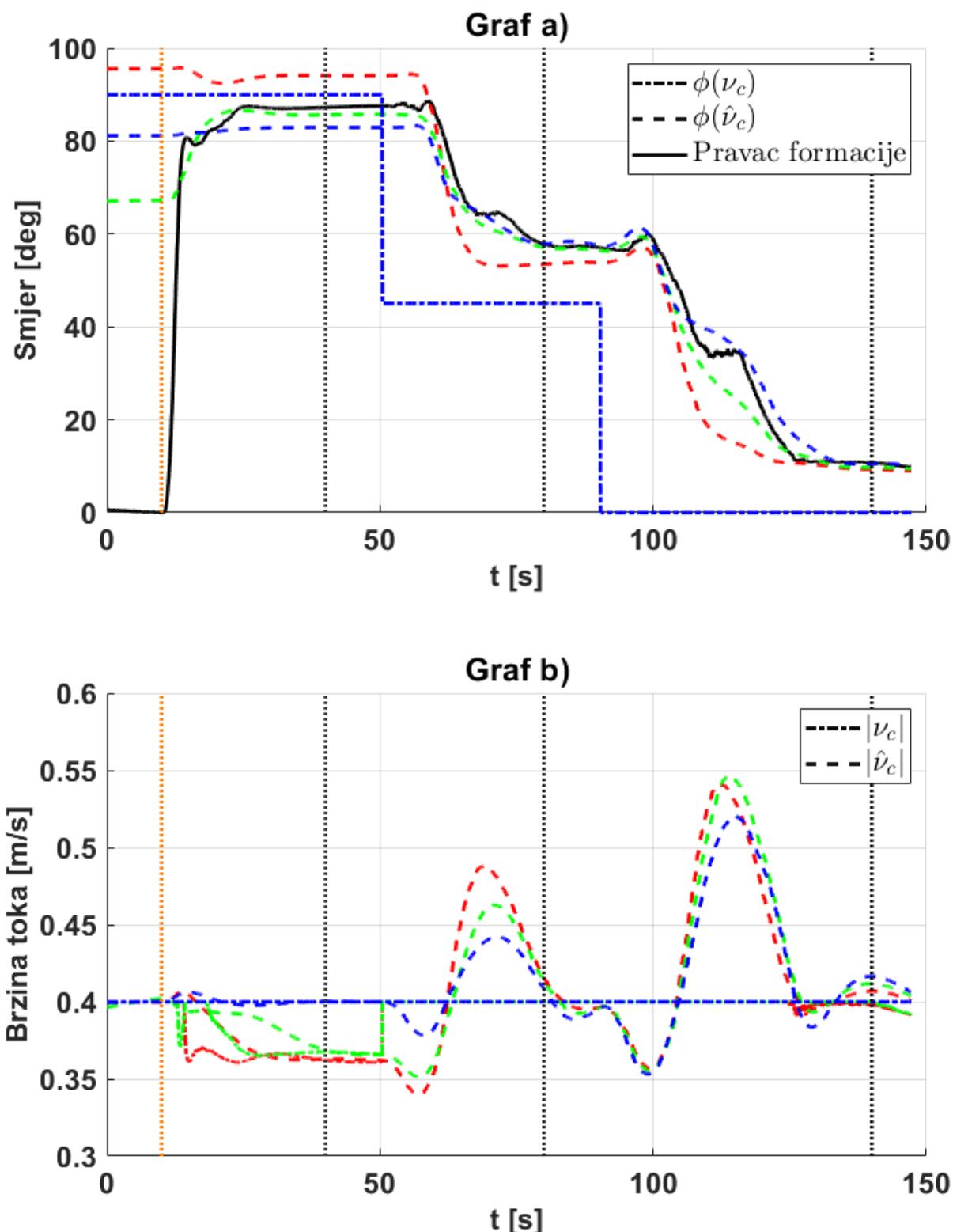
sa crtkanom linijom kao sinkronizacija među grafovima radi preglednosti. Vremenski trenutci su kako slijedi: u trenutku  $t = 10\text{s}$  (prikazano narančastom bojom) označavamo početak gdje adaptivni algoritam počne djelovati nakon kojega se formacija prilagođava uvjetima u okolišu (smjeru strujanja); u trenucima  $t = \{40, 80, 140\}\text{s}$  (prikazano crnom bojom) se sustav ustali na stacionarnu vrijednost nakon prethodne promijene smjera morske struje. Graf a) sa slike Slika 1 prikazuje 2D lokacije plovila tijekom eksperimenta unutar kojeg trokuti prikazuju pozicije vozila u ključnim trenutcima a crtkane linije povezuju te točke radi vizualizacije trenutnog izgleda formacije. Graf b) sa slike Slika 1 prikazuje udaljenosti među plovilima  $d_{ij}$  koje nam prikazuju ponašanje algoritma za održavanje izgleda formacije. Graf a) sa slike Slika 2 prikazuje brzinu strujanja vode gdje  $|v_c|$  prikazuje simuliranu brzinu morske struje dok  $|\hat{v}_c|$  prikazuje estimat brzine morske struje svakog od plovila. Graf b) sa slike Slika 2 prikazuje smjer strujanja vode u odnosu na x os gdje  $\phi(v_c)$  predstavlja stvarni smjer gibanja toka,  $\phi(\hat{v}_c)$  estimat smjera toka na svakom od vozila, a pravac formacije je stvarna vrijednost smjera u kojem linijska formacija održava poziciju.

Za potrebe simulacije, brzina strujanja vode je postavljena na razumnu razinu od  $0.4\text{m/s}$  što je vidljivo sa grafa b) slike Slika 2. Vrijednost je odabrana s obzirom na maksimalnu brzinu koju plovilo može postići od  $1\text{m/s}$  kako bi se ostavilo dovoljno potiska za manevriranje. Tijekom eksperimenta jedino se mijenja smjer strujanja vode dok apsolutna brzina toka ostaje ista. Linijski razmak među vozilima nije bitan za potrebe ovog eksperimenta te je postavljen na  $1.5\text{m}$ .

Sa grafova slike Slika 2 je vidljivo kako metoda estimacija vodenog toka u simulaciji daje približnu estimaciju toka. Zbog načina estimacije morske struje očekivano je da će postojati kašnjenje u estimaciji što je jasno vidljivo prilikom nagle promijene smjera toka u trenutcima  $t = 50\text{s}$  i  $t = 90\text{s}$  gdje dolazi do kašnjenja od 10-ak sekundi u promjeni estimata. Stvarna orientacija koju vozila opisuju dobro prati srednju vrijednost svi estimata morske struje označeno kao pravac formacije. Za odstupanje od estimata izračunali smo srednju kvadratnu pogrešku od  $MSE(PF - \phi(\hat{v}_c)) = 12.6384^\circ$ . Sa grafa a) slike Slika 1 je orientacija linijske formacije jasno naznačena u značajnim trenutcima gdje je sustav došao u stacionarno stanje. Udaljenosti među vozilima prikazani grafom b) slike Slika 1 prikazuju zadovoljavajuće održavanje željene udaljenosti od  $1.5\text{m}$  među vozilima.



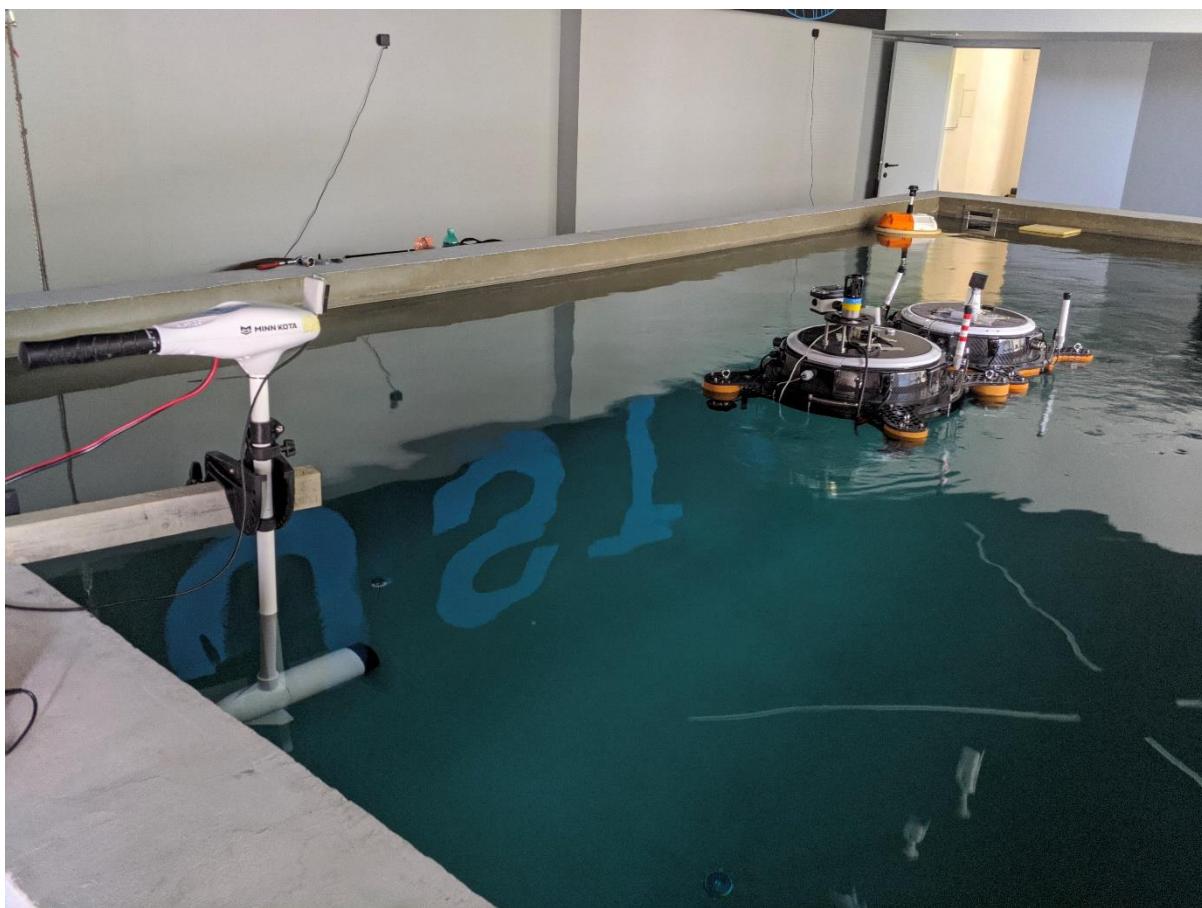
Slika 1. Pozicije vozila sakupljene tijekom eksperimenta validacije algoritma adaptivne promjene formacije ovisne o smijeru morske struje.



Slika 2. Estimati brzine sakupljeni tijekom eksperimenta validacije algoritma adaptivne promjene formacije ovisne o smijeru morske struje.

## Validacija metode formacije vozila koja povećava energetsku efikasnost

Testiranje hipoteze postavljene u D3.4 je izvedena u laboratorijskim uvjetima u unutarnjem bazenu Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije prikazanog slikom Slika 3. Zbog nedostupnosti GPS signala unutar zatvorenih prostora, za potrebe unutarnje lokalizacije vozila postavljen je lokalacijski sustav Pozyx. Sustav koristi mrežu od šest uređaja (sidara, engl. *anchors*) postavljenih oko bazena (vidljivo na zidu na slici Slika 3) kako bi odredio preciznu lokaciju markera (engl. *tags*) postavljenih na vozila. Udaljenosti među *anchor*-ima su umjerene laserskim mjeračem kako bi se postigla preciznost lokalizacije *tag*-a bolja od 10cm.



*Slika 3. Slika eksperimenta s dvije platforme PlaDyPos koje održavaju poziciju u vodenom toku generiranom vanbrodskim motorom*

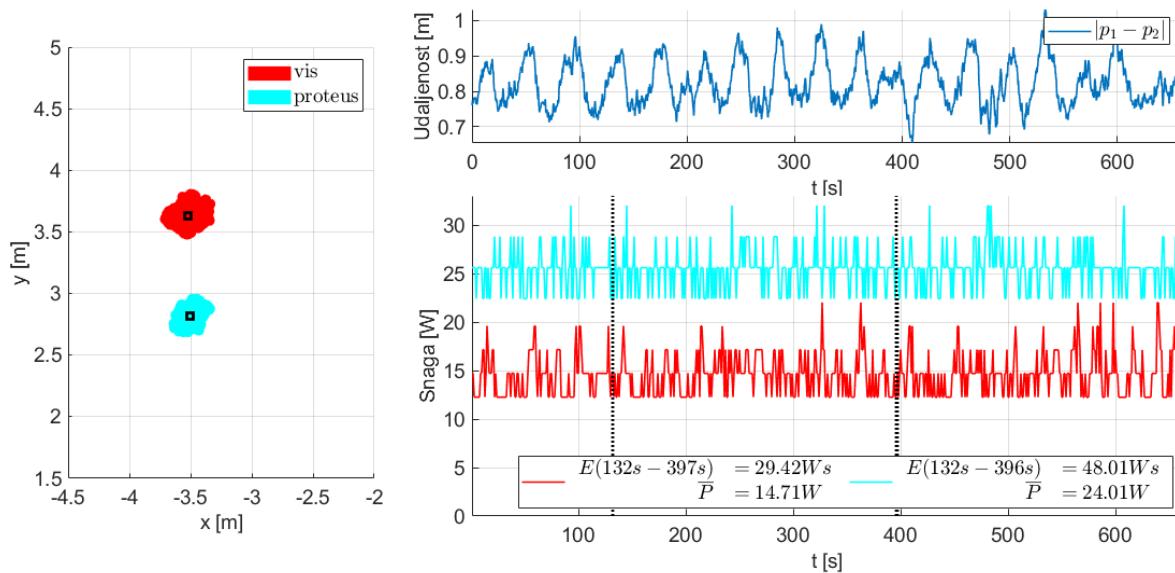
Na slici Slika 3 je prikazana slika eksperimenta gdje dvije platforme održavaju poziciju u vodenom toku. Za potrebe emulacije vodenog strujnog toka iskoristili smo električki vanbrodski motor. Vanbrodski motor je pozicioniran na lokaciju  $\eta_m = (-3.5, 0.8) \text{ m}$ .

Cilj eksperimenta je bio mjeriti utjecaj strujanja vode na potrošnju energije koje vozilo treba za održavanje postavljene pozicije. S obzirom da su platforme imale drugačiju

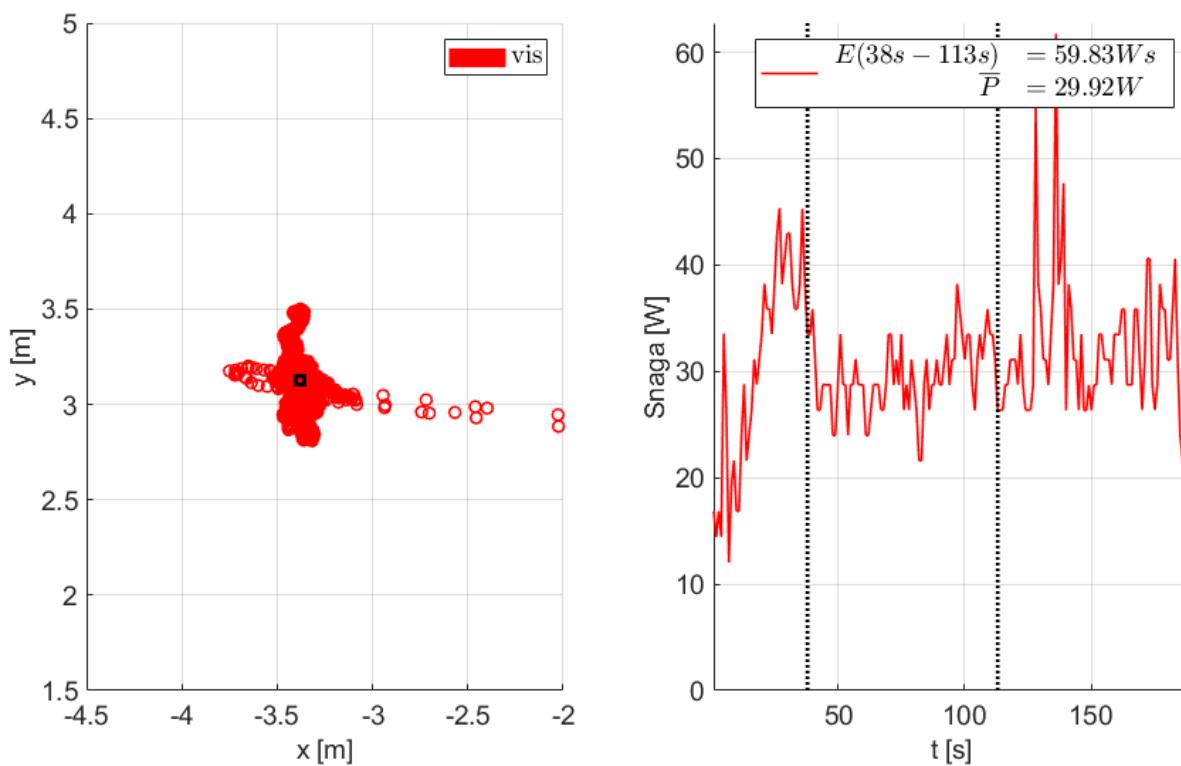
konfiguraciju opreme, za obje je napravljena analiza potrošnje kako bi se uspostavila informacija o tipičnoj potrošnji (engl. *baseline*) plovila bez korištenja propulzije. Eksperiment prikupljanja tipične potrošnje mirovanja prikazan je slikom Slika 4. Slika sadrži 3 grafa, gdje lijevi prikazuje pozicije vozila tijekom eksperimenta  $\hat{\eta}_i$ , desni gornji vremenski odziv udaljenosti među vozilima  $|p_1 - p_2|$ , vremenski odziv potrošnje svakog od vozila. Potrošnja je procijenjena iz mjerjenja struje i napona baterije vozila. Za potrebe validacije bilo je potrebno također izmjeriti potrošnju jednog vozila u generiranom strujnom toku kako bi se odredio utjecaj struje na povećanje potrošnje energije što je prikazano slikom Slika 5. Prosječne potrošnje prikazane na grafu izračunate su za period između crnih vertikalnih crta da bi se uklonio utjecaj prijelaznih pojava formiranja „homogenog“ toka.

Nakon određivanja *baseline* parametara potrošnje vozila obavljen je eksperiment s dva vozila koji trebaju održavati poziciju u generiranoj struji vode, dalje u tekstu adaptacijski eksperiment. Kao i za eksperiment prikazan slikom 4, postavili smo vozila da održavaju poziciju na lokacijama  $\eta_1 = (-3.5, 2.8) \text{ m}$  i  $\eta_2 = (-3.5, 3.6) \text{ m}$ . Odzivi posljednjeg eksperimenta prikazani su slikom Slika 6. Na temelju CFD analize smo pretpostavili da će minimalan razmak među platformama ( $0.8\text{m}$ ) biti dobar odabir gdje sila na drugo vozilo ima najmanji iznos.

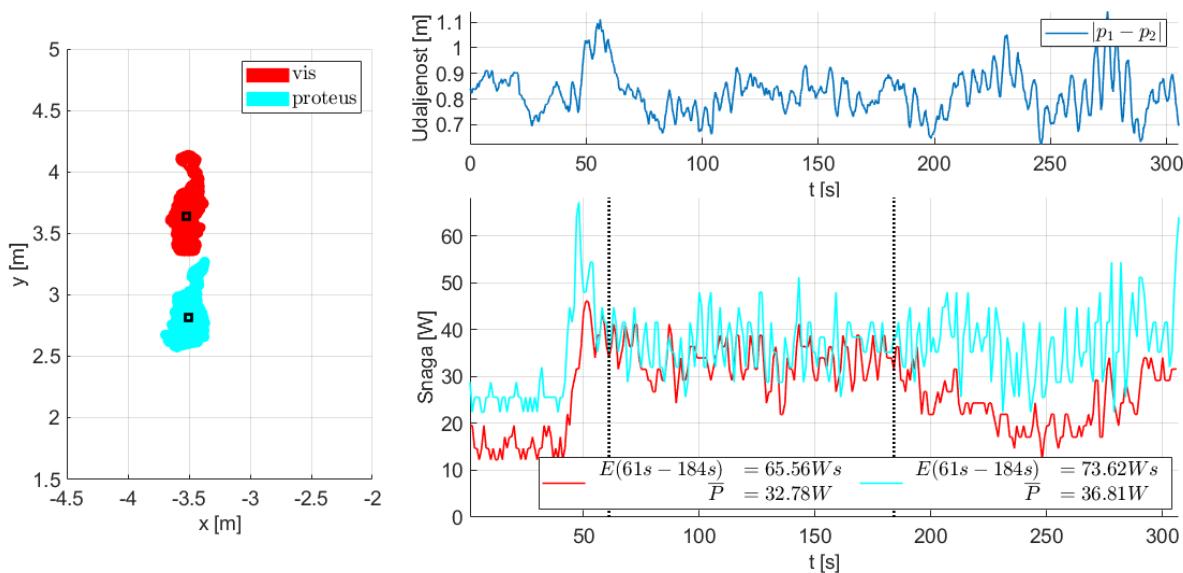
Mjerenja potrošnje energije prikazana su u tablici Tablica 1, gdje  $\bar{P}_{base}$  predstavlja prosječnu snagu vozila u mirovanju (slika 4),  $\bar{P}_{solo}$  predstavlja prosječnu snagu vozila dok se nalazi samo u generiranom strujnom toku (slika 5), i  $\bar{P}_{dual}$  predstavlja prosječnu snagu vozila dok se nalaze zajedno u generiranom strujnom toku (slika Slika 6). Pokazuje se da vozila imaju znatno različite potrošnje u mirovanju uslijed različite konfiguracije vozila. U eksperimentu gdje vozilo Vis održava poziciju u strujnom toku ima povećanu snagu u odnosu na *baseline* gdje propulzori za održavanje pozicije koriste  $15.21\text{W}$  snage. Nakon dodavanja vozila Proteus razlika u odnosu na *baseline* se povećala na  $18.07\text{W}$  što nije u skladu s očekivanjima. Potrošnja vozila Proteus tijekom adaptacijskog eksperimenta je porasla za  $12.80\text{W}$ , što je manje od porasta za vozilo Vis u bilo kojem eksperimentu. Ovakve nekonistentnosti u potrošnji ne predstavljaju vjernu sliku analize jer ne potvrđuju niti pobijaju postavljenu hipotezu. Tijekom zadnjeg eksperimenta je vanbrodski motor prestao raditi, te sva potrebna testiranja nisu mogla biti obavljena. Uzrok nekonistentnosti u prikupljenim podacima može biti uslijed više čimbenika neki od kojih su: razlike u konfiguracijama; razlika u efikasnosti propulzora na drugačijem naponu baterije; nedovoljna homogenost strujnog toka generirana vanbrodskim motorom.



*Slika 4. Eksperiment uspostavljanja tipične potrošnje u mirovanju*



*Slika 5. Eksperiment uspostavljanja tipične potrošnje jednog plovila unutar strujnog toka*



*Slika 6. Eksperiment održavanja pozicije formacije vozila u generiranom strujanju vode u bazenu*

*Tablica 1. Prosječna snaga vozila tijekom eksperimenata*

	$\bar{P}_{base}$	$\bar{P}_{solo}$	$\bar{P}_{solo} - \bar{P}_{base}$	$\bar{P}_{line}$	$\bar{P}_{line} - \bar{P}_{base}$
Vis	14.71	29.92	15.21	32.78	18.07
Proteus	24.01	-		36.81	12.80

## Zaključak

Cilj ovog dokumenta je bio validirati T6.5. „Scenarij 3: Upravljanje formacijom USV-ova s adaptacijom u odnosu na okoliš.“ Kroz eksperimente definirane u scenariju 2. Kroz eksperimentalne rezultate dobivene iz simulacije potvrđena je funkcionalnost algoritma adaptacije orijentacije linijske formacije površinskih platformi u smjeru strujnog toga morske vode. Alterniranje vodećeg plovila za balansiranje uštede energije nije direktno testirano ali je validirano kroz eksperimente prikazane u D6.2 kroz promjenu izgleda formacije plovila bez sudaranja. Kao važna metrika za potvrđivanje hipoteze uštede energije postavljene u D3.1 i razrađene u D3.4 definirana je ušteda energije za sustav u cijelosti, odnosno za plovila na stražnjim pozicijama u formaciji. Unatoč zaključcima donesenim iz CFD analize strujanja vode iza vozila, provedeni eksperimenti ne potvrđuju hipotezu uštede energije postavljanjem PlaDyPos vozila u linijsku formaciju. Ovakav rezultat je konzistentan s potencijalnim problemima koji su bili identificirani u D3.4.