

Izrada metodologije praćenja onečišćenja morskog okoliša analizom satelitskih snimaka u sklopu provedbe projekta WASTEREDUCE - INTERREG VI-A ITALIJA - HRVATSKA 2021.-2027.



Interreg



Co-funded by
the European Union

Italy – Croatia

 **WASTEREDUCE**

NATURA
HISTORICA



Usluga: *Izrada metodologije praćenja onečišćenja morskog okoliša analizom satelitskih snimaka za potrebe JU Natura Histrica, u sklopu provedbe projekta WASTEREDUCE - INTERREG VI-A ITALIJA - HRVATSKA 2021.-2027.*

Klasa ugovora: 406-01/25-01/1

URBROJ ugovora: 09/2025

WASTEREDUCE - INTERREG IT-CRO

EBN: 15/2025/JN

Naručitelj: Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode istarske županije
"Natura Histrica"

Riva 8,
52100 Pula, Croatia
OIB: 45370781471



Izvršitelj: SEA CRAS d.o.o. Avenija Dubrovnik 15, Zagreb,
OIB: 70844303390



SEA CRAS d.o.o.

Direktor:

dr. sc. Mario Špadina



Voditelj izrade

dr. sc. Mario Špadina



Stručni suradnici

Robert Šulc, mag. geogr.



Josip Karadža, mag. geogr.



PREPORUČENI NAČIN CITIRANJA:

Špadina M., Šulc R., Karadža J., (2025): *Metodologija praćenja onečišćenja morskog okoliša analizom satelitskih snimaka za potrebe JU Natura Histrica, u sklopu provedbe projekta WASTEREDUCE - INTERREG VI-A ITALIJA - HRVATSKA 2021.-2027.*

Naručitelj: Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode istarske županije "Natura Histrica"

Izrada metodologije praćenja onečišćenja morskog okoliša analizom satelitskih snimaka u sklopu provedbe projekta WASTEREDUCE - INTERREG VI-A ITALIJA - HRVATSKA 2021.-2027.

Sadržaj

Sadržaj.....	3
Uvod.....	4
Opis tehnologije.....	7
Opis obrade podataka.....	7
Metodologija obrade satelitskih podataka vrlo visoke prostorne rezolucije (VHR) za praćenje mora.....	7
Sažetak ključnih razlika: VHR u odnosu na srednju rezoluciju.....	15
Tip vodnog okoliša iz aspekta spektralne analize.....	16
Vode tipa 1.....	16
Vode tipa 2.....	17
Utjecaj batimetrije na obradu optičkih satelitskih podataka za derivaciju parametara kvalitete vode.....	19
Pouzdanost i točnost tehnologije u kontekstu određivanja deskriptora stanja mora.....	23
Pregled najčešćih parametara kvalitete vode dobivenih iz satelitskih podataka (kalibracija s referentnim (in situ) podacima).....	23
Uloga referentnih (in situ) podataka u kalibraciji.....	27
Procjena resursa implementacije tehnologije.....	30
Opći protokol za procjenu resursa u oblaku (obrada optičkih satelitskih podataka).....	30
Održavanje tehnologije.....	39
Održavanje sustava za obradu satelitskih podataka u oblaku.....	39
Praćenje sustava i upozoravanje (System Monitoring & Alerting).....	40
Provjere ispravnosti podatkovnog toka (Data Pipeline Health Checks).....	40
Praćenje i ponovno obučavanje ML modela (ML Model Monitoring & Retraining).....	40
Upravljanje softverom i ovisnostima (Software & Dependency Management).....	40
Upravljanje životnim ciklusom podataka i optimizacija pohrane (Data Lifecycle Management & Storage Optimization).....	41
Sigurnosna ažuriranja i usklađenost (Security Updates & Compliance).....	41
Optimizacija troškova i pravilno dimenzioniranje resursa (Cost Optimization & Resource Right-Sizing).....	41
Dokumentacija i prijenos znanja (Documentation & Knowledge Transfer).....	41
Detaljni opis korištene tehnologije.....	42
Područje monitoringa.....	44

Razdoblje i vrijeme monitoringa.....	46
Meteorološki i oceanografski podaci.....	46
Demonstracija tehnologije na pilot lokaciji Naručitelja.....	51
Praćenje koncentracije klorofila-a (deskriptor D5).....	51
Detaljna analiza koncentracije klorofila-a po virtualnim postajama.....	55
Vizualizacija prostorne raspodjele klorofila-a za odabrane datume.....	58
Praćenje koncentracije ukupne suspendirane tvari (deskriptor D7).....	72
Detaljna analiza koncentracije ukupne suspendirane tvari po postajama.....	75
Vizualizacija prostorne raspodjele ukupne suspendirane tvari za odabrane datume.....	77
Detekcija pojave morske sluzi (mucilage).....	89
Detekcija otpada plastike - deskriptor D10.....	97
False-positive signali objekata plastične prirode statičnog i dinamičkog karaktera.....	98
Procjena rizika i prostorna raspodjela plastičnog onečišćenja u morskom ekosustavu Limskog zaljeva.....	101
Ograničenja podataka Sentinel-2 i Landsat-8 za primjene u detekciji plastike u odnosu na podatke korištene u ovoj studiji.....	106
Zaključak.....	107
Literatura.....	110
Napomena o pohrani podataka:.....	111

Uvod

Projekt WASTEREDUCE - Integrirane strategije i rješenja za smanjenje otpada u zaštićenim i Natura 2000 područjima, Program prekogranične suradnje u okviru Europske teritorijalne suradnje INTERREG VI-A Italija – Hrvatska 2021.-2027.

Specifični cilj 2.2. Jačanje zaštite i očuvanja prirode, bioraznolikosti i zelene infrastrukture, među ostalim i u urbanim područjima, te smanjenje svih oblika onečišćenja:

- Naziv projekta: WASTEREDUCE - Integrirane strategije i rješenja za smanjenje otpada u zaštićenim i Natura 2000 područjima
- Akronim projekta: WASTEREDUCE
- Trajanje: 30 mjeseci (01. veljače 2024. – 31.srpnja 2026.g.)
- Glavni cilj: Projekt ima za cilj poboljšati gospodarenje otpadom u zaštićenim područjima i Natura 2000 područjima, provedbom konkretnih i zajedničkih akcija za rješavanje fenomena otpada različitim pristupima i različitim metodama intervencije.
- Naglasak je na poboljšanju strategija za upravljanje otpadom i inovativnim digitalnim rješenjima.

Prekogраниčni izazov je smanjenje utjecaja otpada na zelene i plave površine i poboljšanje gospodarenja otpadom u zaštićenim i Natura 2000 područjima. Naglasak je na vodenim i obalnim područjima, posebno ranjivim područjima zahvaćenim antropogenim otpadom. WASTEREDUCE okuplja osam ključnih javnih i privatnih partnera iz Italije i Hrvatske. Svojim znanjem, iskustvom i prijenosom znanja o ovoj temi partnerstvo će sinergijski djelovati u borbi protiv onečišćenja, odnosno smanjenju utjecaja otpada na okoliš zaštićenih i Natura 2000 područja te, posredno, očuvanju njihovih ekosustava.

Partnerska struktura:

- Vodeći partner projekta je Institut za poljoprivredu i turizam Poreč, a hrvatski partneri
- su Istarska županija, Javna ustanova Natura Histrica i Udruga za prirodu, okoliš i održivi
- razvoj Sunce iz Splita.

- Partneri iz Italije su Sveučilište u Trstu, višekomunalno poduzeće ETRA, Regionalna
- agencija za prevenciju i zaštitu okoliša Veneto, ETIFOR - konzultantska tvrtka
- Sveučilišta u Padovi na području usluga ekosustava
- Pridruženi partner - Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode
- Zadarske županije – Natura Jadera.

Opis tehnologije

Cilj: Transformirati sirove ili predobrađene optičke satelitske snimke vrlo visoke prostorne rezolucije (VHR) u podatke spremne za analizu (ARD – Analysis-Ready Data) ili specifične krajnje proizvode, prikladne za detaljnu analizu i precizno strojno učenje (ML) na razini objekata.

Cilj: Transformirati sirove ili predobrađene optičke satelitske snimke vrlo visoke prostorne rezolucije (VHR) u podatke spremne za analizu (ARD – *Analysis-Ready Data*) ili specifične krajnje proizvode, prikladne za detaljnu analizu i precizno strojno učenje (ML) na razini objekata.

Relevantni VHR senzori (Primjeri):

- Maxar: WorldView-1/2/3/4, GeoEye-1, Legion (sljedeća generacija)
- Airbus: Pleiades, Pleiades Neo, SPOT (visokorezolucijski kraj)
- Planet: SkySat (i sve više poboljšani PlanetScope)
- BlackSky: Global (česta ponovna posjeta)
- Ostali komercijalni: SuperView, Gaofen, Kompsat (razne nacije)

Opis obrade podataka

Metodologija obrade satelitskih podataka vrlo visoke prostorne rezolucije (VHR) za praćenje mora

Faze radnog tijeka:

- Akvizicija i dohvat podataka (s planerom zadataka)

- Predobrada (korekcija senzora i scene)
- Temeljna obrada (prepoznavanje i podudaranje slika ML-om)
- Naknadna obrada i kontrola kvalitete
- Pohrana i izvoz

Faza 1: Akvizicija i dohvat podataka (s planerom zadataka)

Cilj: Sigurno i učinkovito prikupiti potrebne VHR satelitske snimke, često putem *taskinga* (zadavanja zadataka) ili pristupa arhivama.

Koraci:

1. **Precizno definiranje Područja interesa (AOI – *Area of Interest*) i Vremena interesa (TOI – *Time of Interest*):**
 - **Povećana granularnost:** Za VHR, AOI-ji su često manji (npr. pojedine zgrade, specifična gradilišta, mali urbani blokovi). TOI se može odnositi na vrlo specifične datume ili čak ponovljene posjete unutar istog dana.
 - **Tasking:** VHR često zahtijeva "tasking" satelita (zahtijevanje nove akvizicije iznad vašeg AOI-ja u određeno vrijeme), a ne samo pretraživanje arhive. To je uobičajeno za Maxar, Pleiades, SkySat.
2. **Odabir i prioritizacija senzora (fokus na VHR):**
 - Prioritizacija se temelji na **Udaljenosti uzorkovanja na tlu (GSD – *Ground Sample Distance*)** (npr. < 0,5 m), mogućnostima ponovne posjete (unutar dana za SkySat) i specifičnim spektralnim pojasima.
 - **Komercijalni API-ji:** Pristup je gotovo isključivo putem vlasničkih API-ja (npr. Maxar GBDX/Platform API-ji, Planet Tasking API, SkySat API).
 - **Planer zadataka (*Scheduler*):** Kao i prije, *cloud scheduleri* ili okidači vođeni događajima koriste se za automatizirani unos podataka (*ingestion*).
3. **Filtriranje podataka (poboljšana preciznost):**

- **Pokrivenost oblacima (*Cloud Cover*):** Još kritičnije. Mali oblak može zakloniti ključne objekte. Često zahtijeva maske oblaka po pikselu (*per-pixel cloud masks*) ili vrlo niske ukupne pragove pokrivenosti oblacima.
- **Kut izvan nadira (*Off-Nadir Angle*):** Izuzetno važno za VHR. Veći kutovi izvan nadira uvode značajne geometrijske distorzije (npr. nagib zgrade) i veće sjene, što može ozbiljno utjecati na prepoznavanje objekata. Filtrirati se trebaju kutovi tipično < 20-30 stupnjeva.
- **Kut elevacije Sunca (*Sun Elevation Angle*):** Za konzistentno osvjetljenje objekata i analizu sjena, filtrirati se trebaju specifični rasponi elevacije Sunca, posebno za 3D rekonstrukciju.
- **Oznake kvalitete (*Quality Flags*):** Detaljne oznake kvalitete koje pruža dobavljač su ključne.

4. Preuzimanje i razina podataka (*Data Level*):

- VHR dobavljači tipično nude visoko obrađene razine podataka:
 - **Pansharpened:** Kombiniranje pankromatskog pojasa visoke rezolucije s multispektralnim pojasima niže rezolucije za stvaranje slike u boji visoke rezolucije.
 - **Ortorektificirano (*Orthorectified*):** Geometrijski korigirano i poravnato s preciznom kartografskom projekcijom, često koristeći precizne Digitalne elevacijske modele (DEM).
 - **Analitička/površinska reflektancija (*Analytic/Surface Reflectance*):** Radiometrijski i atmosferski korigirano.
- Tipični VHR podaci su već razine 2 ili više.

Faza 2: Predobrada (korekcija senzora i scene)

Cilj: Dodatno doraditi VHR podatke za optimalan unos u ML modele, rješavajući suptilne distorzije i osiguravajući ekstremnu preciznost.

Opći koraci (primjenjuju se prema potrebi, ovisno o razini podataka dobavljača):

1. Radiometrijska korekcija:

- Tipično ju obavljaju VHR dobavljači. Potrebno je provjeriti razinu podataka (TOA ili BOA) i radiometrijsku dubinu bita (npr. 11-bitna, 16-bitna), koja je obično viša i pruža bogatiju dubinu boje.

2. Atmosferska korekcija:

- **BOA reflektancija je ključna:** Za kvantitativnu analizu, posebno vremenske serije ili spektralno indeksiranje (npr. NDVI za specifične objekte), osigurati BOA površinsku reflektanciju. Mnogi VHR dobavljači to nude izravno.

3. Geometrijska korekcija i ortorektifikacija:

- **Točnost ispod piksela (*Sub-pixel Accuracy*):** Za VHR, točnost koregistracije ispod piksela često je potrebna za ML zadatke poput detekcije promjena ili preciznog izdvajanja značajki. Ortorektifikacija dobavljača obično je izvrsna, ali za multitemporalnu analizu mogu biti potrebni dodatni alati za koregistraciju.
- **Nagib zgrade/perspektivna distorzija (*Building Lean/Perspective Distortion*):** Čak i uz ortorektifikaciju, visoki objekti mogu i dalje pokazivati značajan "nagib" (*relief displacement*) na slikama snimljenim izvan nadira. Ako je cilj 3D rekonstrukcija objekta ili precizno mapiranje otisaka, potrebna je specijalizirana obrada (npr. 3D restitucija iz stereo parova, modeli visine zgrada), ili se te distorzije moraju uzeti u obzir u ML modelu.

4. Koregistracija slika (kritično za VHR):

- **Automatizirano i robusno:** Ključno za točnu ML analizu vremenskih serija. Alati moraju moći rukovati malim pomacima i rotacijama između VHR scena.

5. Maskiranje oblaka, sjena oblaka i snijega (poboljšana detaljnost):

- **Precizno maskiranje:** Maske moraju biti vrlo točne na razini piksela kako bi se izbjegli sitni artefakti oblaka/sjena koji utječu na male objekte. Automatizirane metode (često temeljene na ML-u) su kritične.
- **Izmaglica/tanki oblaci (*Haze/Thin Cloud*):** VHR podaci su i dalje pod utjecajem izmaglice. Korisni mogu biti namjenski algoritmi za kompenzaciju atmosfere ili uklanjanje izmaglice.

6. Pansharpening (ako nije dostavljeno):

- Ako primate odvojene pankromatske i multispektralne pojaseve, ovaj je korak ključan za njihovo kombiniranje u jedinstven proizvod u boji visoke rezolucije. Mogu se koristiti tehnike poput Gram-Schmidtove transformacije, PCA ili naprednije metode pansharpeninga temeljene na ML-u.

7. Sjeckanje/zakrpe podataka (*Data Tiling/Patching*) (još kritičnije):

- **Manje zakrpe:** Zbog veće rezolucije i većih ukupnih dimenzija slike (u pikselima), često ćete morati rezati slike na manje, preklapajuće zakrpe prikladne za unos u ML modele kako bi stale u memoriju grafičke procesorske jedinice (GPU). Preklapajuće zakrpe su ključne za sprječavanje rubnih efekata.

Cilj: Primijeniti najsuvremenije modele strojnog učenja za izdvajanje detaljnih informacija i precizno prepoznavanje objekata.

Koraci:

1. Priprema podataka za ML (specifično za VHR):

- **Mikro-razinska anotacija:** Obuka ML modela za VHR često zahtijeva nevjerojatno detaljne i precizne anotacije sitnih objekata (npr. pojedinih automobila, prozora, male infrastrukture). To je **veliki napor**.
- **Kompleksne klasne hijerarhije:** VHR omogućuje detaljniju klasifikaciju (npr. ne samo "zgrada", već "obiteljska kuća", "stambena zgrada", "skladište").

2. Odabir i prilagodba ML modela:

- **Odabir arhitekture:** Dublje i složenije konvolucijske neuronske mreže (CNN) (npr. U-Net, Mask R-CNN, YOLO, Vision Transformers) često su potrebne za hvatanje zamršenih detalja na VHR snimkama.
- **Prijenosno učenje (*Transfer Learning*):** Fino podešavanje predobučanih modela na VHR-specifičnim skupovima podataka uobičajeno je zbog visoke cijene VHR podataka i anotacije.
- **Nepromjenjivost mjerila (*Scale Invariance*):** Modeli moraju biti robusni na objekte koji se pojavljuju u različitim mjerilima zbog perspektive ili stvarne varijacije veličine.
- **Kontekstualne informacije:** VHR omogućuje bolju upotrebu kontekstualnih informacija (npr. "automobili su na cestama ili parkiralištima").

3. Korištenje GPU-a (maksimalan utjecaj):

- **Više GPU snage:** Obrada VHR podataka, posebno za obuku ili inferenciju složenih modela, zahtijevat će znatno snažnije GPU-e (npr. A100, H100) ili

više GPU-a paralelno, zbog većeg broja piksela po području i složenosti modela.

- **Distribuirana obrada:** Za velika AOI-ja, distribuirani računalni okviri (npr. Dask, Spark, Ray) koji koriste više GPU-a/CPU-a su ključni.

4. Generiranje rezultata (poboljšana detaljnost):

- Izlazi su tipično vrlo precizne vektorske značajke (poligoni za zgrade, linije za ceste, točke za drveće) s pridruženim atributima i ocjenama pouzdanosti.

Faza 4: Naknadna obrada i kontrola kvalitete

Cilj: Doraditi VHR ML izlaze kako bi se zadovoljili visoki zahtjevi točnosti, često uz provjeru "čovjekom u petlji" (*human-in-the-loop validation*).

Koraci:

1. Topološka dorada:

- Automatizirano i ručno čišćenje vektorskih izlaza (npr. spajanje linija, uklanjanje samopresijecanja, osiguravanje zatvorenosti poligona za sitne značajke).

2. Procjena točnosti i validacija (viši standard):

- **Referentni podaci (*Ground Truth*):** Zahtijeva izuzetno precizne referentne podatke (npr. terenska mjerenja, visoko precizni podaci dronova, ručna stručna anotacija VHR slika).
- **Metrike:** Fokusirati se na detaljne metrike poput udaljenosti centroida za točke, IoU (*Intersection over Union*) za poligone i točnost piksela za segmentaciju.

- **Čovjek u petlji (*Human-in-the-Loop*):** Ručni pregled i korekcija od strane GIS stručnjaka često su integrirani u radni tijek kako bi se postigla potrebna točnost za komercijalne VHR proizvode.

3. Generiranje/ažuriranje metapodataka:

- Detaljni metapodaci uključujući precizne parametre akvizicije (kut izvan nadira, kut Sunca), povijest obrade i specifične metrike točnosti.

Faza 5: Pohrana i izvoz

Cilj: Učinkovito pohraniti ogromne količine VHR podataka i njihovih derivata, čineći ih dostupnima za aplikacije visokih performansi.

Koraci:

1. Pohrana u *Bucket* (volumen i organizacija):

- **Masivni volumeni podataka:** Čak i mala AOI-ja mogu generirati velike VHR skupove podataka zbog visoke rezolucije. Ključne su učinkovite strategije pohrane (npr. COG – *Cloud-Optimized GeoTIFF*, Zarr za polja podataka).
- **Particioniranje:** Organizirati podatke prema shemi geografskog *tilinga* (npr. MGRS mreža, prilagođena mreža) za učinkovit pristup.
- **Politika zadržavanja podataka (*Data Retention*):** Ista dvogodišnja politika, ali sam volumen sirovih VHR podataka mogao bi agresivnije gurati prema hladnijim razinama pohrane ili zahtijevati pažljiv odabir sirovih podataka koje treba zadržati.

2. Izvoz/dostava podataka (optimizirano za VHR):

- **Usluge *streaminga*:** Za interaktivne aplikacije, podaci moraju biti *streamabilni* (npr. putem WMS/WMTS za *tileove*, vektorski *tileovi* za značajke).

- **API-ji:** Geospatialni API-ji (STAC, OGC API Features/Coverages) ključni su za pristup specifičnim VHR proizvodima.
- **Kondenzirani izlaz (100 MB):** Vaš dnevni izlaz od 100 MB vjerojatno će biti u vektorskom formatu (npr. GeoJSON, Shapefile) koji predstavlja detektirane objekte, ili vrlo komprimiranu rastersku kartu.

Sažetak ključnih razlika: VHR u odnosu na srednju rezoluciju

Značajka	Srednja rezolucija (npr. Sentinel-2, Landsat)	Vrlo visoka rezolucija (VHR) (npr. Maxar, Pleiades, SkySat)
Prostorna rezolucija	10m - 30m (piksel predstavlja veće područje)	0,3m - 5m (piksel predstavlja fine detalje, pojedine objekte)
Volumen podataka	Umjeren (npr. 500 MB - 1 GB po sceni)	Značajno veći (npr. nekoliko GB po sceni za slično područje), mnogo više piksela.
Akvizicija podataka	Primarno arhivsko pretraživanje (besplatan/otvoren pristup) ili pretplate na široka područja.	Često zahtijeva tasking (novu akviziciju), komercijalne pretplate.
Trošak	Općenito besplatno/niska cijena.	Značajno viši trošak po jedinici površine.
Vrijeme ponovne posjete	Varira (npr. 5 dana za Sentinel-2 na ekvatoru, uobičajena globalna pokrivenost).	Češća frekvencija često dostupna (npr. unutar dana za SkySat), ali obično za specifična AOI-ja.
Geometrijska točnost	Dobra, ali VHR zahtijeva dodatno fino podešavanje.	Iznimna ortorektifikacija koju pruža dobavljač, ali i dalje zahtijeva koregistraciju za vremenske serije.
Atmosferska korekcija	Često nužan korak za korisnika (L1C do L2A).	Često se isporučuje kao već korigirani proizvod (Analitička/površinska refleksivnost).
Sjene/Perspektiva	Manje izražen utjecaj.	Značajan utjecaj na prepoznavanje objekata zbog nagiba zgrade i velikih sjena.
Maskiranje oblaka	Važno za opću analizu.	Kritično i zahtijeva piksel-savršenu točnost za vidljivost malih objekata.
ML obrada	Može koristiti lakše modele, manje GPU memorije. Fokus na pokrov zemljišta, široke promjene.	Zahtijeva dublje, složenije ML modele (CNN, Transformeri) za fine značajke.

Zahtjevi za GPU	Umjereni, često mogu raditi na GPU-ovima srednje klase.	Zahtijeva vrhunske GPU-e (A100, H100) i/ili distribuiranu obradu.
Priprema podataka za ML	Veće zacrpe, grublje anotacije.	Manje, preklapajuće zacrpe; nevjerojatno precizne, detaljne anotacije.
Procjena točnosti	Šire metrike točnosti.	Zahtijeva vrlo visoko precizne referentne podatke (ground truth); uobičajena je ručna provjera QA.
Pohrana i I/O	Podnošljivo za pojedinačne scene.	Izazovi u I/O zbog masivnih veličina datoteka u pikselima, što zahtijeva učinkovite formate (COG, Zarr).

Tip vodnog okoliša iz aspekta spektralne analize

U oceanografiji i daljinskim istraživanjima vodenih okoliša, "Vode tipa 1" i "Vode tipa 2" su klasifikacijska shema temeljena na optičkim svojstvima vode i relativnim doprinosima različitih tvari koje interagiraju sa svjetlom. Ova je klasifikacija ključna jer određuje koji su algoritmi i modeli prikladni za dohvat informacija (poput koncentracije klorofila) iz satelitskih podataka o boji oceana.

Izvorni koncept predložili su Morel i Prieur 1977. godine, a definicije su se razvijale, no temeljna razlika ostaje.

Vode tipa 1

Kratak opis: Vode tipa 1 su one čija su optička svojstva (kako se svjetlost apsorbira i raspršuje) **prvenstveno određena fitoplanktonom (i s njim povezanom organskom tvari koja kovarira).**

Ključne značajke:

- **Dominantna optički aktivna komponenta:** Fitoplankton i njegovi razgradni produkti (npr. klorofil-a, detritus i obojena otopljeni organska tvar – CDOM – koja **kovarira** izravno s fitoplanktonom).
- **Lokacija:** Tipično se nalaze u **otvorenom oceanu, oligotrofnim (siromašnim hranjivim tvarima) vodama**, daleko od kopnenog utjecaja. Ove se vode često karakteriziraju tamnoplavom do plavo-zelenom bojom.
- **Odnos između komponenti:** U vodama tipa 1, pretpostavlja se da se koncentracije drugih optički aktivnih tvari (poput CDOM-a i nealgalnih čestica) **kovariraju izravno i predvidljivo** s koncentracijom klorofila-a (pokazatelja biomase fitoplanktona). To znači da ako znate koncentraciju klorofila, možete razumno procijeniti doprinos drugih komponenti optičkom signalu vode.
- **Pojednostavljenje modeliranja:** Ovaj predvidljivi odnos omogućuje korištenje jednostavnijih bio-optičkih modela za dohvat koncentracija klorofila-a iz satelitskih podataka o boji oceana. Ovi se modeli često oslanjaju na omjere spektralne reflektancije u različitim plavo-zelenim valnim duljinama.
- **Primjer:** Ogromna prostranstva središnjih vrtloga u Atlantskom ili Tihom oceanu klasični su primjeri voda tipa 1.

Vode tipa 2

Kratak opis: Vode tipa 2 su one čija su optička svojstva **pod utjecajem ne samo fitoplanktona, već i drugih tvari koje ne moraju nužno kovarirati s fitoplanktonom**. Ove su vode optički mnogo složenije.

Ključne značajke:

- **Dominantne optički aktivne komponente:** Osim fitoplanktona, vode tipa 2 imaju značajne i **neovisne koncentracije** drugih optički aktivnih komponenti. To uključuje:

- **Obojena otopljena organska tvar (CDOM):** Često se naziva "žuta tvar", potječe od kopnenog otjecanja (npr. iz rijeka, močvara), kanalizacije ili resuspenzije sedimenata. Njezina koncentracija nije izravno povezana s fitoplanktonom.
- **Nealgalne čestice (NAP) / Ukupne suspendirane tvari (TSS):** Anorganske mineralne čestice (npr. glina, mulj, pijesak) iz riječnog dotoka, obalne erozije, resuspenzije sedimenata s dna (npr. strujama ili jaružanjem) ili eolskog (vjetrom nošenog) praha.
- **Reflektancija dna (*Bottom Reflectance*):** U plitkim vodama tipa 2, svjetlost odbijena od morskog dna također može značajno utjecati na optički signal koji dopire do površine.
- **Lokacija:** Tipično se nalaze u **obalnim vodama, estuarijima, uvalama, unutrašnjim jezerima, a ponekad i u mutnim regijama otvorenog oceana** pod utjecajem riječnih plutača ili podizanja sedimenata. Ove vode često imaju zelenu, žutu, smeđu ili čak crvenkastu boju zbog raznolikosti konstituenata.
- **Odnos između komponenti:** Koncentracije CDOM-a, NAP-a i fitoplanktona mogu varirati neovisno jedna o drugoj. To znači da samo poznavanje koncentracije klorofila nije dovoljno za točno modeliranje optičkih svojstava vode.
- **Složenost modeliranja:** Dohvat koncentracija vodenih komponenti iz voda tipa 2 mnogo je izazovniji. Zahtijeva sofisticiranije i često specifične bio-optičke modele koji mogu dekuplirati neovisne doprinose više optički aktivnih komponenti. Algoritmi često moraju koristiti više spektralnih pojasa, ponekad se protežući u crveno i blisko infracrveno područje, te se mogu oslanjati na iterativne ili inverzne metode modeliranja.
- **Primjer:** Baltičko more, ušće rijeke Amazon, vrlo mutni estuariji ili mnoga slatkovodna jezera tipični su primjeri voda tipa 2.

Značajka	Vode tipa 1	Vode tipa 2
----------	-------------	-------------

Primarni utjecaj	Fitoplankton i kovarirajuća organska tvar	Fitoplankton + neovisni doprinosi od CDOM-a, nealgalnih čestica i potencijalno reflektancije dna
Odnos komponenti	Predvidljivo kovariraju s klorofilom-a	Vode neovisno o klorofilu-a
Tipična lokacija	Otvoreni ocean, oligotrofne vode	Obalne vode, estuariji, jezera, mutne zone
Tipična boja	Tamnoplava do plavo-zelena	Zelena, žuta, smeđa, crvena (mutnije/obojenje)
Modeli daljinskog istraživanja	Jednostavniji, često empirijski, algoritmi usmjereni na klorofil	Složeniji, često polu-analički ili specifični algoritmi potrebni za razdvajanje više komponenti

Utjecaj batimetrije na obradu optičkih satelitskih podataka za derivaciju parametara kvalitete vode

Ova matrica detaljno prikazuje kako dubina vode (posebno u odnosu na prag od 25 m) i optički tip vode (vode tipa 1 u odnosu na vode tipa 2) temeljno utječu na derivaciju parametara kvalitete vode iz optičkih satelitskih podataka.

Ključni pojmovi:

- Parametri kvalitete vode (PKV): Parametri kvalitete vode (npr. Koncentracija klorofila-a (Chl-a), Ukupne suspendirane tvari (TSS), Obojena otopljenja organska tvar (CDOM), Dubina Secchijevog diska, Mutnoća, Dubina eufotičke zone).
- Utjecaj dna: Kako svjetlost odbijena od morskog dna utječe na optički signal koji mjeri satelit.
- Algoritmi: Vrste bio-optičkih modela/algoritama prikladnih za dohvat parametara kvalitete vode.
- Složenost: Ukupna poteškoća i neizvjesnost dohвата.

Matrica: Dubina, tip vode i derivacija parametara kvalitete vode iz optičkih satelitskih podataka

Dubina vode / Tip vode	Vode tipa 1 (Otvoreni ocean, oligotrofne)	Vode tipa 2 (Obalne, estuarijske, mutne, kopnene)
I. Dubina vode > 25 m	1. Duboke vode tipa 1	2. Duboke vode tipa 2
Utjecaj dna	Nema. Svjetlost ne dopire do dna/ne vraća se s dna.	Nema (ili zanemariv). Svjetlost dna je atenuirana prije dolaska na površinu.
Penetracija svjetlosti	Visoka (čista voda). Svjetlost prodire duboko.	Umjerena do niska (mutna/obojena voda). Penetracija svjetlosti ograničena je konstituentima.
Derivabilni PKV	Primarno: Chl-a, CDOM (neki tipovi), K _d (atenuacija svjetlosti). Primarno za inherentna optička svojstva (IOP) same vode.	Primarno: Chl-a, TSS/Mutnoća, CDOM. Ključni izazov: Dekupliranje neovisnih doprinosa više optički aktivnih konstituenata.
Tipovi algoritama	Standardni algoritmi za boju oceana: Empirijski ili polu-analitički algoritmi koji se oslanjaju na omjere plavih i zelenih pojasa (npr. OC4, OC3). Jednostavni, robusni.	Napredni algoritmi za vode tipa 2: - Polu-analitički/Analitički: Temeljeni na modelu, pokušavaju inverzijom reflektancije dobiti koncentracije konstituenata (npr. GSM, Carder, QAA). - Neuronske mreže/Strojno učenje: Obučeni na raznolikim skupovima podataka za vode tipa 2. -

		Inverzni modeli: Često iterativni. Zahtijevaju više spektralnih pojasa (crveni, NIR).
Složenost i nesigurnost	Relativno niska složenost. Visoka pouzdanost u dohvat Chl-a.	Visoka složenost. Značajni izazovi u točnom dohvat u zbog više neovisnih varijabli. Algoritmi moraju razdvojiti signale. Veća neizvjesnost.
Primjene	Veliki procvati fitoplanktona, oceanska produktivnost, ciklus ugljika, praćenje klime.	Praćenje velikih riječnih plutača, estuarijska dinamika, regionalno onečišćenje, štetni procvati alga, transport sedimenata.
Opći pristup daljinskim istraživanjima	Standardni senzori niže do umjerene prostorne rezolucije (npr. MODIS, VIIRS, Sentinel-3) dobro su prilagođeni.	Zahtijeva senzore s više spektralnih pojasa (uključujući crvene/NIR) i često umjerene do visoke prostorne rezolucije (npr. Sentinel-2, Landsat, neki komercijalni VHR).
II. Dubina vode do 25 m	3. Plitke vode tipa 1	4. Plitke vode tipa 2
Utjecaj dna	Značajan. Svjetlost dopire i odbija se od dna, snažno utječući na radijanciju koja napušta vodu.	Potencijalno značajan. Čak i u mutnoj vodi, ako svjetlost prodire do dna i podloga je visoko reflektirajuća (npr. pijesak), to i dalje može utjecati na signal. Složenije je odvojiti od vodenog stupca.

Penetracija svjetlosti	Vrlo visoka. Čista voda, svjetlost gotovo uvijek dopire do dna.	Umjerena do niska. Utjecaj dna ovisi o bistrini vode i tipu dna. Može biti minimalan u vrlo mutnim vodama.
Derivabilni PKV	Izuzetno izazovno za PKV. Signal s dna često nadjačava ili iskrivljuje signal vodenog stupca. Primarni fokus: Batimetrija, kartiranje dna (koralji, morska trava), a ne kvaliteta vode.	Izuzetno izazovno za PKV. Utjecaj dna, visoka varijabilnost konstituenata PKV-a i prostorna heterogenost dodatno kompliciraju stvari. Primarni fokus: Često batimetrija, kartiranje dna ili kvalitativna procjena mutnoće, a ne precizne vrijednosti PKV-a.
Tipovi algoritama	Rijetko izravni algoritmi za PKV. Često zahtijevaju algoritme koji istovremeno dohvaćaju batimetriju, tip dna i svojstva vodenog stupca. - Analitički inverzni modeli: Pokušavaju dekuplirati signale vodenog stupca i dna. - Hiperspektralni senzori: Nude više spektralnih detalja za pomoć pri razdvajanju.	Vrlo napredni/Eksperimentalni: Zahtijeva vrlo sofisticirane multispektralne/hiperspektralne algoritme sposobne za razdvajanje složenih signala vodenog stupca od potencijalno zbunjujuće reflektancije dna. Često specifično za lokaciju. - Strojno učenje (ML): Može se obučiti na opsežnim referentnim podacima (ground truth).
Složenost i nesigurnost	Vrlo visoka složenost i nesigurnost za PKV. Reflektancija dna je dominantan signal; teško je izolirati i kvantificirati suptilne promjene PKV-a.	Najveća složenost i nesigurnost za PKV. Svi izazovi dubokih voda tipa 2, plus zbunjujući signal dna.

		Često rezultira visokom neizvjesnošću ili nemogućnošću dohvata preciznih PKV-a.
Primjene	Kartiranje batimetrije u bistrim vodama, praćenje/zdravlje koraljnih grebena i livada morske trave.	Kartiranje batimetrije u plitkim mutnim područjima (teže), kvalitativna procjena vrlo mutnih plutača iznad plitkih sprudova, široko kartiranje staništa.
Opći pristup daljinskim istraživanjima	Zahtijeva senzore visoke prostorne rezolucije (npr. WorldView, Pleiades, SkySat, Sentinel-2) za razlučivanje značajki dna. Često koristi specifične valne duljine (npr. plava, zelena) i analitičke modele.	Zahtijeva vrlo visoku prostornu rezoluciju (0,3m-5m) i potencijalno hiperspektralne senzore. Veliko oslanjanje na robusne, često ML-bazirane, inverzne metode i opsežne in situ podatke.

Pouzdanost i točnost tehnologije u kontekstu određivanja deskriptora stanja mora

Pregled najčešćih parametara kvalitete vode dobivenih iz satelitskih podataka (kalibracija s referentnim (in situ) podacima)

Daljinsko istraživanje satelitima je temeljna primjena daljinskih istraživanja boje oceana. Proces se uvelike oslanja na kalibraciju satelitskih izlaznih podataka s referentnim (in situ) podacima. To osigurava točnost i pouzdanost daljinski mjerenih vrijednosti.

Pregled najčešćih parametara kvalitete vode dobivenih iz satelitskih podataka

Satelitsko daljinsko istraživanje prvenstveno mjeri optički aktivne komponente (OAC) u vodenom stupcu, što znači one tvari koje apsorbiraju i raspršuju svjetlost. Drugi optički neaktivni parametri ponekad se mogu posredno inferirati ako imaju snažnu, predvidljivu korelaciju s OAC-om.

I. Optički aktivne komponente (izravno mjerljive satelitom):

1. Koncentracija klorofila-a (Chl-a):

- Opis: Primarni fotosintetski pigment u fitoplanktonu. Ključni je pokazatelj biomase alga, primarne produktivnosti i trofičkog statusa (eutrofikacije).
- Zašto se derivira: Fitoplankton snažno apsorbira plavu i crvenu svjetlost te reflektira zelenu i blisku infracrvenu (NIR) svjetlost. Te spektralne značajke omogućuju njegovo dohvaćanje.
- Uobičajeni algoritmi:
 - Empirijski/Poluempirijski: Često se temelje na omjerima pojasa (npr. omjeri plavo-zeleno poput OCx algoritama: OC3, OC4 za vode tipa 1; ili algoritmi crveno-NIR za mutne vode/vode tipa 2 poput normaliziranog diferencijalnog indeksa klorofila – NDCl, 3-pojasni algoritmi).
 - Polu-analitički/Analitički: Inverzni modeli temeljeni na principima prijenosa zračenja.
 - Strojno učenje (ML): Sve se više koristi za obuku na velikim skupovima podataka radi pronalaženja složenih odnosa.

- Potrebe za kalibracijom: Kritično. Algoritmi se podešavaju korištenjem podudarnih in situ mjerenja Chl-a i satelitski dobivenih vrijednosti reflektancije daljinskog istraživanja (Rrs). To uključuje regresijsku analizu za uspostavljanje odnosa između spektralnih omjera/značajki i stvarnih vrijednosti Chl-a. Različiti tipovi vode ili regije često zahtijevaju regionalno podešavanje algoritma ili rekalkulaciju.
- 2. Ukupne suspendirane tvari (TSS) / Mutnoća / Suspendirana čestična tvar (SPM):
 - Opis: Koncentracija svih čestičnih tvari suspendiranih u vodenom stupcu (i organskih i anorganskih). Mutnoća je optičko svojstvo (raspršivanje svjetlosti), dok je TSS/SPM masena koncentracija. Visoko su korelirani. Pokazatelji erozije, otjecanja, jaružanja i bistrine vode.
 - Zašto se derivira: Suspendirane čestice prvenstveno povećavaju povratno raspršivanje svjetlosti, posebno u crvenim i bliskim infracrvenim (NIR) valnim duljinama, gdje je apsorpcija vode visoka, ali raspršivanje čestica i dalje može biti snažno.
 - Uobičajeni algoritmi:
 - Empirijski: Algoritmi s jednim pojasom ili omjerom pojasa (npr. korištenje crvenih ili NIR pojasa, ili omjera crvenih/NIR prema zelenim).
 - Polu-analitički: Modeli temeljeni na odnosima između koeficijenata povratnog raspršivanja (dobivenih iz satelitskih podataka) i koncentracije TSS-a.
 - Strojno učenje: Sve se više koristi za složene, vrlo promjenjive mutne vode.
 - Potrebe za kalibracijom: Ključno. In situ mjerenja TSS-a (gravimetrijske metode) ili mutnoće (nephelometrijske jedinice mutnoće - NTU) uspoređuju se sa satelitskom reflektancijom radi razvoja ili validacije algoritama.

Regionalna kalibracija vrlo je uobičajena zbog različitih tipova čestica (mineralne, organske) i veličina, koje imaju različita optička svojstva.

3. Obojena otopljenjena organska tvar (CDOM) / Otopljeni organski ugljik (DOC):

- Opis: Otopljena organska tvar koja apsorbira svjetlost, posebno u plavim i ultraljubičastim (UV) regijama. Često se naziva "žuta tvar". Potječe od kopnenog otjecanja (npr. tanini iz močvara), raspadanja alga ili zagađenja. Utječe na penetraciju svjetlosti i UV zaštitu.
- Zašto se derivira: CDOM snažno apsorbira svjetlost u plavo-UV spektralnom rasponu, što dovodi do karakterističnog smanjenja plave reflektancije iz vode.
- Uobičajeni algoritmi:
 - Empirijski: Često koriste značajke apsorpcije u plavom pojasu ili omjere koji uključuju plave i zelene/crvene pojaseve.
 - Polu-analički: Inverzni modeli koji pokušavaju odvojiti apsorpciju CDOM-a od apsorpcije drugih konstituenata.
- Potrebe za kalibracijom: Ključno. In situ koeficijenti apsorpcije CDOM-a (npr. aCDOM na 440 nm) mjere se pomoću spektrofotometrije i koreliraju sa satelitskim podacima. Izazovi nastaju zbog spektralnog preklapanja s apsorpcijom Chl-a u plavom.

4. Temperatura površine mora (SST) / Temperatura površine jezerske vode (LSWT):

- Opis: Temperatura najgornjeg sloja vodene površine. Utječe na biološke procese (rast algi, migracija riba), fizičke procese (miješanje, stratifikacija) i klimu.
- Zašto se derivira: Voda emitira toplinsko zračenje, koje mogu detektirati satelitski termalni infracrveni (TIR) senzori.
- Uobičajeni algoritmi: Modeli prijenosa zračenja koji korigiraju atmosferske efekte (apsorpciju i emisiju vodene pare, CO₂) koristeći više termalnih pojasa (npr. algoritmi s podijeljenim prozorom).

- Potrebe za kalibracijom: Visoka točnost. In situ mjerenja temperature (termometri, CTD-i, bove) koriste se za kalibraciju i validaciju satelitski dobivenih temperaturnih proizvoda. Globalni standardni proizvodi su vrlo precizni (npr. 0,5°C).

II. Optički neaktivni ili posredno derivabilni parametri:

Parametri poput slanosti, otopljenog kisika (DO), pH, ukupnog fosfora (TP) i ukupnog dušika (TN) nisu izravno mjerljivi trenutnim optičkim satelitima jer nemaju jedinstvene spektralne potpise u vidljivom ili infracrvenom rasponu koji se mogu jasno detektirati iz svemira.

- Posredna derivacija: Oni se ponekad mogu inferirati posredno putem:
 - Statističkih korelacija: Ako imaju snažan, konzistentan statistički odnos s optički aktivnim parametrom (npr. visoki TP često korelira s visokim Chl-a u eutrofnim sustavima). Ovi su odnosi vrlo specifični za lokaciju i manje su robusni.
 - Fuzije podataka/Modeliranja: Kombiniranjem satelitski dobivenih OAC-ova s in situ mjerenjima, hidrološkim modelima ili ekološkim modelima.
- Potrebe za kalibracijom: Izuzetno visoke. Svaka posredna derivacija zahtijeva opsežne i robusne in situ skupove podataka za uspostavljanje i validaciju statističkih odnosa, koji često nisu globalno prenosivi.

Uloga referentnih (in situ) podataka u kalibraciji

Kalibracija s in situ podacima je kamen temeljac kvantitativnog daljinskog istraživanja kvalitete vode. Uključuje sustavan proces:

1. Podudarno prikupljanje podataka (*Coincident Data Collection*):

- Vrijeme: In situ mjerenja moraju biti prikupljena što bliže vremenu satelitskog preleta (idealno unutar pm 3 sata, ponekad pm 1 sat za sustave koji se brzo mijenjaju).
- Lokacija: In situ točke uzorkovanja moraju biti precizno georeferencirane i idealno smještene unutar homogenih vodenih piksela kako bi se izbjeglo prostorno nepodudaranje.
- Mjerenja: Poduzimaju se izravna, točna mjerenja relevantnih parametara kvalitete vode (npr. Chl-a filtracijom i spektrofotometrijom, TSS gravimetrijskom analizom, CDOM apsorpcijskom spektroskopijom, temperatura kalibriranim termometrima).
- Radiometrijska mjerenja: Za razvoj algoritama, in situ mjerenja radijancije koja napušta vodu ili reflektancije daljinskog istraživanja (pomoću spektroradiometra) često se prikupljaju istovremeno s parametrima kvalitete vode kako bi se uspostavili izravni spektralni odnosi.

2. Validacija atmosferske korekcije:

- Prije nego što se parametri kvalitete vode mogu derivirati, satelitski signal mora biti korigiran za atmosferske efekte kako bi se dohvatila točna radijancija koja napušta vodu ili reflektancija daljinskog istraživanja.
- In situ radiometrijska mjerenja također se koriste za validaciju algoritama atmosferske korekcije primijenjenih na satelitske snimke.

3. Razvoj i podešavanje algoritama (*Algorithm Development & Tuning*):

- Empirijski/Statistički: In situ podaci koriste se za derivaciju regresijskih jednadžbi ili obuku modela strojnog učenja koji povezuju satelitski dobivene spektralne informacije (npr. omjere pojasa, značajke spektralnog oblika) sa stvarnim in situ koncentracijama kvalitete vode. To često uključuje pokušaje i pogreške s različitim kombinacijama pojasa i statističkim modelima.

- Polu-analitički/Analitički: Iako su ovi algoritmi temeljeni na fizici, često zahtijevaju "podešavanje" specifičnih parametara (npr. inherentnih optičkih svojstava lokalnih vodenih konstituenata) korištenjem in situ mjerenja za optimizaciju njihove performanse za određeno vodeno tijelo ili regiju.

4. Validacija i procjena točnosti:

- Nakon razvoja algoritma, neovisni skup in situ podataka (koji nije korišten u razvoju) koristi se za validaciju njegove performanse.
- Statističke metrike poput srednje kvadratne pogreške (RMSE), srednje apsolutne postotne pogreške (MAPE), koeficijenta determinacije (R^2) i pristranosti (bias) izračunavaju se kako bi se kvantificirala točnost i preciznost satelitski dobivenih proizvoda u odnosu na referentne podatke (*ground truth*).

5. Dugoročno praćenje i rekaliibracija:

- Vodena tijela su dinamična. S vremenom, promjene u svojstvima konstituenata (npr. različite vrste alga, sastav sedimenata) ili degradacija senzora mogu zahtijevati rekaliibraciju algoritama korištenjem novih in situ podataka. Redoviti, dosljedni in situ programi praćenja stoga su ključni za održavanje dugoročnog, točnog satelitskog praćenja kvalitete vode.

Ukratko, daljinsko istraživanje satelitima nudi neusporedivu prostornu i vremensku pokrivenost za praćenje kvalitete vode, ali njegova kvantitativna točnost temeljno se oslanja na rigoroznu kalibraciju i validaciju korištenjem preciznih, podudarnih in situ mjerenja. Taj simbiotski odnos između daljinskog istraživanja i referentnih podataka čini satelitski dobivene informacije o kvaliteti vode moćnim alatom za upravljanje okolišem.

Procjena resursa implementacije tehnologije

Opći protokol za procjenu resursa u oblaku (obrada optičkih satelitskih podataka)

Cilj: Sustavno identificirati i kvantificirati resurse u oblaku (eng. *cloud resources*) potrebne za obradu optičkih satelitskih podataka, omogućujući procjenu troškova i planiranje infrastrukture.

Temeljna načela:

- **Dekompozicija:** Razgraditi cjelokupni radni tijek u zasebne, mjerljive faze.
- **Parametrizacija:** Za svaku fazu identificirati ključne metrike i varijable koje utječu na potrošnju resursa.
- **Skalabilnost:** Razmotriti kako će se potrebe za resursima mijenjati s povećanjem volumena podataka ili složenosti obrade.
- **Optimizacija:** Identificirati prilike za smanjenje potrošnje resursa (a time i troškova).

Faze protokola:

- Definiranje radnog tijeka i karakteristika podataka
- Procjena zahtjeva za pohranu
- Procjena zahtjeva za obradu (računalna snaga)
- Procjena mrežnih zahtjeva (izlazni/ulazni promet)
- Identifikacija zahtjeva za pomoćnim servisima
- Konsolidacija i optimizacija

Faza 1: Definiranje radnog tijeka i karakteristika podataka

Cilj: Jasno razumjeti cjevovod obrade (eng. *processing pipeline*) i prirodu podataka.

Ključna pitanja / potrebne informacije:

- **Dnevni volumen unosa podataka (eng. *Daily Data Ingest Volume*):** Koliki je prosječni dnevni volumen sirovih satelitskih podataka (npr. u GB, TB)?
 - *Primjeri:* "X GB podataka srednje rezolucije," "Y GB VHR podataka."
- **Izvor podataka i rezolucija:** Koja vrsta optičkih satelitskih podataka (npr. Sentinel-2, PlanetScope, Maxar WorldView, Pleiades)? Koja je njezina tipična **prostorna rezolucija**?
 - *Utjecaj:* Izravno utječe na veličinu datoteke (piksela po jedinici površine), potrebe za predobradom i zahtjeve za GPU.
- **Točni koraci obrade:** Obrisati cjelokupni cjevovod obrade od sirovog ulaza do konačnog izlaza.
 - *Primjeri:* Dohvat (eng. *Retrieval*), predobrada (radiometrijska, atmosferska, geometrijska), **inferencija strojnog učenja (ML Inference)**, fuzija podataka (eng. *Data Fusion*), naknadna obrada (eng. *Post-processing*), itd.
- **Volumen i tip izlaznih podataka:** Koliki je dnevni volumen konačnog, kondenziranog izlaza (npr. 100 MB vektorskih podataka, 5 GB obrađenog rastra)?
- **Politika zadržavanja podataka (eng. *Data Retention Policy*):** Koliko dugo se moraju pohranjivati sirovi, međufazni i konačni obrađeni podaci, i u kojim slojevima (eng. *tiers*) (npr. **vrući (hot)**, **topli (warm)**, **hladni/arhivski (cold/archive)**)?
- **Učestalost obrade:** Je li obrada dnevna, tjedna, na zahtjev (eng. *on-demand*) ili u stvarnom vremenu?

- **Zahtjevi za performanse:** Koje je prihvatljivo kašnjenje obrade (npr. unutar 24 sata, rezultati u stvarnom vremenu)?

Faza 2: Procjena zahtjeva za pohranu

Cilj: Kvantificirati kapacitet pohrane i obrasce pristupa.

Ključni parametri za procjenu:

1. Ukupna pohrana sirovih podataka:

- Dnevni volumen unosa podataka * Broj dana zadržavanja sirovih podataka
- *Razmotriti:* Pohranjuju li se sirovi podaci u vrućim, hladnim ili arhivskim slojevima tijekom razdoblja zadržavanja?

2. Ukupna pohrana obrađenih/međufaznih podataka:

- Prosječni dnevni volumen međufaznih podataka * Broj dana zadržavanja međufaznih podataka
- Prosječni dnevni volumen konačnog izlaza * Broj dana zadržavanja konačnog izlaza
- *Razmotriti:* Hoće li obrađeni podaci također prelaziti između slojeva? Koliki je volumen podataka generiran u svakom koraku obrade (npr. nakon ortorektifikacije, nakon inferencije ML-a)?

3. Obrasci pristupa pohrani:

- Koliko se često podacima pristupa iz svakog sloja (npr. često se čitaju za obradu, rijetko se čitaju za arhiviranje)?
- Procijeniti broj operacija čitanja/pisanja (**API poziva**) za *buckete*.

Fokus izračuna: Ukupni GB/mjesec po sloju pohrane (npr. "X GB vruće pohrane," "Y GB hladne pohrane").

Faza 3: Procjena zahtjeva za obradu (računalna snaga)

Cilj: Odrediti potrebnu računalnu snagu za sve korake obrade, posebno strojno učenje (ML).

Ključni parametri za procjenu:

1. Tip računalne instance (eng. *Compute Instance Type*):

- Za zadatke opterećene CPU-om (npr. planiranje, lakša predobrada): Broj **vCPU-a** i količina RAM-a.
- Za zadatke opterećene GPU-om (npr. inferencija ML-a): Tip **GPU-a** (npr. T4, A10, A100), broj GPU-a i pridruženi vCPU-i/RAM.
- *Utjecaj:* Izravno utječe na cijenu po satu.

2. Vrijeme obrade po podatkovnoj jedinici:

- Koliko je vremena potrebno da određena jedinica podataka (npr. 1 GB sirovih podataka, jedna slikovna scena) prođe kroz ML fazu intenzivnu za GPU?
- *Ovo je često najkritičnije i najteže procijeniti bez benčmarkiranja (eng. *benchmarking*).*

3. Dnevni/mjesečni sati računalne snage (eng. *Compute Hours*):

- Dnevni volumen unosa podataka / Veličina podatkovne jedinice * Vrijeme obrade po podatkovnoj jedinici = Ukupni dnevni sati računalne snage
- Ukupni dnevni sati računalne snage * 30 dana = Ukupni mjesečni sati računalne snage

4. Strategija skaliranja:

- Hoće li računalne instance biti **stalno uključene (always-on)**, isključene kada su neaktivne, ili će koristiti **poslužiteljske funkcije bez poslužitelja (serverless/burst functions)**?
- Razmotriti korištenje **spot/preemptivnih instanci** za uštedu troškova kod prekidivih radnih opterećenja.
- *Utjecaj*: Utječe na efektivnu cijenu po satu.

5. Računalna snaga za orkestraciju/planer zadataka:

- Korištenje male virtualne mašine (VM) ili funkcije bez poslužitelja za planiranje i upravljanje radnim tijekom. Ovo je tipično minorno, ali treba biti zabilježeno.

Fokus izračuna: Ukupni sati računalne snage po tipu instance mjesečno (npr. "X sati g4dn.xlarge instance," "Y sati Lambda funkcije").

Faza 4: Procjena mrežnih zahtjeva (izlazni/ulazni promet)

Cilj: Kvantificirati troškove prijenosa podataka.

Ključni parametri za procjenu:

1. Izlazni promet podataka (eng. *Data Egress*, preuzimanja iz oblaka):

- Dnevni volumen izlaznih podataka koje preuzimaju korisnici * 30 dana = Ukupni mjesečni izlazni promet
- Svi ostali podaci preuzeti iz pohrane u oblaku (npr. za vanjske aplikacije)
- *Utjecaj*: Izlazni promet je tipično najskuplji mrežni trošak.

2. Ulazni promet podataka (eng. *Data Ingress*, učitavanja u oblak):

- Dnevni volumen unosa sirovih podataka * 30 dana = Ukupni mjesečni ulazni promet
- *Napomena:* Ulazni promet je općenito besplatan ili vrlo niske cijene kod glavnih pružatelja usluga u oblaku.

3. Interni prijenos podataka:

- Prijenos podataka **između usluga u oblaku unutar iste regije** (npr. pohrana do računalne instance) obično je besplatan ili vrlo niske cijene.
- Prijenos podataka **između različitih regija** unutar oblaka se naplaćuje i može biti značajan. Pretpostavite jednu regiju za početne procjene, osim ako nije drugačije navedeno.

Fokus izračuna: Ukupni GB/mjesec za izlazni promet (npr. "Z GB izlaznog prometa").

Faza 5: Identifikacija zahtjeva za pomoćnim servisima

Cilj: Uključiti troškove za prateće usluge koje generiraju troškove.

Primjeri servisa:

- **Baza podataka:** Ako se rezultati ML-a ili metapodaci pohranjuju u upravljanoj bazu podataka (npr. PostgreSQL, NoSQL DB).
- **Praćenje i logiranje (eng. *Monitoring & Logging*):** Usluge poput CloudWatch, Stackdriver, Azure Monitor.
- **Registar kontejnera (eng. *Container Registry*):** Za Docker slike ML modela.
- **Upravljanje ML usluge (eng. *Managed ML Services*):** Ako se koriste platforme više razine (npr. SageMaker, Vertex AI) izvan sirovih GPU instanci.

- **Mrežne usluge:** Balanseri opterećenja (eng. *load balancers*), VPN-ovi, specijalizirane mrežne konfiguracije.
- **Sigurnosne usluge:** WAF-ovi (eng. *Web Application Firewalls*), DDoS zaštita.

Fokus izračuna: Procjena troškova na temelju obrazaca korištenja ili fiksnih stopa za te usluge (npr. "X sati/GB za praćenje," "Y sati instance baze podataka").

Faza 6: Konsolidacija i optimizacija

Cilj: Agregirati sve procijenjene troškove i identificirati strategije za smanjenje troškova.

Koraci:

1. **Zbrojiti sve procijenjene troškove:** Zbrojiti troškove pohrane, računalne snage, mreže i pomoćnih servisa za ukupnu mjesečnu procjenu.
2. **Primijeniti besplatne razine (eng. *Free Tiers*):** Oduzeti sve besplatne dopuštene količine (posebno za nove račune) od ukupnog iznosa.
3. **Istražiti strategije optimizacije:**
 - **Rezervirane instance/planovi štednje (eng. *Reserved Instances/Savings Plans*):** Za predvidljivu, dugotrajnu računalnu snagu.
 - **Spot/preemptivne instance (eng. *Spot/Preemptible Instances*):** Za otporna na pogreške, prekidiva radna opterećenja.
 - **Upravljanje životnim ciklusom podataka (eng. *Data Lifecycle Management*):** Agresivno premještati podatke u hladnije slojeve pohrane.
 - **Automatsko skaliranje (eng. *Auto-scaling*):** Skalirati računalne resurse gore i dolje prema potražnji.

- **Pravilno dimenzioniranje (eng. *Right-Sizing*):** Osigurati da instance nisu previše opremljene.
 - **Učinkovit kod/modeli:** Optimizirati ML modele za bržu inferenciju.
 - **Obrada unutar oblaka (eng. *Processing In-Cloud*):** Minimizirati izlazni promet podataka iz oblaka obavljanjem svih teških obrada unutar oblaka.
4. **Doraditi procjene:** Na temelju strategija optimizacije, revidirati početne brojeve troškova.
5. **Koristiti kalkulator pružatelja usluga u oblaku:** Uvijek unijeti svoje doradene parametre u službene kalkulator cijena AWS-a, Google Clouda ili Azurea za najtočnije trenutne podatke.

Tablica: Usporedba resursa za izvore podataka korištenih u ovoj studiji.

Značajka/Metrika	PlanetScope (1 slika: 25 MB)	Maxar WorldView Legion (1 slika: 76 MB)	Pleiades Neo (1 slika: 390 MB)	SkySat (1 slika: 760 MB)	Agregirano (Dnevni ukupni zbroj)
Tip podataka	RGB+TOA+BOA + Metapodaci	BOA + Metapodaci	BOA + Metapodaci	RGB (240 MB) + BOA (520 MB) + Metapodaci	Različiti VHR (0.3m-1m) i srednja rezolucija (3-5m), svi predobrađeni.
Prostorna rezolucija (tipična)	~3-5m (SuperDove)	~0.3-0.5m	~0.3m	~0.5-0.8m	Mješovite rezolucije, zahtijevaju robusne ML modele.
Dnevni volumen unosa podataka	25 MB	76 MB	390 MB	760 MB	~1.25 GB/dan
Godišnji volumen unosa	9.125 GB	27.74 GB	142.35 GB	277.4	~456.25 GB/godina

podataka				GB	
Volumen sirovih podataka (za 2 godine)	18.25 GB	55.48 GB	284.7 GB	554.8 GB	~912.5 GB (~0.91 TB) (Ukupni volumen sirovih podataka pohranjenih 2 godine)
Primarni tip GPU-a za ML	NVIDIA T4 (učinkovit za manje slike)	NVIDIA A10 (dobar balans za VHR)	NVIDIA A10	NVIDIA A10	Jedna NVIDIA A10 instanca (optimizirana za sekvencijalnu obradu).
Procijenjeno vrijeme obrade po slici (na A10)	~15 sekundi	~30 sekundi	~2 minute (120 sekundi)	~4 minute (240 sekundi)	~6.75 minuta aktivnog GPU vremena dnevno (Ukupan zbroj pojedinačnih vremena obrade)
Procijenjeno dnevno obračunato GPU vrijeme	Dio zajedničkih 30 min/dan za sve slike	Dio zajedničkih 30 min/dan za sve slike	Dio zajedničkih 30 min/dan za sve slike	Dio zajedničkih 30 min/dan za sve slike	30 minuta (0.5 sati) (Uključuje vrijeme pokretanja, režijske troškove, minimalni obračunski inkrement)
Procijenjeni mjesečni trošak računalne snage (GPU)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	\$18.00 (0.5 sati/dan * 30 dana/mjesec * \$1.20/sat za A10 GPU instancu uključujući bazu VM-a)
Procijenjeni mjesečni trošak pohrane	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	\$5.94 (Razrada: Vruća: \$2.81, Hladna: \$2.40, Obrađeni izlaz: \$0.73)

Procijenjeni mjesečni trošak izlaznog prometa (Egress)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	\$0.27 (za 3 GB/mjesec kondenziranog izlaza od 100 MB dnevno)
Procijenjeni mjesečni trošak planera zadataka (Scheduler)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	N/A (pokriveno zajedničkim troškom)	\$5.00 (fiksni mjesečni trošak)
UKUPNI PROCIJENJENI MJESEČNI TROŠAK U OBLAKU	N/A (pokriveno ukupnim)	N/A (pokriveno ukupnim)	N/A (pokriveno ukupnim)	N/A (pokriveno ukupnim)	~\$29.21 (Ovo je agregirani trošak za upravljanje svim ovim izvorima podataka u jednom sustavu)

Održavanje tehnologije

Održavanje sustava za obradu satelitskih podataka u oblaku

Osim financijskih aspekata, praktična strana održavanja sustava za obradu satelitskih podataka u oblaku ključna je za njegov dugoročni uspjeh. Evo kratkog opisa ključnih područja održavanja:

Održavanje sustava u oblaku za svakodnevnu obradu satelitskih podataka, posebno s različitim VHR izvorima i komponentama strojnog učenja (ML), uključuje niz tekućih aktivnosti kako bi se osigurala njegova pouzdanost, učinkovitost i točnost. Ključna područja uključuju:

Praćenje sustava i upozoravanje (System Monitoring & Alerting)

- Svrha: Kontinuirano promatrati ispravnost i performanse svih komponenti.
- Aktivnosti: Postavljanje nadzornih ploča (*dashboards*) i upozorenja (*alerts*) za iskorištenost računalnih resursa (CPU, GPU, RAM), kapacitet pohrane, mrežni promet, status poslova obrade (uspjeh/neuspjeh, trajanje) i ograničenja API poziva prema pružateljima podataka. Anomalije pokreću trenutne obavijesti operaterima.

Provjere ispravnosti podatkovnog toka (Data Pipeline Health Checks)

- Svrha: Provjeriti nesmetan protok podataka od akvizicije do konačnog izlaza.
- Aktivnosti: Redovito provjeravanje logova planera zadataka (*scheduler logs*) za neuspjele okidače (*failed triggers*), API odgovore od pružatelja podataka za pogreške, uspješna preuzimanja podataka u privremene *buckete* (*staging buckets*), te integritet prijenosa podataka između faza obrade. To uključuje provjeru filtriranja pokrivenosti oblacima i drugih početnih provjera kvalitete podataka.

Praćenje i ponovno obučavanje ML modela (ML Model Monitoring & Retraining)

- Svrha: Osigurati da ML modeli održavaju performanse i prilagođavaju se promjenjivim uvjetima.
- Aktivnosti: Praćenje točnosti inferencije modela (*model inference accuracy*), detekcija *drifta* (identificiranje pogoršanja performansi modela s vremenom zbog promjena u karakteristikama ulaznih podataka poput novih senzora ili okolišnih pomaka), te kvaliteta izlaznih podataka modela. Povremeno će biti potrebno ponovno obučavanje modela (*retraining*) s novim, anotiranim podacima kako bi se održala ili poboljšala točnost. To uključuje upravljanje skupovima podataka za obuku i MLOps cjevovodima (*pipelines*).

Upravljanje softverom i ovisnostima (Software & Dependency Management)

- Svrha: Održavati ažurnost procesnog softvera, biblioteka i slika kontejnera (*container images*).
- Aktivnosti: Primjenjivanje sigurnosnih zakrpa (*patching*) na operative sustave, ažuriranje Python biblioteka (npr. geoprostornih biblioteka poput GDAL, Rasterio, ML

okvira poput TensorFlow/PyTorch) i osiguravanje kompatibilnosti između različitih verzija softvera unutar kontejnerskih okruženja. To uključuje i upravljanje GPU drajverima.

Upravljanje životnim ciklusom podataka i optimizacija pohrane (Data Lifecycle Management & Storage Optimization)

- Svrha: Učinkovito upravljati podacima kroz slojeve pohrane i osigurati integritet podataka.
- Aktivnosti: Redovito pregledavanje i primjena politika životnog ciklusa podataka za prijelaz podataka iz vruće (hot) u hladnu/arhivsku (cold/archive) pohranu radi optimizacije troškova. To uključuje provjeru kontrolnih suma podataka (*checksums*) i strategija sigurnosnog kopiranja za kritične obrađene izlaze.

Sigurnosna ažuriranja i usklađenost (Security Updates & Compliance)

- Svrha: Zaštititi sustav od ranjivosti i pridržavati se najboljih sigurnosnih praksi.
- Aktivnosti: Primjenjivanje sigurnosnih zakrpa na infrastrukturu u oblaku i softver, upravljanje kontrolama pristupa (IAM uloge, korisničke dozvole) i redovita revizija konfiguracija kako bi se osigurala usklađenost s relevantnim propisima o privatnosti podataka ili industrijskim standardima.

Optimizacija troškova i pravilno dimenzioniranje resursa (Cost Optimization & Resource Right-Sizing)

- Svrha: Kontinuirano tražiti načine za smanjenje izdataka u oblaku.
- Aktivnosti: Pregledavanje računa za usluge u oblaku, identificiranje nedovoljno iskorištenih resursa, optimizacija tipova računalnih instanci i konfiguracija skaliranja (npr. korištenje *spot instanci* gdje je to prikladno) te fino podešavanje politika životnog ciklusa podataka. To je kontinuirani proces balansiranja performansi i troškova.

Dokumentacija i prijenos znanja (Documentation & Knowledge Transfer)

- Svrha: Održavati jasnu evidenciju arhitekture sustava, konfiguracija i operativnih procedura.

- Aktivnosti: Ažuriranje priručnika (*runbooks*), arhitektonskih dijagrama i vodiča za rješavanje problema (*troubleshooting guides*). Osiguravanje da se znanje dijeli unutar tima kako bi se omogućio učinkovit odgovor na incidente i budući razvoj.

Detaljni opis korištene tehnologije

Rezultati satelitskog praćenja dobiveni su korištenjem softverskog rješenja Coastal Intelligence razvijenog od strane tvrtke Sea Cras d.o.o. Softver se temelji na zaštićenom algoritmu umjetne inteligencije za obradu satelitskih snimaka iznimno visoke prostorne rezolucije. U okviru ove studije korišten je za kvantifikaciju koncentracije klorofila-a (deskriptor D5), ukupne suspendirane tvari (deskriptor D7) i morskog otpada (D10). Softver je validiran i uspješno primijenjen u više projekata za javne institucije u Republici Hrvatskoj i Europskoj uniji.

Satelitsko praćenje se provodilo na temelju trenutnog stanja u pojedinom danu, odnosno detekcijom u jednom promatranom trenutku. Ukupno je prikupljeno 58 satelitskih snimki iznimno visoke prostorne rezolucije, od kojih je 46 uvršteno u analizu jer su ispunjavale meteorološke uvjete potrebne za uspješnu obradu. Iako je projektom bilo predviđeno tjedno praćenje koncentracije klorofila-a i ukupne suspendirane tvari, provedena analiza obuhvatila je sve dostupne datume u razdoblju od svibnja do rujna 2024., za koje su satelitske snimke visoke kvalitete zadovoljavale meteorološke kriterije. Na taj način omogućena je detaljnija vremenska rezolucija praćenja od one minimalno tražene, čime je povećana pouzdanost uočavanja sezonskih i prostorno uvjetovanih obrazaca.

U ovoj studiji, za potrebe analize deskriptora D5, D7 i D10, korišteni su satelitski podaci Maxar WorldView Legion, Pléiades Neo, Planet SkySat, i PlanetDoves koji zahvaljujući

visokoj prostornoj rezoluciji omogućuju precizniju detekciju površinom manjih pojava te plutajućih objekata.

Analiza deskriptora D5 i D7 provedena je postavljanjem četiri virtualne mjerne postaje, označene kao Lokacije 1 – 4, na pozicijama koje predstavljaju različite stupnjeve zatvorenosti i otvorenosti mora (slika 1). Za svaku postaju provedeno je usrednjivanje vrijednosti iz devet okolnih piksela (3x3), kako bi se dobile stabilnije i reprezentativnije procjene vrijednosti koncentracije klorofila-a i ukupne suspendirane tvari. Takav pristup omogućio je detaljniji uvid u prostornu varijabilnost koncentracija, kao i njihovu povezanost s vanjskim čimbenicima poput meteoroloških uvjeta i antropogenih utjecaja.

U svrhu bolje interpretacije satelitskih podataka prikupljeni su i relevantni meteorološki podaci za razdoblje monitoringa s najbliže postaje Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) – postaja Rovinj. Analizirani su dnevni podaci o oborinama, smjeru i brzini vjetera te temperatura zraka u 14 sati. Vrijednosti u 14 sati odabrane su jer vremenski najviše odgovaraju satelitskim snimanjima koja su u prosjeku zabilježena između 11:00 i 12:30 sati, te su stoga reprezentativnije za usporedbu od, primjerice, jutarnjih mjerenja u 7:00 sati.

Osim atmosferskih podataka, analizirana je i temperatura mora preuzeta s najbliže pomorske meteorološke postaje DHMZ-a – Sv. Ivan na Pučini – kao dodatni orijentir pri tumačenju toplinskih i biokemijskih procesa unutar akvatorija Limskog zaljeva.



Slika 1. Lokacije virtualnih mjernih postaja unutar područja satelitskog monitoringa Limskog zaljeva

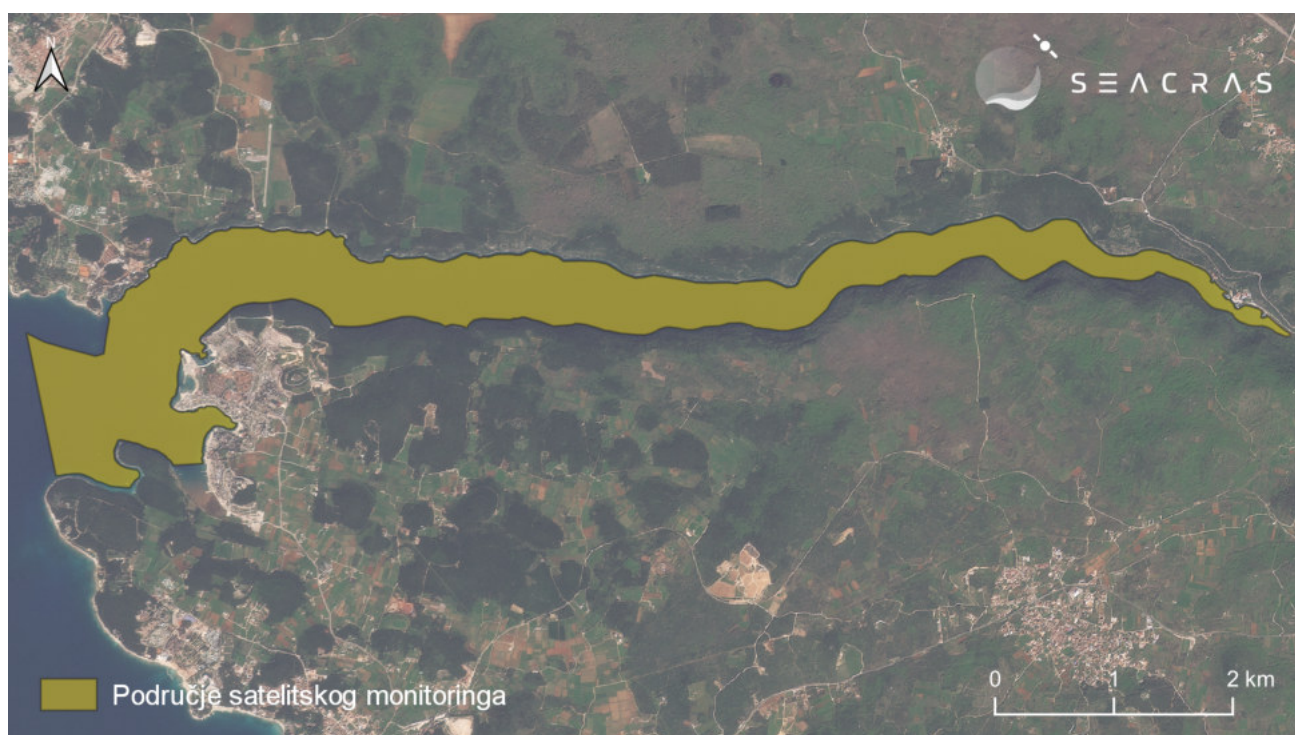
NAPOMENA: Tematski slojevi podataka preklopljeni su preko temeljne pozadinske satelitske snimke (osnovna karta, osnovni sloj, basemap). Osnovni sloj (basemap) korišten je kao referentna karta cjelokupnog područja visoke prostorne rezolucije.

Područje monitoringa

Limski zaljev je potopljena kanjonska dolina u kršu smještena na zapadnoj obali Istre, između Rovinja i Vrsara. Zaljev je dugačak oko 10 km, s prosječnom širinom od 600 m i strmim kanjonskim stranama visokim do 150 metara. Sa svojim prirodnim nastavkom – Limskom dragom, čini jedinstvenu krajobraznu i hidrološku cjelinu. Zbog svoje prirodne vrijednosti i očuvanosti, Limski zaljev je 1964. godine proglašen značajnim krajobrazom, s ukupnom zaštićenom površinom od 8,828 km²

(izvor: <https://www.natura-histrica.hr/hr/zasticena-podrucja>)

Područje obuhvaćeno ovom studijom odnosi se isključivo na površinu mora, s naglaskom na unutarnji dio Limskog zaljeva te prošireni morski akvatorij prema zapadu, koji djelomično izlazi izvan granica službeno zaštićenog područja (slika 2).



Slika 2. Tematska karta područja satelitskog monitoringa Limskog zaljeva

Ukupna površina analiziranog morskog područja iznosi 6,85 km², u skladu sa zahtjevima projekta. Ovakav prostorni obuhvat odabran je kako bi se osigurala reprezentativna pokrivenost relevantnih biokemijskih procesa te postigla veća prostorna osjetljivost u praćenju eutrofikacije, hidrografskih promjena i morskog otpada.

Takva definicija područja omogućava praćenje:

- Unutarnjeg, zatvorenijeg dijela zaljeva gdje su promjene najizraženije

- Otvorenijeg dijela prema zapadu gdje se bilježe prijelazni procesi između zaljevskog i otvorenog morskog sustava

Razdoblje i vrijeme monitoringa

Analiza satelitskih snimaka iznimno visoke prostorne rezolucije korištena je za izračun koncentracije klorofila-a (deskriptor D5), ukupne suspendirane tvari (deskriptor D7) i morskog otpada (D10). Snimke su dobivene putem satelita, pri čemu metapodaci – uključujući vrijeme preleta iznad područja monitoringa – odgovaraju razdoblju između 11:00 i 12:30 sati.

Satelitske snimke korištene su za analizu unutar definiranog područja. Analizirale su se snimke prikupljene u razdoblju od 1. svibnja do 30. rujna 2024. godine. Za analizu su korištene samo one snimke koje su zadovoljavale meteorološke kriterije potrebne za uspješnu analizu¹.

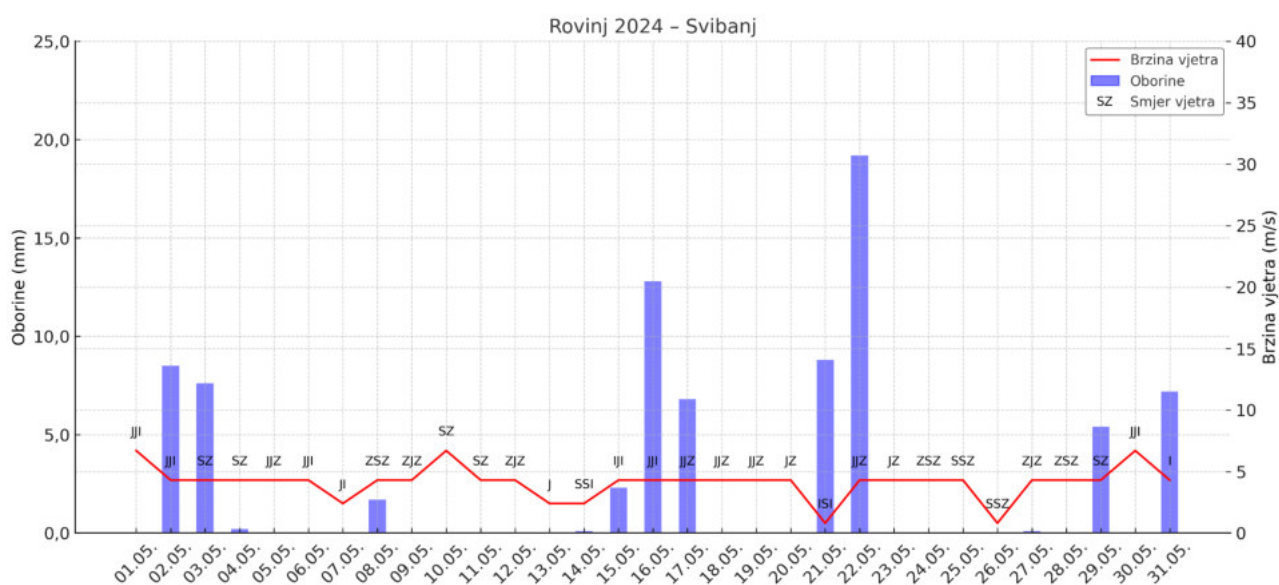
Meteorološki i oceanografski podaci

Meteorološki i oceanografski podaci prikupljeni su za sve dane uključene u satelitsku analizu, s ciljem interpretacije rezultata vezanih uz biokemijske deskriptore D5 (eutrofikacija) i D7 (hidrografske promjene). Meteorološki podaci (oborine, smjer i brzina vjetra, temperatura zraka u 14 h) preuzeti su s postaje Rovinj (DHMZ), dok su podaci o temperaturi mora preuzeti s pomorske postaje Sv. Ivan na Pučini.

U nastavku su prikazani mjesečni grafovi za svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz i rujna 2024., koji obuhvaćaju sve dane u mjesecu i prikazuju promjene atmosferskih uvjeta tijekom

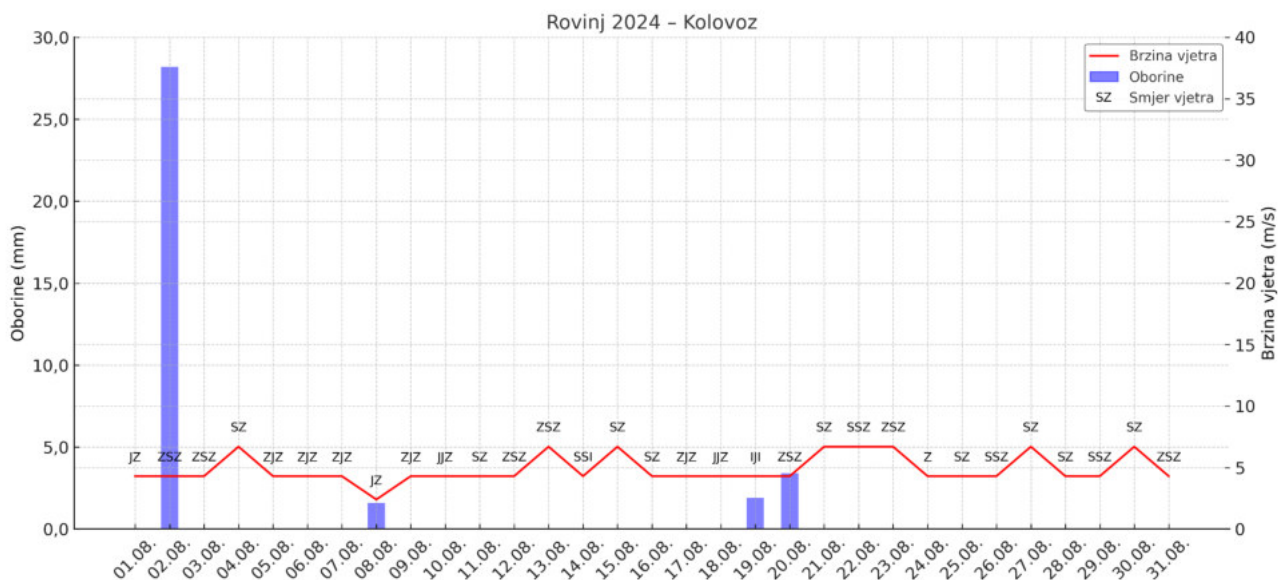
¹ Glavni kriterij bio je odsutnost naoblake iznad i oko definiranog područja monitoringa.

promatranog razdoblja. Za odabrane datume koji su uključeni u analizu satelitskih snimaka, pripremljen je dodatni tablični prikaz koji uključuje i podatke o temperaturi zraka i temperaturi mora. Ovakva kombinacija omogućava usporedbu meteoroloških uvjeta s promjenama biokemijskih parametara po danima i unutar šireg sezonskog konteksta.

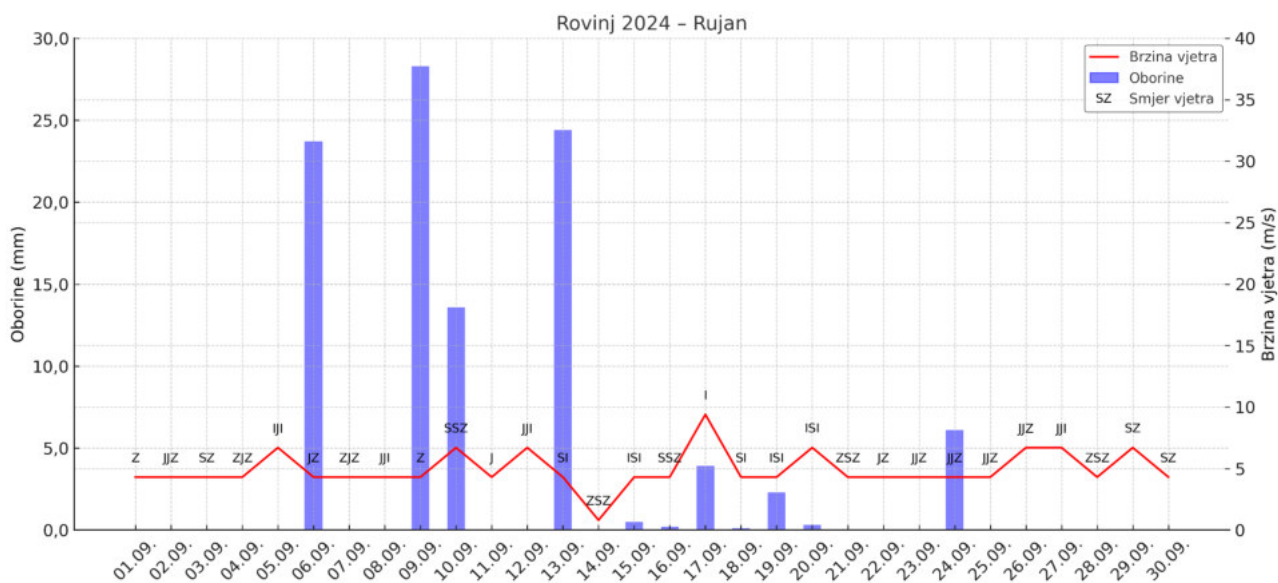


Slika 3. Meteorološki podaci o oborinama, brzini i smjeru vjetra za svibanj 2024. – postaja Rovinj (DHMZ)





Slika 6. Meteorološki podaci o oborinama, brzini i smjeru vjetra za kolovoz 2024. – postaja Rovinj (DHMZ)



Slika 7. Meteorološki podaci o oborinama, brzini i smjeru vjetra za kolovoz 2024. – postaja Rovinj (DHMZ)

Tablica 1. Meteorološki i oceanografski podaci za datume uvrštene u analizu (svibanj - rujan 2024.)

Datum	Oborine (mm)	Brzina vjetra (km/h)	Smjer vjetra	Temperatura zraka (°C)	Temperatura mora (°C)
01.05.2024.	0	24,12	JJI	19,2	16,3
05.05.2024.	0	15,48	JJZ	16,2	16,0
08.05.2024.	1,7	15,48	ZSZ	16	16,4
10.05.2024.	0	24,12	SZ	17,4	16,3
17.05.2024.	6,8	15,48	JJZ	18	17,5
18.05.2024.	0	15,48	JJZ	18	17,7
22.05.2024.	19,2	15,48	JJZ	18,8	18,3
23.05.2024.	0	15,48	JZ	18,7	18,5
24.05.2024.	0	15,48	ZSZ	18,1	19,0
25.05.2024.	0	15,48	SSZ	18,8	19,2
26.05.2024.	0	2,88	SSZ	19	19,2
28.05.2024.	0	15,48	ZSZ	19,6	21,1
03.06.2024.	0,3	24,12	SZ	18,2	21,2
12.06.2024.	0,8	15,48	JJZ	20,4	24,4
15.06.2024.	0	15,48	JJZ	21,6	24,0
23.06.2024.	0	15,48	ISI	24,8	24,5
30.06.2024.	0	15,48	JJZ	26,3	24,3
05.07.2024.	0	15,48	ZSZ	22,8	24,0
06.07.2024.	0	24,12	JJI	24,3	24,2
08.07.2024.	0	24,12	SZ	26,1	25,3
10.07.2024.	0	15,48	ZJZ	28	25,6
15.07.2024.	0	24,12	SSZ	28,3	27,5
17.07.2024.	0	15,48	ZSZ	28,5	28,0
18.07.2024.	0	24,12	SSZ	28,7	28,0
19.07.2024.	0	24,12	SZ	29,6	28,0
21.07.2024.	0,3	15,48	JJZ	25,5	27,8
22.07.2024.	0	24,12	Z	26	27,6
27.07.2024.	0	2,88	ZSZ	26,1	27,9
29.07.2024.	0	24,12	ZSZ	26,6	28,2
30.07.2024.	0	24,12	ZJZ	25,5	28,0
31.07.2024.	0	24,12	SSZ	26,3	27,5
02.08.2024.	28,2	15,48	ZSZ	24,6	28,0

06.08.2024.	0	15,48	ZJZ	25,5	26,8
07.08.2024.	0	15,48	ZJZ	26,6	28,1
09.08.2024.	0	15,48	ZJZ	26,1	28,8
10.08.2024.	0	15,48	JJZ	27	28,7
11.08.2024.	0	15,48	SZ	27,6	28,9
13.08.2024.	0	24,12	ZSZ	28	28,9
15.08.2024.	0	24,12	SZ	27	28,9
16.08.2024.	0	15,48	SZ	26,4	28,5
18.08.2024.	0	15,48	JJZ	27,2	28,5
28.08.2024.	0	15,48	SZ	26,3	27,3
04.09.2024.	0	15,48	ZJZ	24,8	26,0
10.09.2024.	13,6	24,12	SSZ	20,4	26,1
21.09.2024.	0	15,48	ZSZ	17,8	22,7
23.09.2024.	0	15,48	JJZ	19,8	22,5

Tijekom razdoblja od svibnja do rujna 2024. zabilježene su izražene vremenske razlike koje su mogle utjecati na biokemijske procese u moru. Svibanj i kolovoz obilježile su jače oborinske epizode, dok je srpanj bio mjesec s manje padalina, ali s pojačanim vjetrom. Temperatura zraka rasla je prema vrhuncu u srpnju i kolovozu. Takvi uvjeti pružaju važan kontekst za razumijevanje promjena deskriptora D5 i D7 u nastavku.

Demonstracija tehnologije na pilot lokaciji Naručitelja

Praćenje koncentracije klorofila-*a* (deskriptor D5)

U sklopu satelitskog monitoringa provedena je analiza koncentracije klorofila-*a* kao ključnog indikatora eutrofikacije (deskriptor D5). Eutrofikacija je proces povećanja biološke

proizvodnje uslijed povišene koncentracije hranjivih tvari, često povezan s antropogenim utjecajima i hidrološki zatvorenim područjima.

U tablici 2 prikazane su srednje dnevne vrijednosti koncentracije klorofila-a za četiri virtualne postaje u dane kada su satelitske snimke zadovoljile kriterije kvalitete i ušle u analizu. Prikaz omogućuje usporedbu prostorne i vremenske dinamike unutar promatranog razdoblja (svibanj – rujna 2024.).

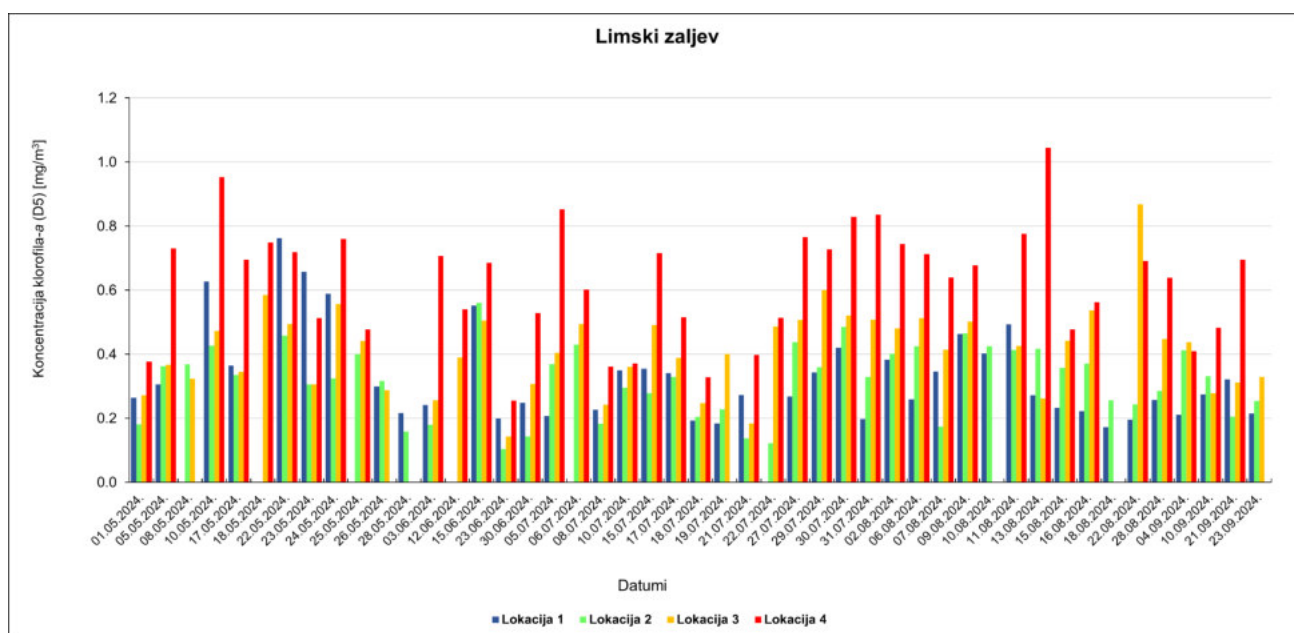
Tablica 2. Koncentracija klorofila-a (mg/m^3) po virtualnim mjernim postajama za analizirane datume u Limskom zaljevu

Datum	Lokacija 1	Lokacija 2	Lokacija 3	Lokacija 4
01.05.2024.	0,31	0,23	0,27	0,42
05.05.2024.	0,36	0,38	0,38	0,59
08.05.2024.	/*	0,33	0,32	/*
10.05.2024.	0,40	0,32	0,32	0,65
17.05.2024.	0,46	0,35	0,33	0,68
18.05.2024.	/	/	0,37	0,42
22.05.2024.	0,66	0,42	0,38	0,48
23.05.2024.	0,49	0,32	0,32	0,68
24.05.2024.	0,53	0,31	0,37	0,67
25.05.2024.	/*	0,32	0,33	0,61
26.05.2024.	0,34	0,32	0,28	0,82
28.05.2024.	0,28	0,21	/*	/*
03.06.2024.	0,31	0,26	0,35	0,63
12.06.2024.	/*	/*	0,37	0,99
15.06.2024.	0,51	0,49	0,37	0,69
23.06.2024.	0,32	0,29	0,23	0,71
30.06.2024.	0,24	0,19	0,24	0,44
05.07.2024.	0,30	0,29	0,44	0,81
06.07.2024.	/*	0,34	0,31	0,54
08.07.2024.	0,45	0,20	0,26	0,44
10.07.2024.	0,45	0,29	0,34	0,59

15.07.2024.	0,36	0,29	0,40	0,76
17.07.2024.	0,35	0,31	0,33	0,79
18.07.2024.	0,19	0,24	0,24	0,48
19.07.2024.	0,23	0,27	0,31	/*
21.07.2024.	0,36	0,24	0,23	0,49
22.07.2024.	/*	0,30	0,31	0,55
27.07.2024.	0,31	0,32	0,35	0,63
29.07.2024.	0,27	0,35	0,38	1,00
30.07.2024.	0,30	0,34	0,23	0,86
31.07.2024.	0,20	0,28	0,36	0,62
02.08.2024.	0,34	0,31	0,34	0,96
06.08.2024.	0,31	0,31	0,33	0,71
07.08.2024.	0,38	0,23	0,33	0,72
09.08.2024.	0,41	0,33	0,34	0,85
10.08.2024.	0,33	0,34	/*	/*
11.08.2024.	0,67	0,51	0,36	0,80
13.08.2024.	0,44	0,29	0,28	0,58
15.08.2024.	0,29	0,36	0,33	0,58
16.08.2024.	0,22	0,24	0,31	0,60
18.08.2024.	0,26	0,20	/*	/*
28.08.2024.	0,25	0,26	0,31	0,69
04.09.2024.	0,24	0,24	0,29	0,48
10.09.2024.	0,51	0,34	0,36	0,94
21.09.2024.	0,25	0,25	0,30	0,84
23.09.2024.	0,29	0,27	0,34	/*

*Nema podataka zbog nepovoljnih atmosferskih uvjeta nad promatranim područjem u trenutku prolaska satelita

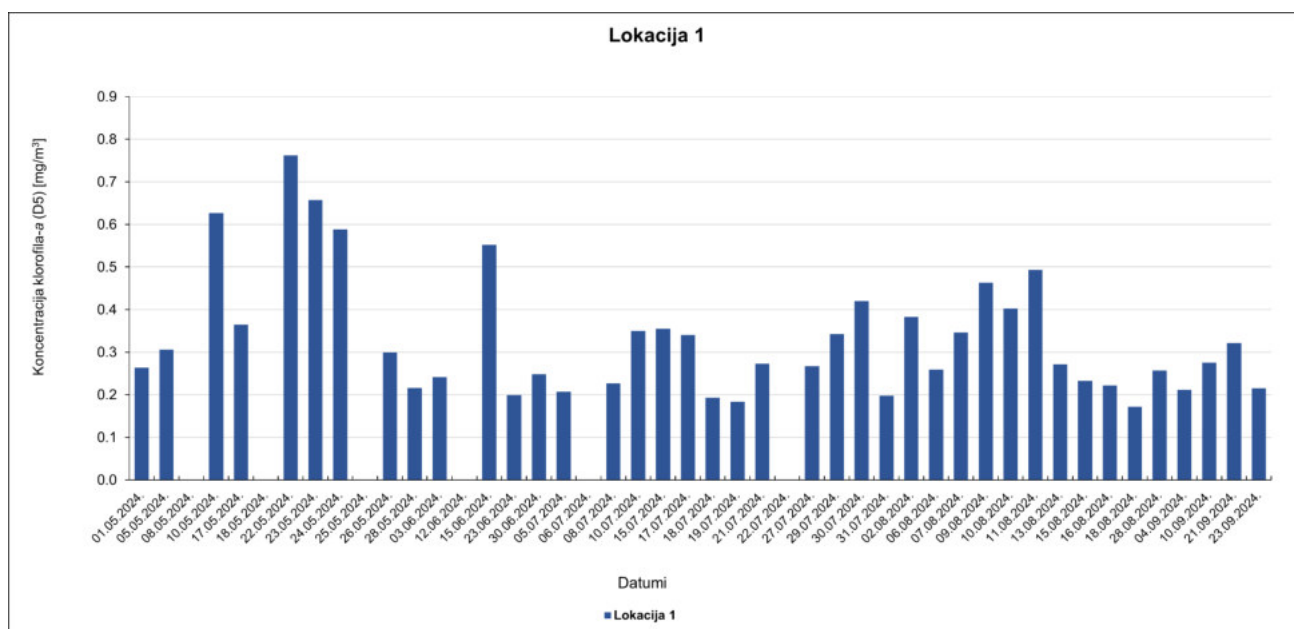
Vizualni prikaz koncentracija klorofila-a po virtualnim postajama i danima grafički je prikazan je na slici 8. i omogućuje lakšu usporedbu dinamike između različitih lokacija kroz promatrani period.



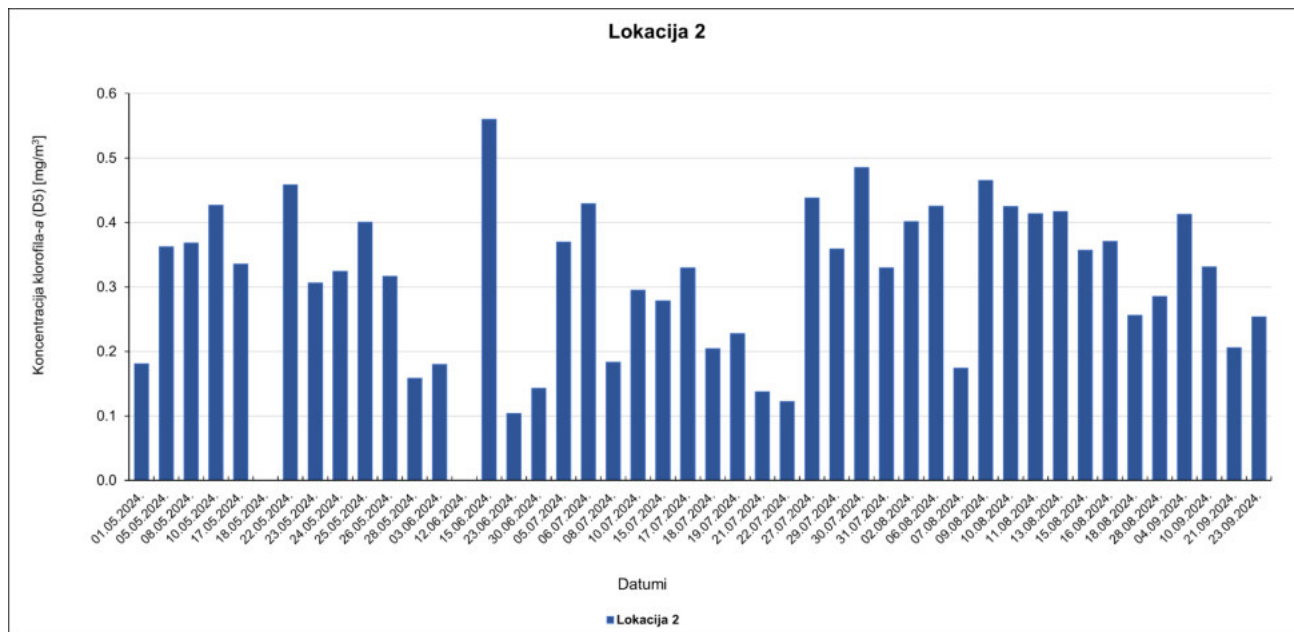
Slika 8. Grafički prikaz prostorne i vremenske distribucije koncentracije klorofila-a po virtualnim mjernim postajama (svibanj – rujan 2024.)

Detaljna analiza koncentracije klorofila-a po virtualnim postajama

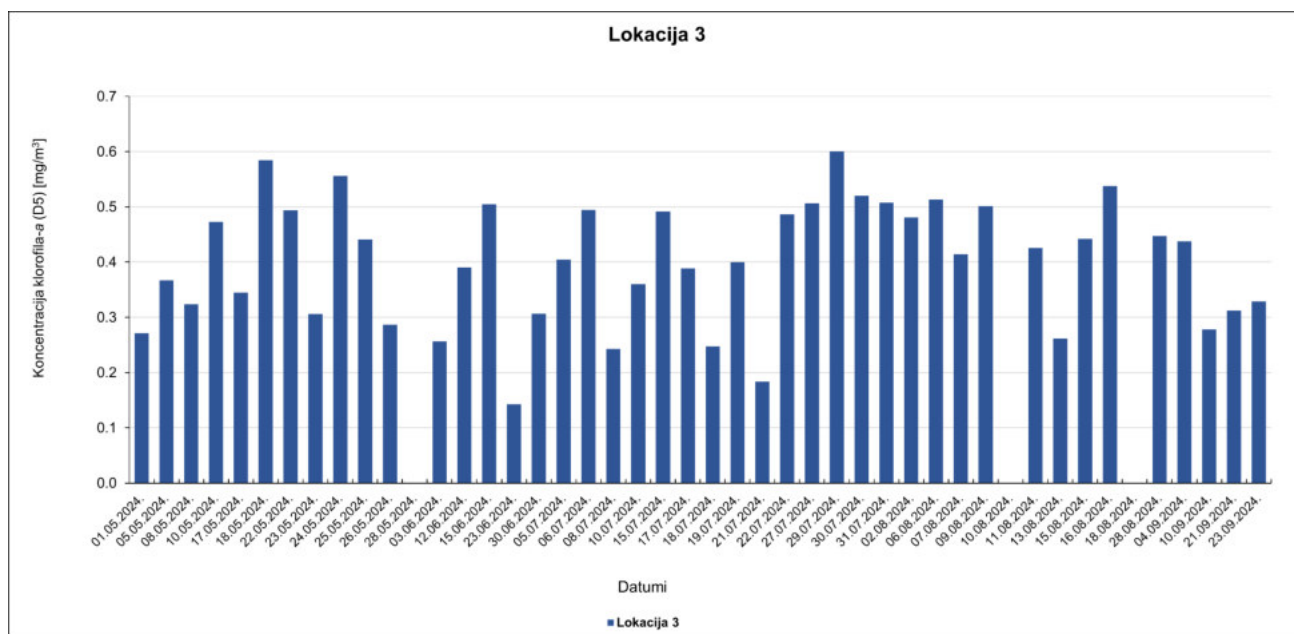
U nastavku su prikazani stupčasti grafovi koncentracije klorofila-a za svaku pojedinu virtualnu mjernu postaju, raspoređeni po mjesecima. Ovakav prikaz omogućuje bolji uvid u dinamiku promjena unutar svake lokacije i lokalnih razlika.



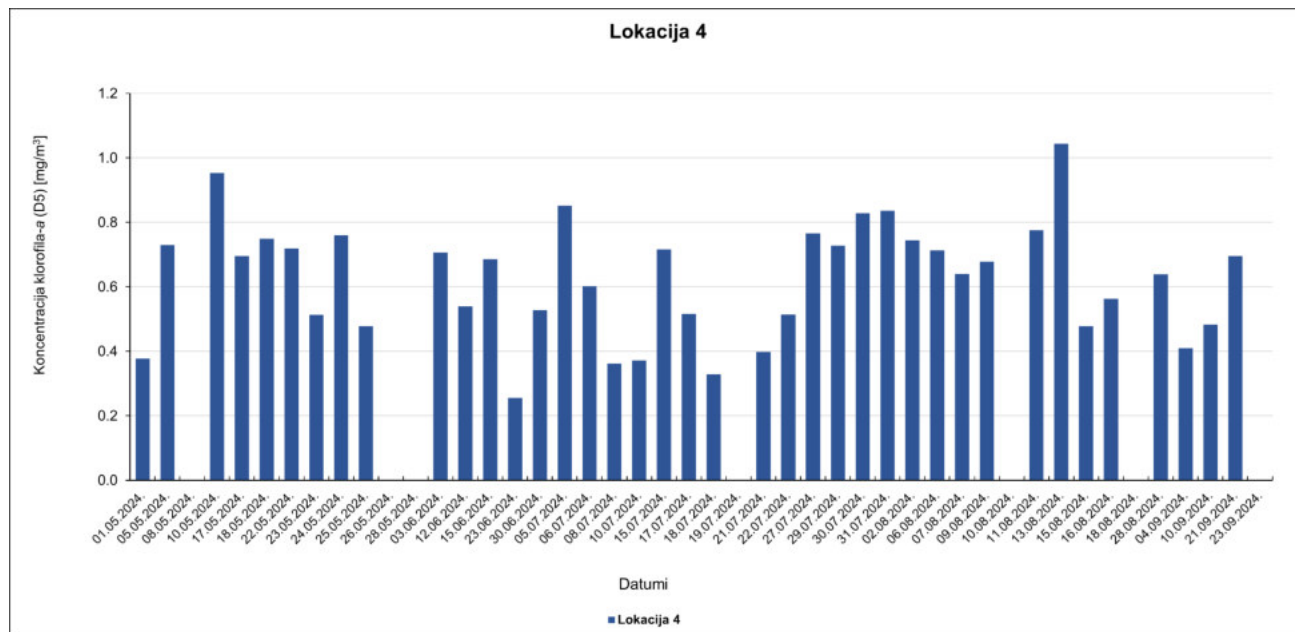
Slika 9. Grafički prikaz promjene koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 (svibanj – rujanj 2024.)



Slika 10. Grafički prikaz promjene koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 (svibanj – rujan 2024.)



Slika 11. Grafički prikaz promjene koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 (svibanj – rujan 2024.)



Slika 12. Grafički prikaz promjene koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 (svibanj – rujan 2024.)

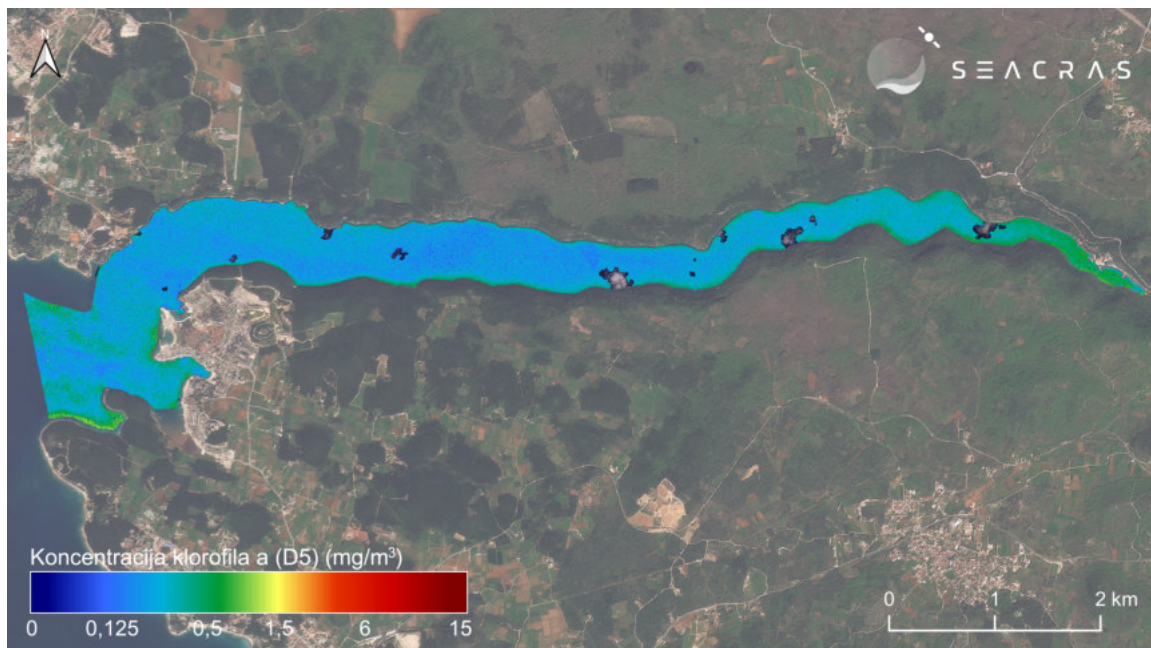
Vizualizacija prostorne raspodjele klorofila-*a* za odabrane datume

Kao vizualni prikaz sezonske raspodjele, prikazane su tematske karte koncentracije klorofila-*a* za po jedan reprezentativan datum u svibnju, lipnju, kolovozu i rujnu. Datumi su odabrani na temelju kvalitete dostupnih satelitskih snimki i karakterističnih vrijednosti zabilježenih u analiziranom razdoblju.

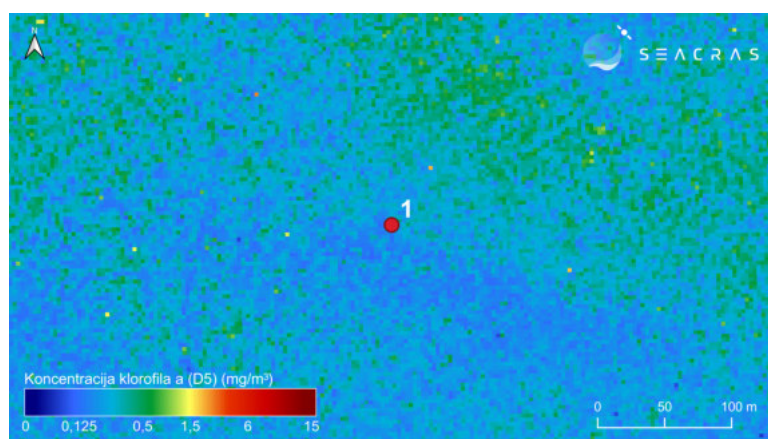
Datum: 05.05.2024.



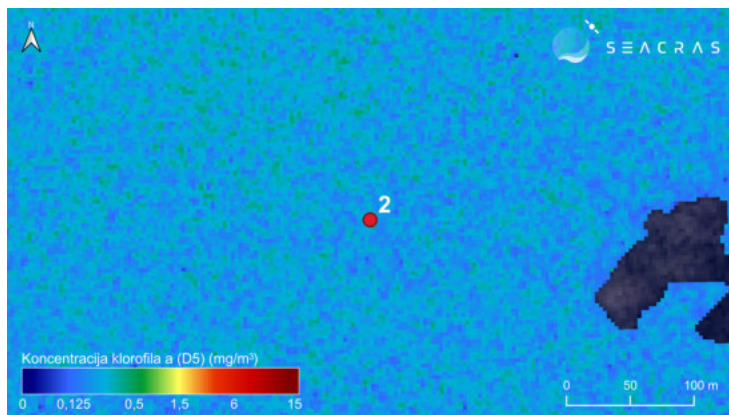
Slika 13. RGB prikaz satelitske snimke Limskog zaljeva – 5. svibnja 2024.



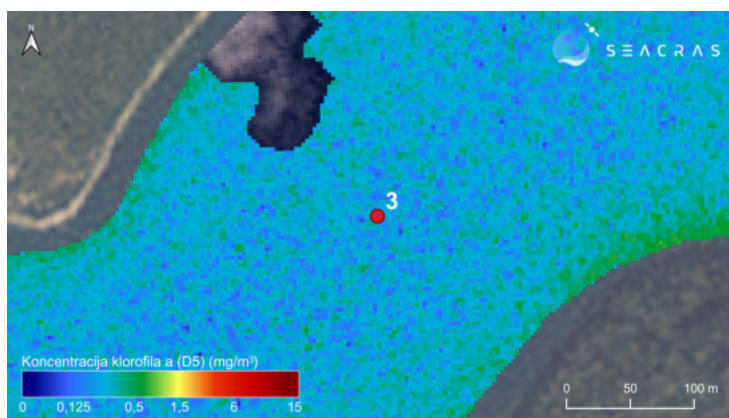
Slika 14. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na promatranom području Limskog zaljeva – 5. svibnja 2024.



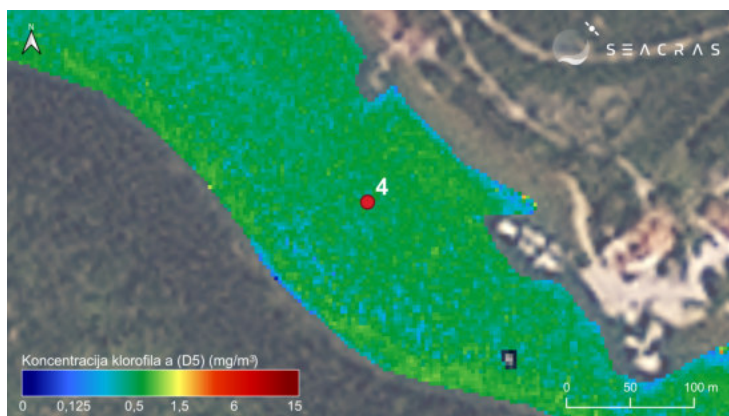
Slika 15. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.



Slika 16. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.



Slika 17. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.

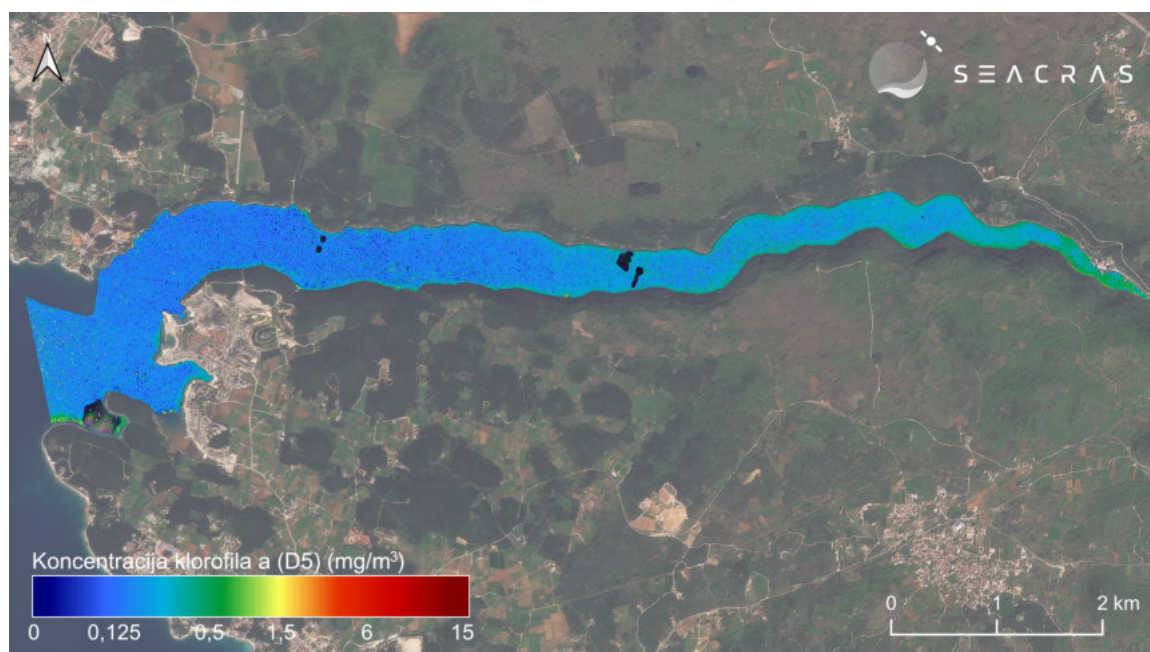


Slika 18. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.

Datum: 30.06.2024.

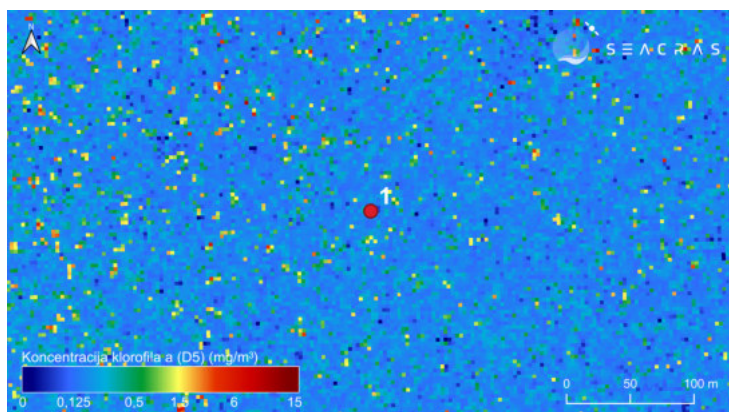


Slika 19. RGB prikaz satelitske snimke Limskog zaljeva – 30. lipnja 2024.

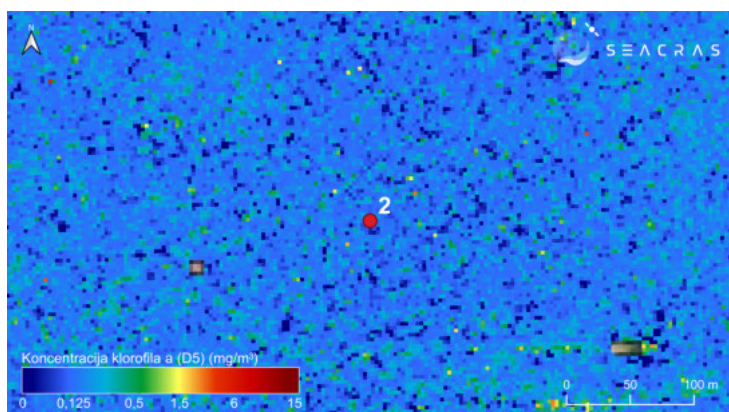


Slika 20. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na 30. lipnja 2024.

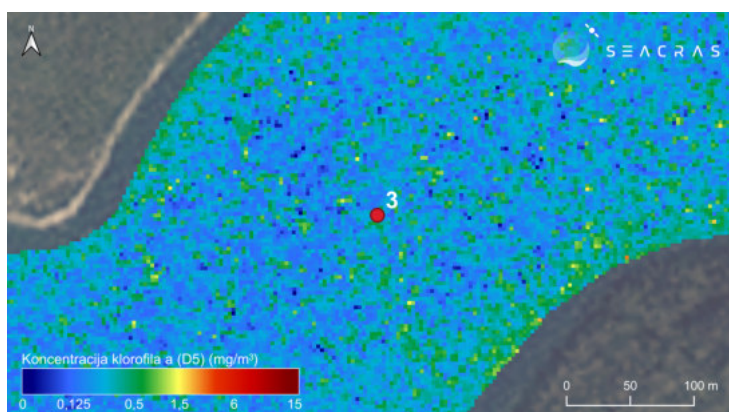
promatranom području Limskog zaljeva – 30. lipnja 2024.



Slika 21. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

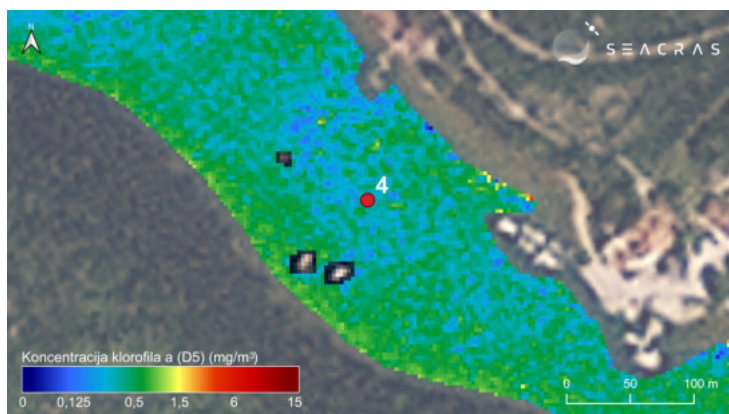


Slika 22. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.



Slika 23. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

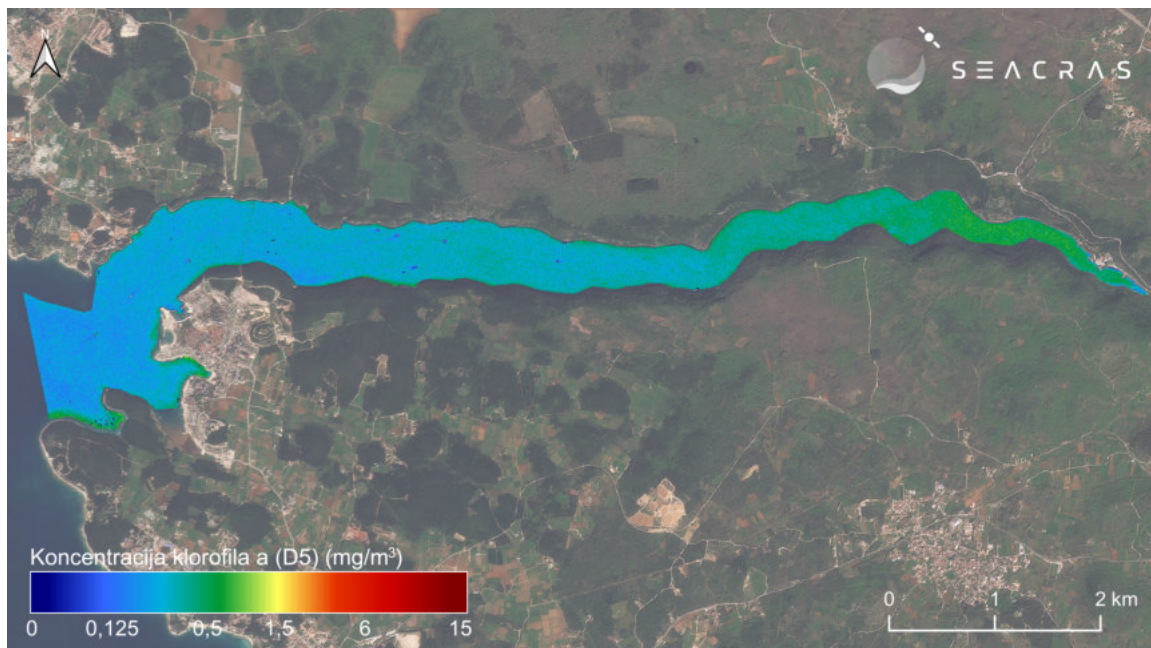


Slika 24. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

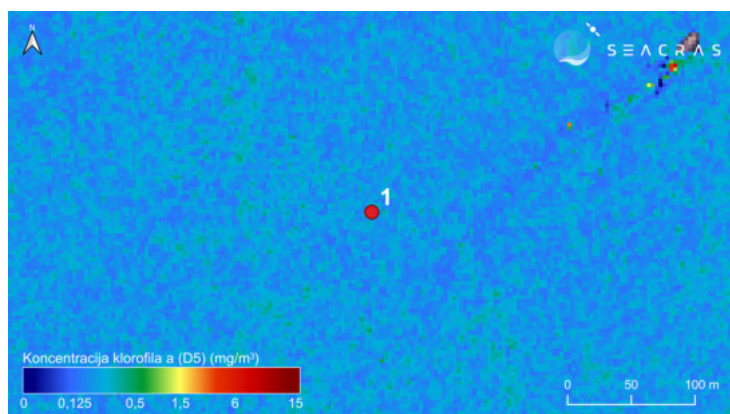
Datum: 27.07.2024.



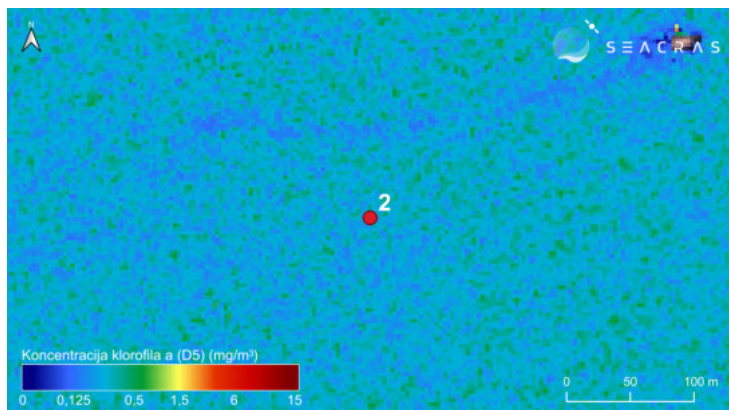
Slika 25. RGB prikaz satelitske snimke Limskog zaljeva – 27. srpnja 2024.



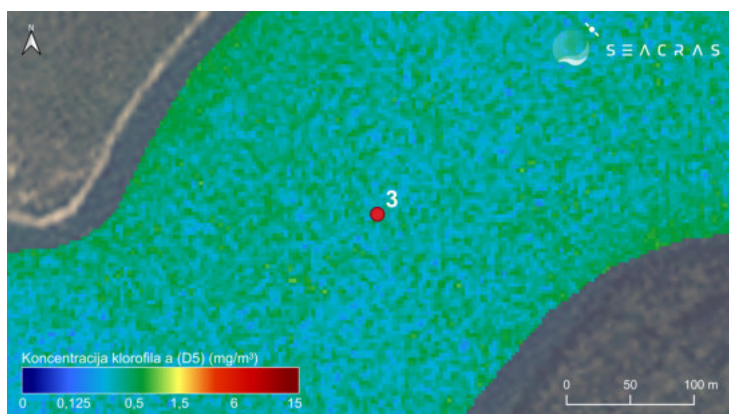
Slika 26. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na promatranom području Limskog zaljeva – 27. srpnja 2024.



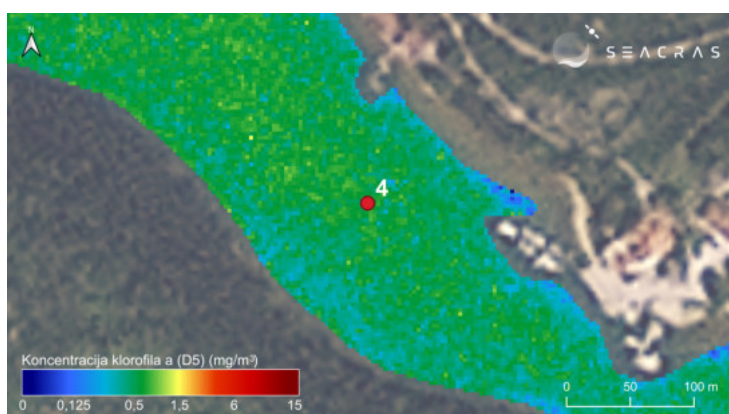
Slika 27. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.



Slika 28. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.



Slika 29. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.

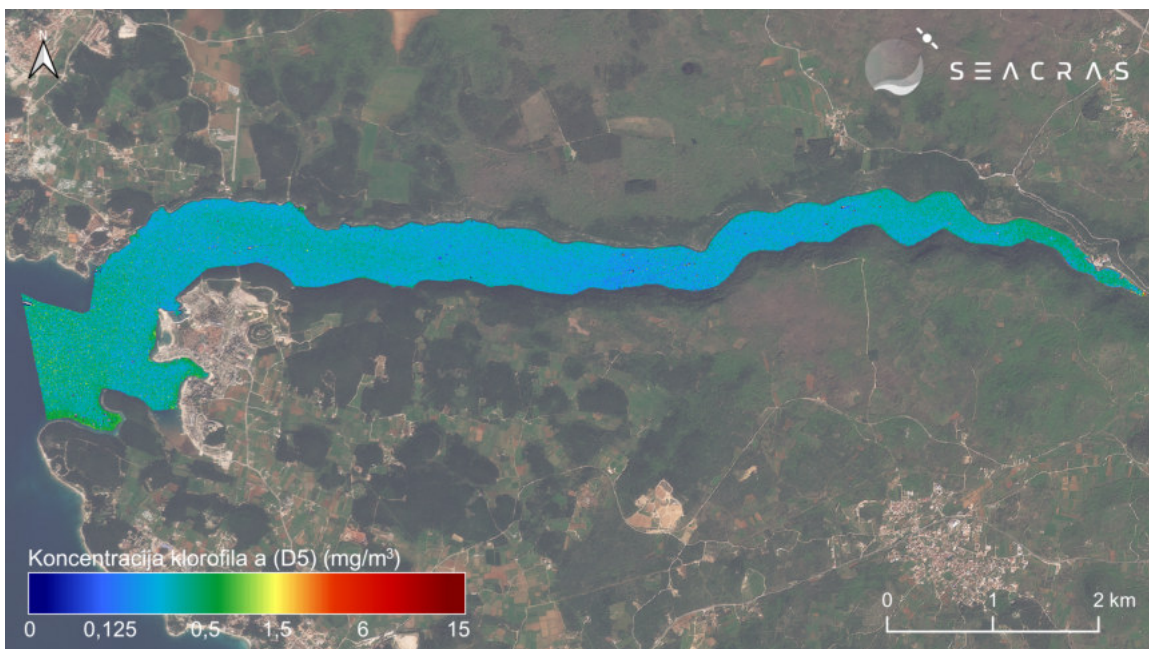


Slika 30. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.

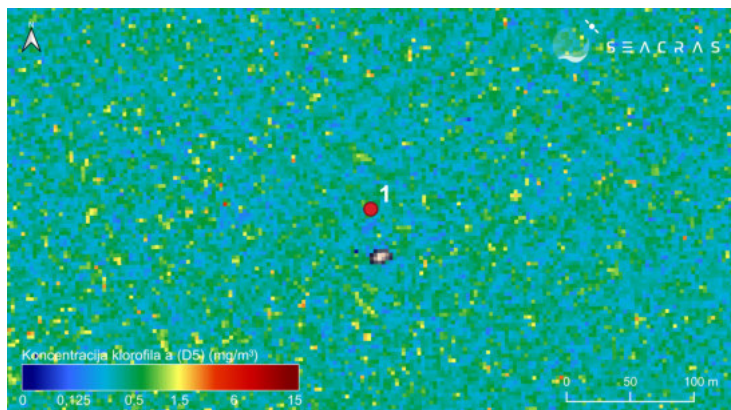
Datum: 14.08.2024.



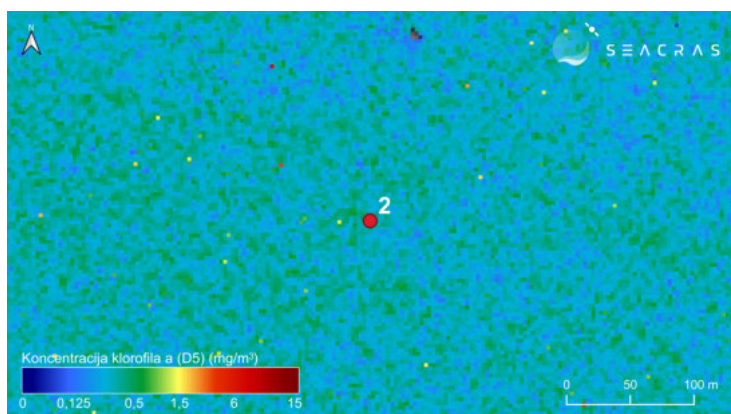
Slika 31. RGB prikaz satelitske snimke Limskog zaljeva – 14. kolovoza 2024.



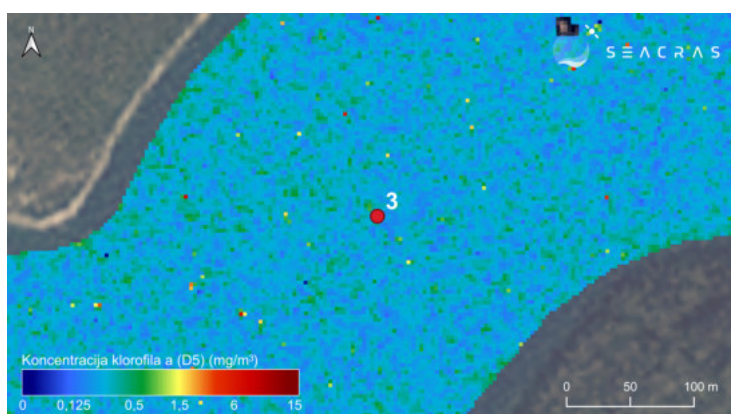
Slika 32. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na promatranom području Limskog zaljeva – 14. kolovoza 2024.



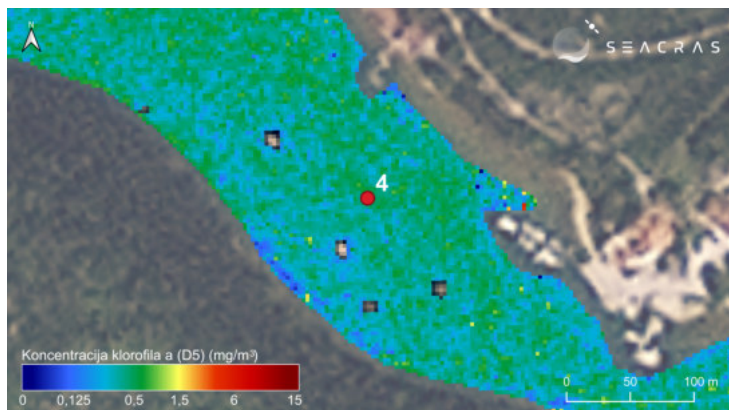
Slika 33. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.



Slika 34. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.



Slika 35. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.

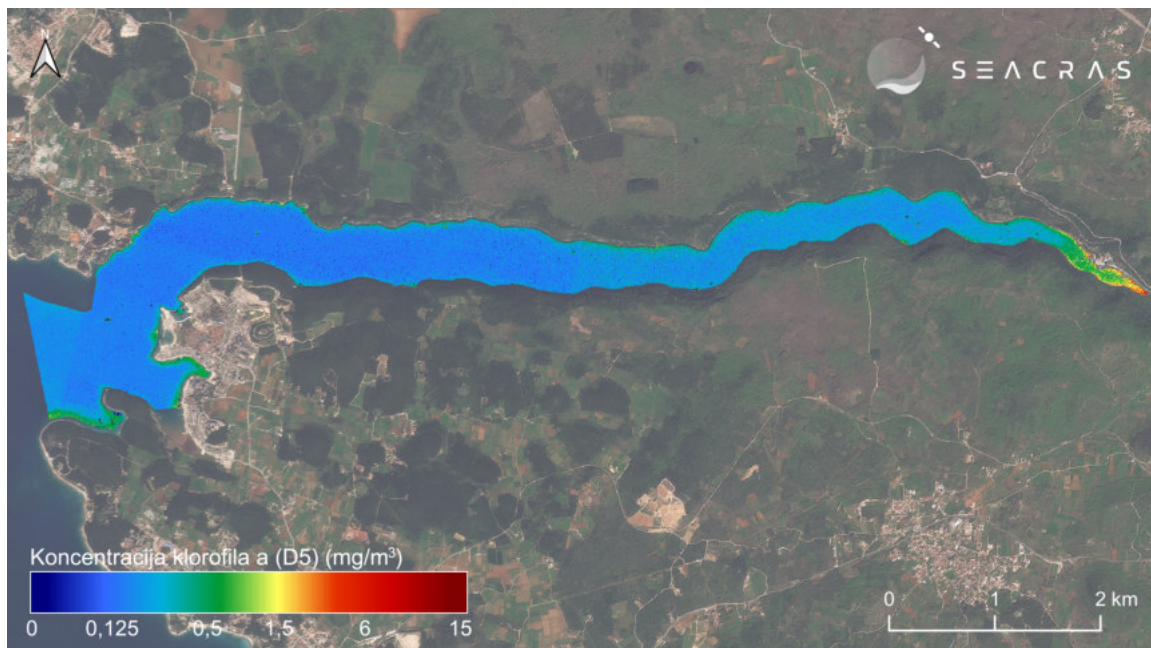


Slika 36. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.

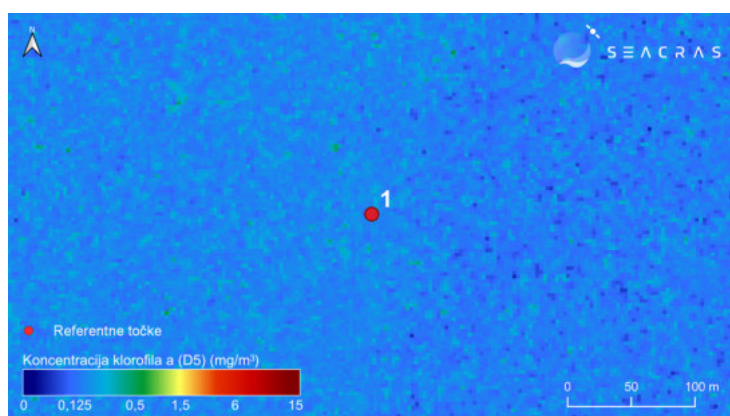
Datum: 21.9.2024.



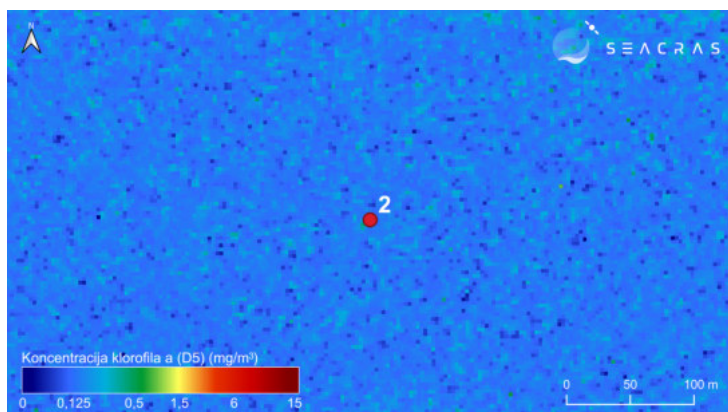
Slika 37. RGB prikaz satelitske snimke Limskog zaljeva – 21. rujna 2024.



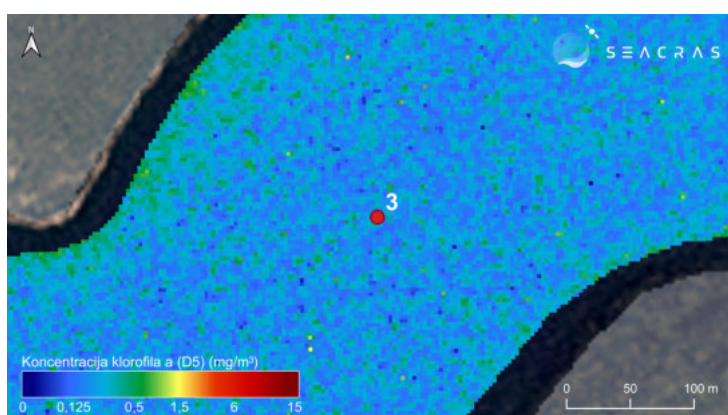
Slika 38. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na promatranom području Limskog zaljeva – 21. rujna 2024.



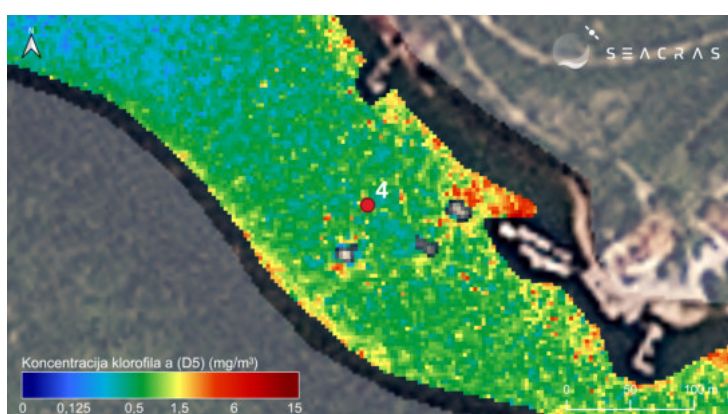
Slika 39. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 40. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 41. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 42. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.

Analiza koncentracije klorofila-a u razdoblju od 1. svibnja do 30. rujna 2024. godine pokazala je izraženu sezonsku i prostornu varijabilnost unutar Limskog zaljeva. Najviše vrijednosti zabilježene su u zatvorenijim dijelovima akvatorija (Lokacije 3 i 4), osobito tijekom svibnja i lipnja, kada su i meteorološki uvjeti – prvenstveno obilnije oborine – mogli doprinijeti pojačanom unosu hranjivih tvari.

Unatoč očekivanom gradijentu otvorenost–zatvorenost, povremeno su i postaje smještene bliže otvorenom moru (lokacija 1) bilježile povišene koncentracije, čak više od unutarnjih postaja. Ta pojava ukazuje na utjecaj lokalnih procesa poput morskih strujanja, kratkotrajnih intruzija ili disperzije tvari, što dodatno potvrđuje kompleksnost eutrofikacijskih uzoraka u prostoru.

Opažena prostorna dinamika potvrđuje potrebu za učestalim, prostorno raznolikim praćenjem, osobito u zatvorenim dijelovima zaljeva gdje su ekološke promjene izraženije, ali i u otvorenijim zonama gdje epizodni događaji mogu odstupati od očekivanih trendova.

Praćenje koncentracije ukupne suspendirane tvari (deskriptor D7)

U sklopu satelitskog monitoringa provedena je analiza koncentracije ukupne suspendirane tvari, kao indikatora promjena u hidrografskim uvjetima prema deskriptoru D7. Ovaj parametar obuhvaća čestice organskog i anorganskog podrijetla prisutne u vodenom stupcu, a povećane vrijednosti mogu upućivati na utjecaj antropogenih aktivnosti, resuspenziju sedimenta, riječnu inputaciju ili biološke procese.

U tablici 3 prikazane su srednje dnevne vrijednosti koncentracije ukupne suspendirane tvari za četiri virtualne mjerne postaje u dane kada su satelitske snimke zadovoljile kriterije kvalitete i ušle u analizu. Prikaz omogućuje uvid u prostornu i sezonsku dinamiku suspendiranih tvari u razdoblju od svibnja do rujna 2024., uzimajući u obzir različite stupnjeve zatvorenosti akvatorija.

Tablica 3. Koncentracija ukupne suspendirane tvari (g/m^3) po virtualnim mjernim postajama za analizirane datume u Lirskom zaljevu

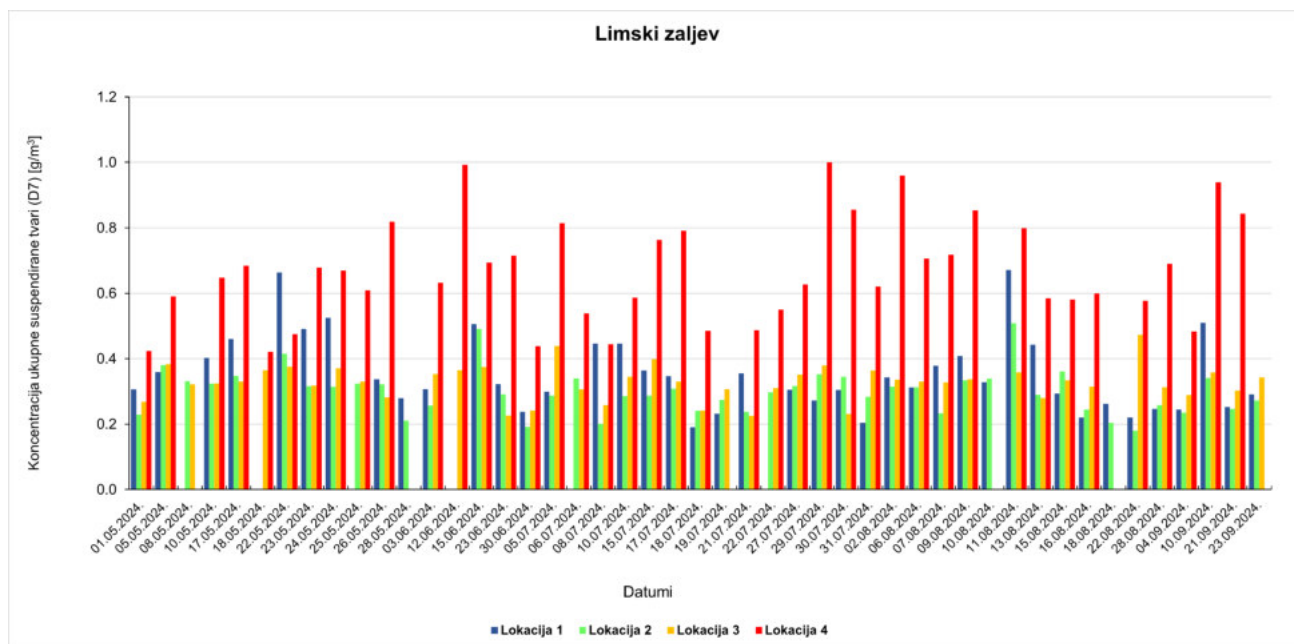
Datum	Lokacija 1	Lokacija 2	Lokacija 3	Lokacija 4
01.05.2024.	0,31	0,23	0,27	0,42
05.05.2024.	0,36	0,38	0,38	0,59
08.05.2024.	/*	0,33	0,32	/*
10.05.2024.	0,40	0,32	0,32	0,65
17.05.2024.	0,46	0,35	0,33	0,68
18.05.2024.	/	/	0,37	0,42
22.05.2024.	0,66	0,42	0,38	0,48
23.05.2024.	0,49	0,32	0,32	0,68
24.05.2024.	0,53	0,31	0,37	0,67
25.05.2024.	/*	0,32	0,33	0,61
26.05.2024.	0,34	0,32	0,28	0,82
28.05.2024.	0,28	0,21	/*	/*

03.06.2024.	0,31	0,26	0,35	0,63
12.06.2024.	/*	/*	0,37	0,99
15.06.2024.	0,51	0,49	0,37	0,69
23.06.2024.	0,32	0,29	0,23	0,71
30.06.2024.	0,24	0,19	0,24	0,44
05.07.2024.	0,30	0,29	0,44	0,81
06.07.2024.	/*	0,34	0,31	0,54
08.07.2024.	0,45	0,20	0,26	0,44
10.07.2024.	0,45	0,29	0,34	0,59
15.07.2024.	0,36	0,29	0,40	0,76
17.07.2024.	0,35	0,31	0,33	0,79
18.07.2024.	0,19	0,24	0,24	0,48
19.07.2024.	0,23	0,27	0,31	/*
21.07.2024.	0,36	0,24	0,23	0,49
22.07.2024.	/*	0,30	0,31	0,55
27.07.2024.	0,31	0,32	0,35	0,63
29.07.2024.	0,27	0,35	0,38	1,00
30.07.2024.	0,30	0,34	0,23	0,86
31.07.2024.	0,20	0,28	0,36	0,62
02.08.2024.	0,34	0,31	0,34	0,96
06.08.2024.	0,31	0,31	0,33	0,71
07.08.2024.	0,38	0,23	0,33	0,72
09.08.2024.	0,41	0,33	0,34	0,85
10.08.2024.	0,33	0,34	/*	/*
11.08.2024.	0,67	0,51	0,36	0,80
13.08.2024.	0,44	0,29	0,28	0,58
15.08.2024.	0,29	0,36	0,33	0,58
16.08.2024.	0,22	0,24	0,31	0,60
18.08.2024.	0,26	0,20	/*	/*
28.08.2024.	0,25	0,26	0,31	0,69
04.09.2024.	0,24	0,24	0,29	0,48

10.09.2024.	0,51	0,34	0,36	0,94
21.09.2024.	0,25	0,25	0,30	0,84
23.09.2024.	0,29	0,27	0,34	/*

*Nema podataka zbog nepovoljnih atmosferskih uvjeta nad promatranim područjem u trenutku prolaska satelita

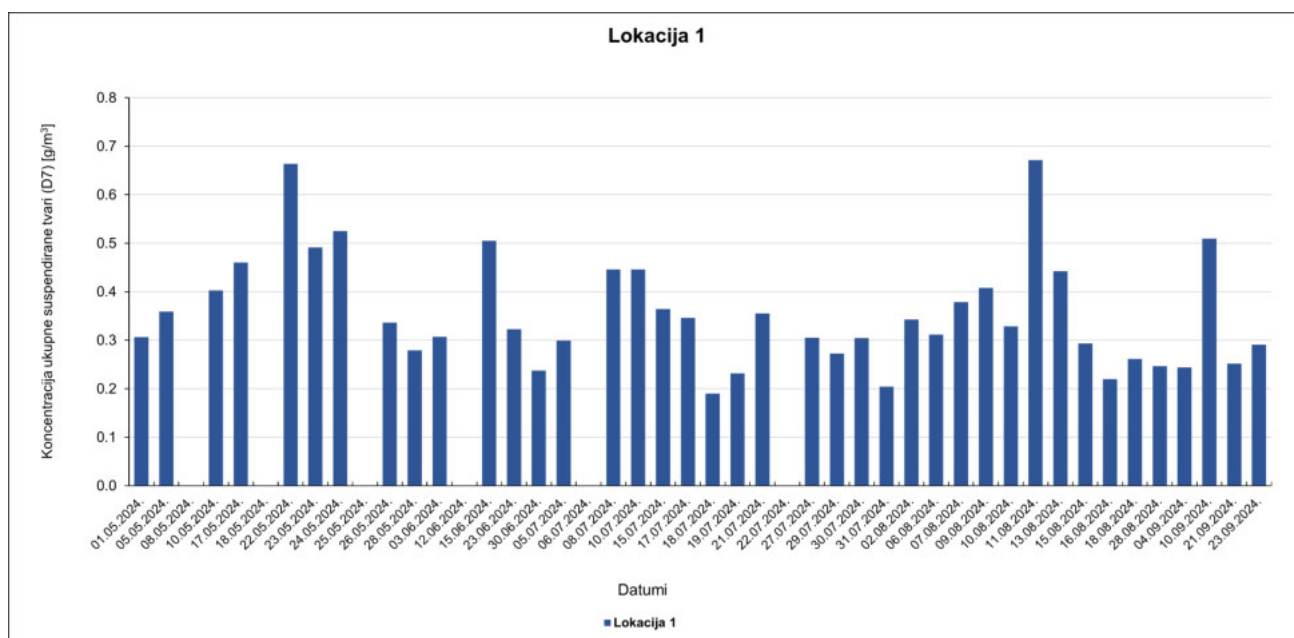
Stupčasti prikaz koncentracije ukupne suspendirane tvari po virtualnim mjernim postajama (slika 43) omogućuje pregled prostorne i vremenske dinamike tog parametra tijekom razdoblja od svibnja do rujna 2024. godine. Prikaz olakšava usporedbu između različitih lokacija i identifikaciju razdoblja povećanih vrijednosti.



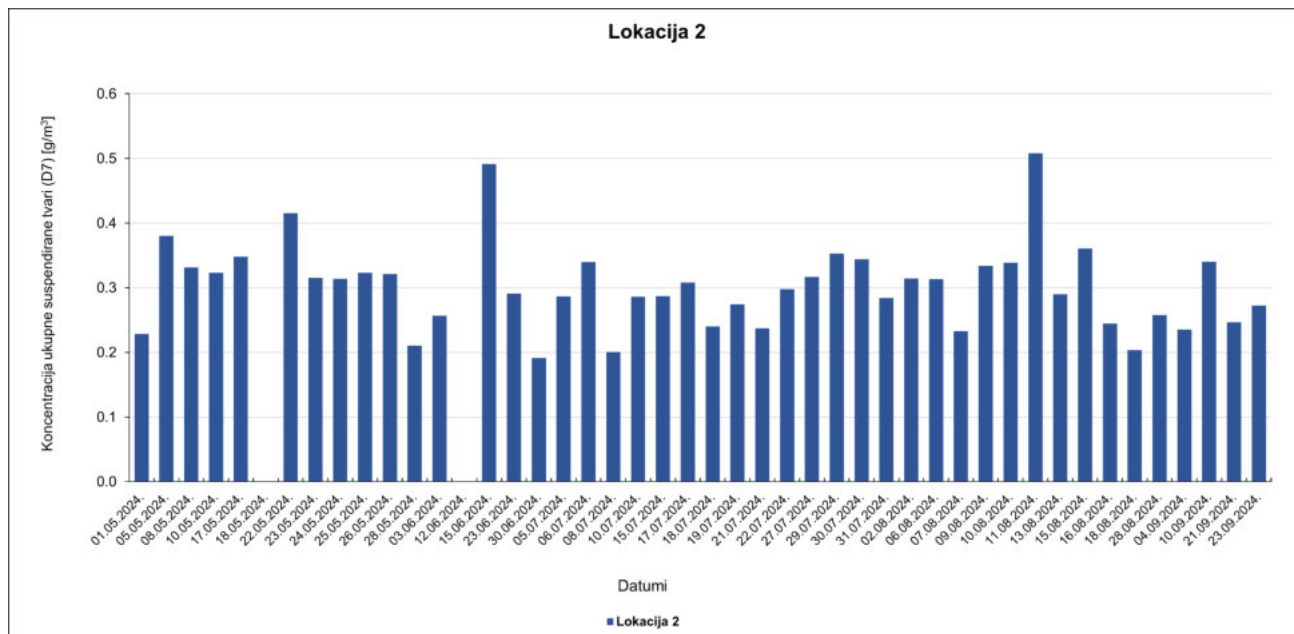
Slika 43. Grafički prikaz prostorne i vremenske distribucije koncentracije ukupne suspendirane tvari po virtualnim mjernim postajama (svibanj – rujna 2024.)

Detaljna analiza koncentracije ukupne suspendirane tvari po postajama

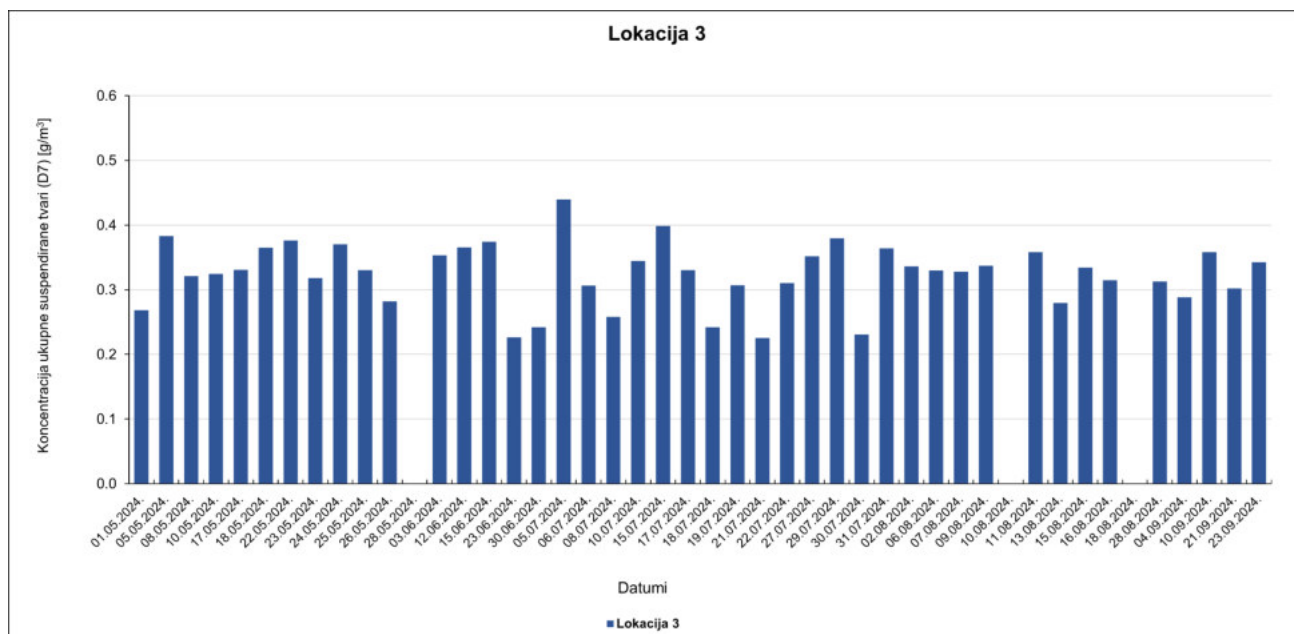
U nastavku su prikazani stupčasti grafovi koncentracije ukupne suspendirane tvari za svaku pojedinu virtualnu mjernu postaju, raspoređeni po mjesecima. Ovakav prikaz omogućuje bolji uvid u dinamiku promjena na svakoj lokaciji, kao i u prostorne razlike unutar promatranog akvatorija.



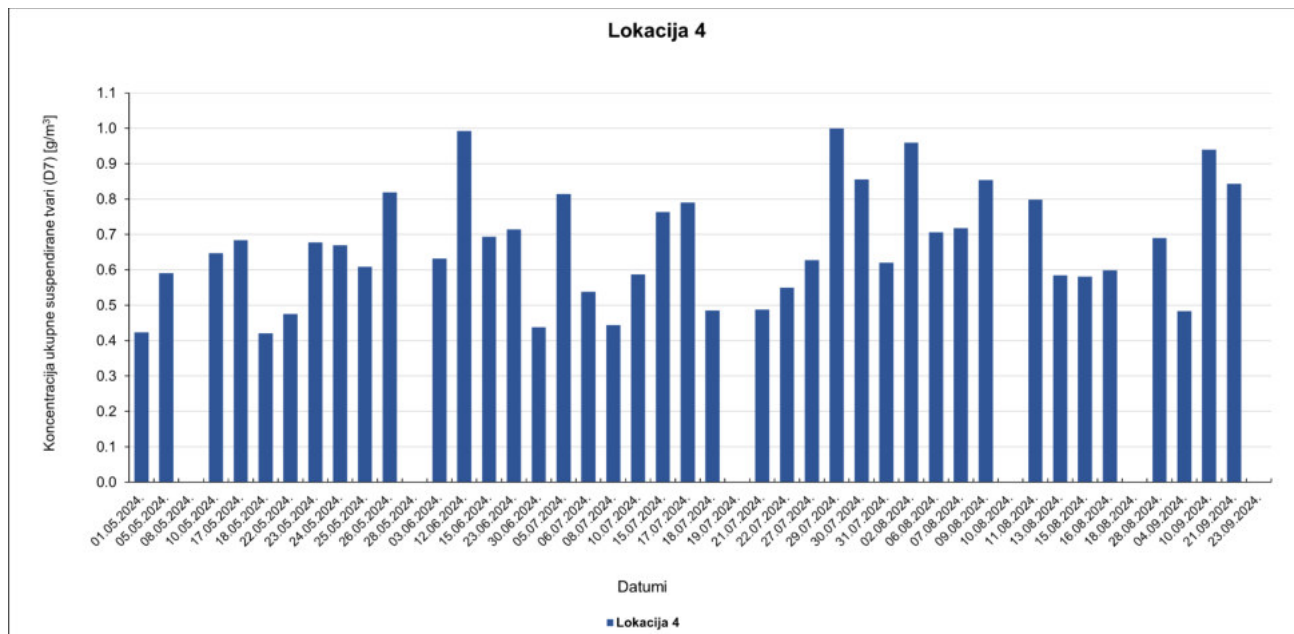
Slika 44. Grafički prikaz promjene koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 (svibanj – rujan 2024.)



Slika 45. Grafički prikaz promjene koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 (svibanj – rujan 2024.)



Slika 46. Grafički prikaz promjene koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 (svibanj – rujan 2024.)

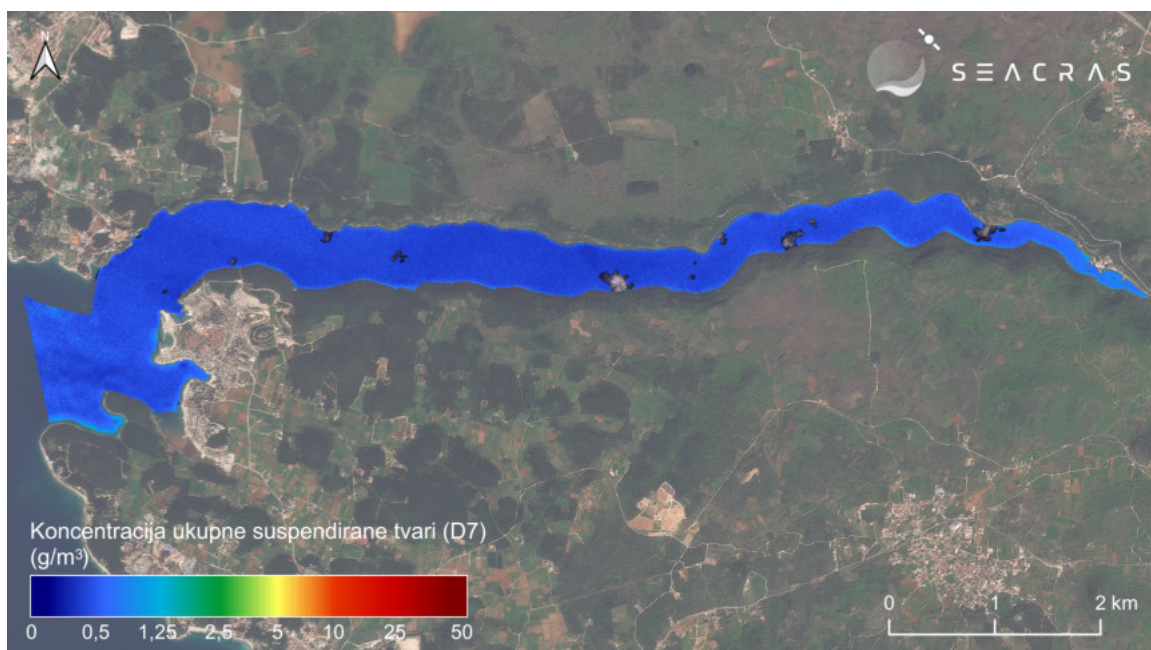


Slika 47. Grafički prikaz promjene koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 (svibanj – rujan 2024.)

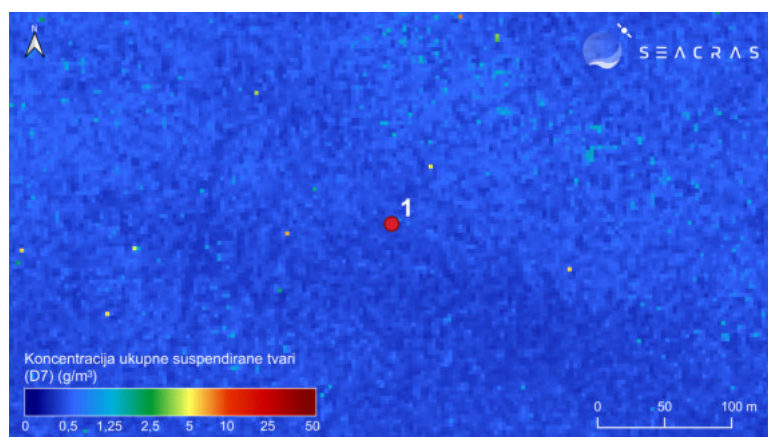
Vizualizacija prostorne raspodjele ukupne suspendirane tvari za odabrane datume

Kao vizualni prikaz sezonske raspodjele, prikazane su tematske karte koncentracije ukupne suspendirane tvari za po jedan reprezentativan datum u svibnju, lipnju, kolovozu i rujnu. Odabrani datumi temelje se na kvaliteti dostupnih satelitskih snimki te na karakterističnim vrijednostima zabilježenima u analiziranom razdoblju.

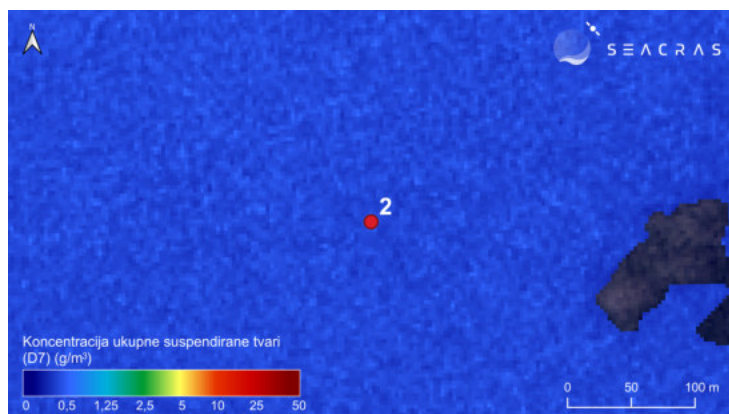
Datum: 05.05.2024.



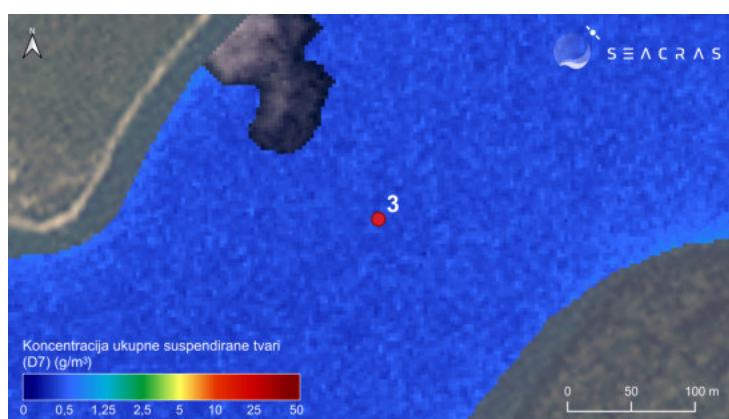
Slika 48. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na promatranom području Limskog zaljeva – 5. svibnja 2024.



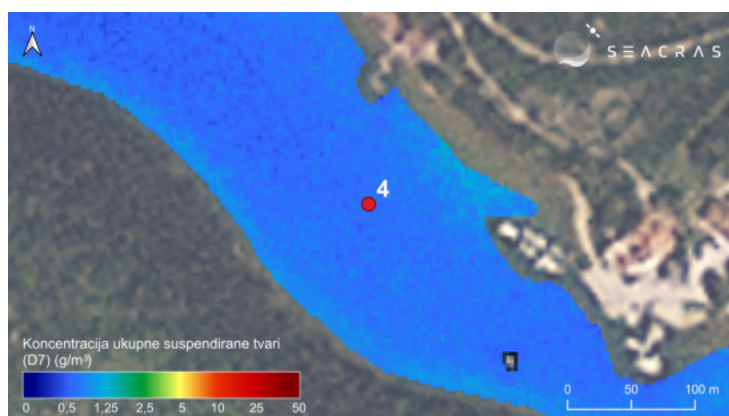
Slika 49. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.



Slika 50. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.

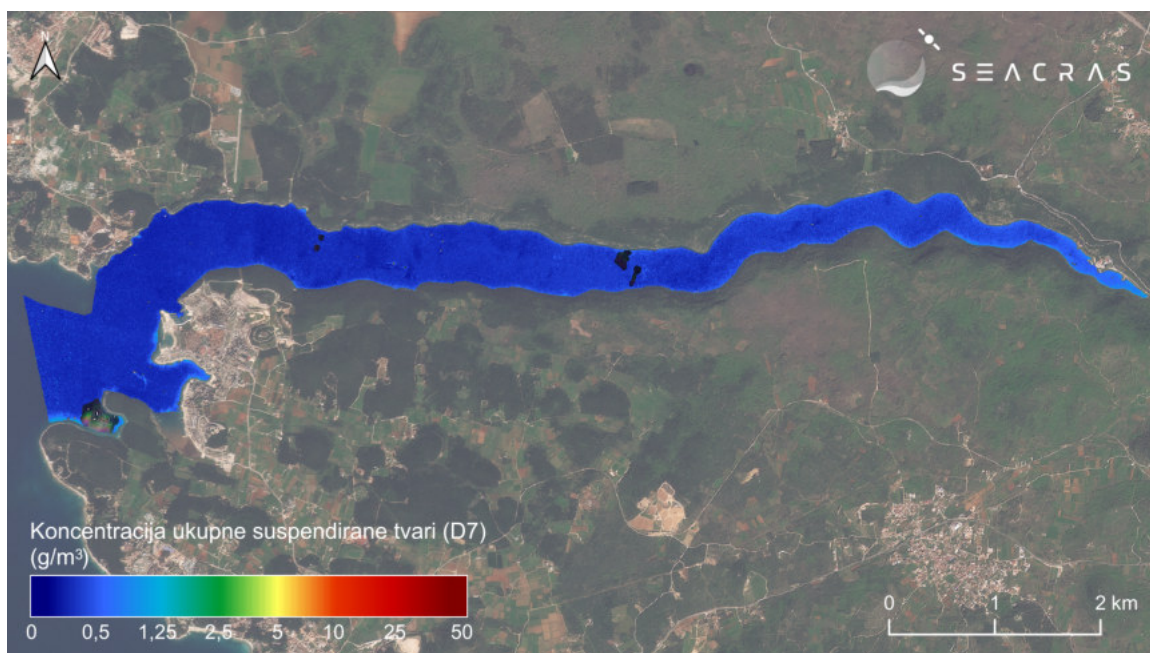


Slika 51. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.

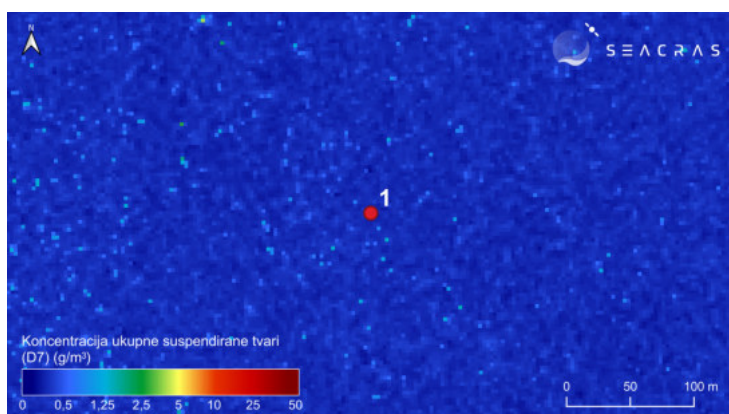


Slika 52. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 5. svibnja 2024.

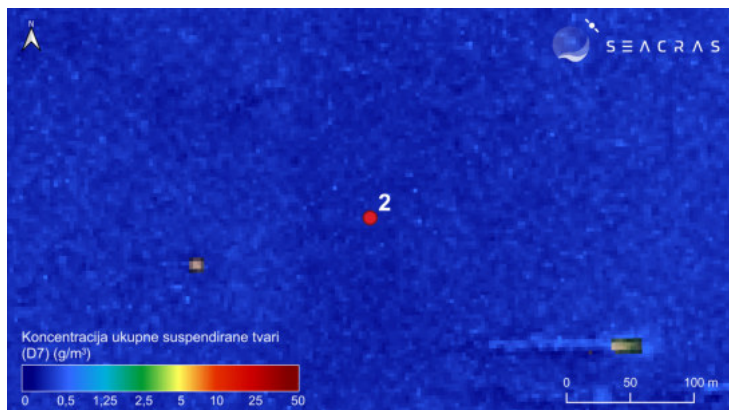
Datum: 30.06.2024.



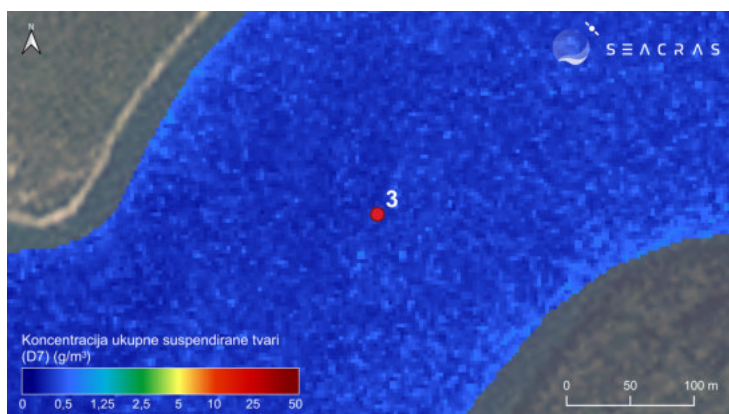
Slika 53. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na promatranom području Limskog zaljeva – 30. lipnja 2024.



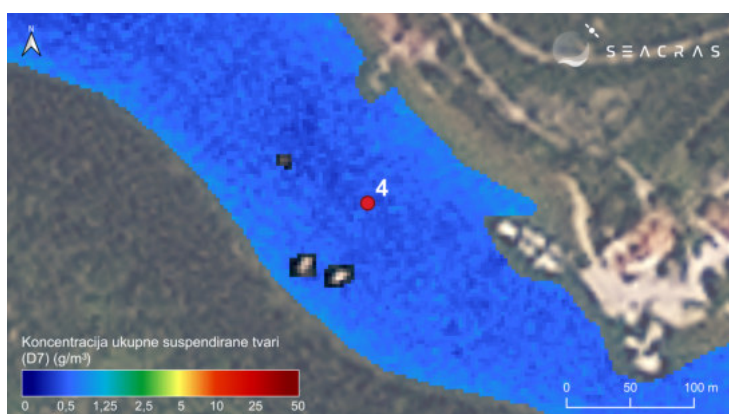
Slika 54. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.



Slika 55. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

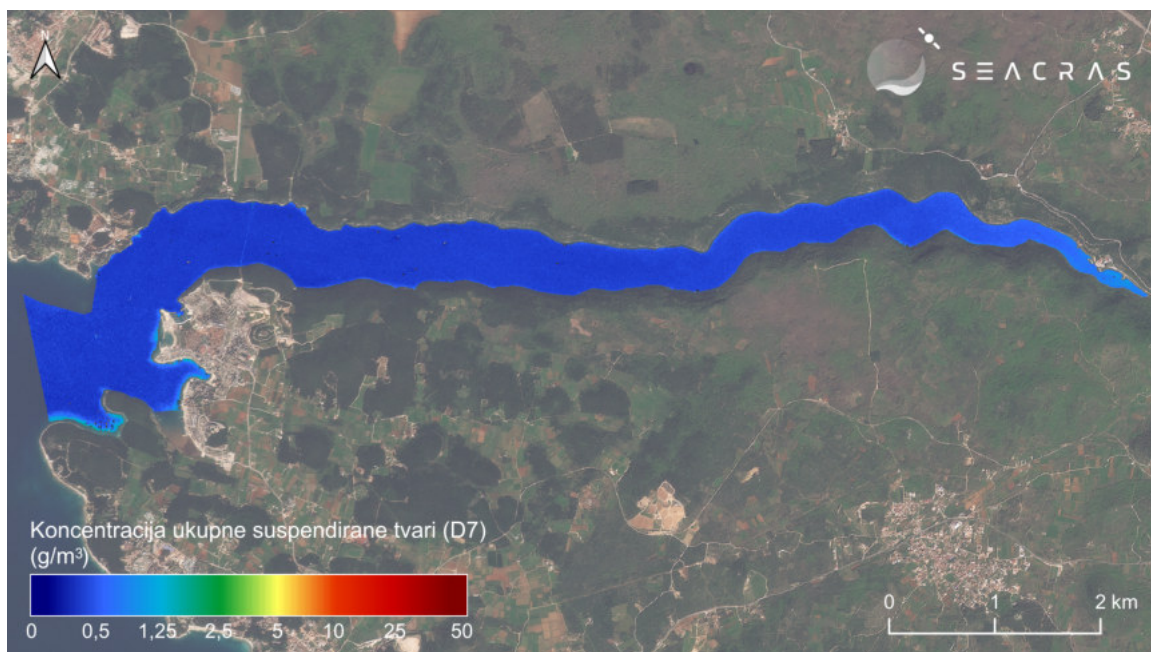


Slika 56. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

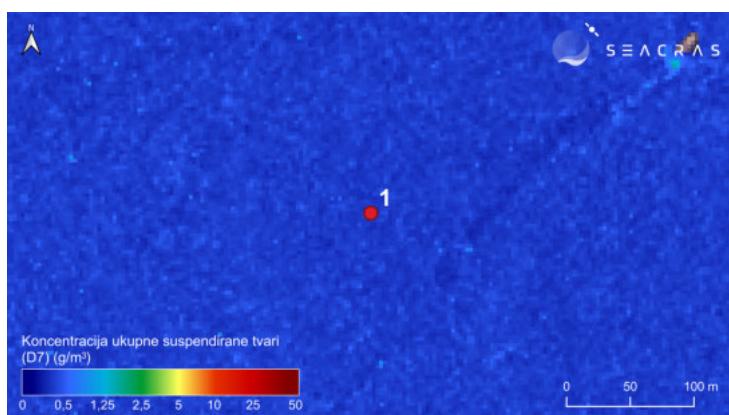


Slika 57. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 30. lipnja 2024.

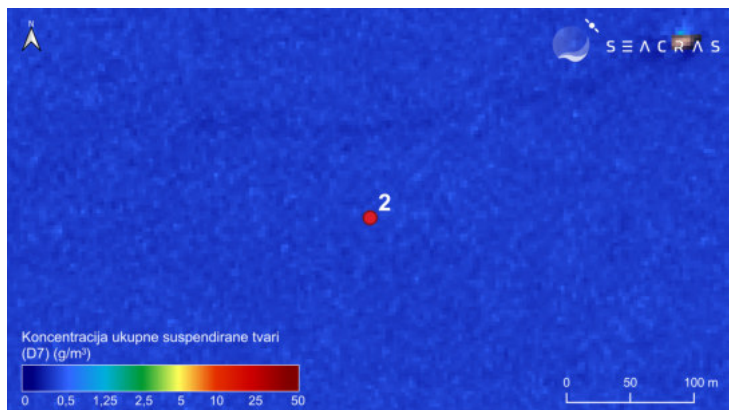
Datum: 27.07.2024.



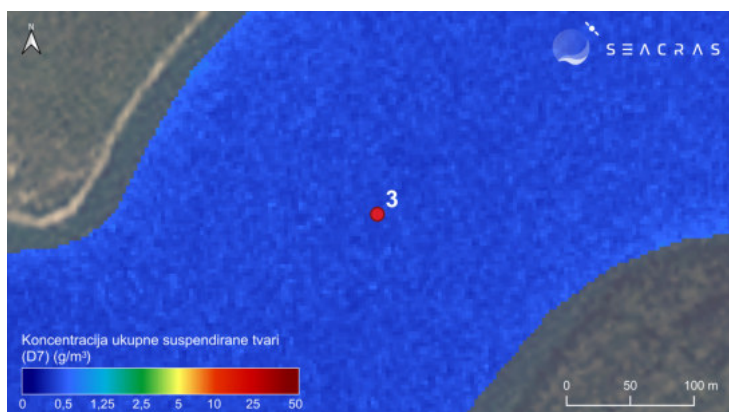
Slika 58. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na promatranom području Limskog zaljeva – 27. srpnja 2024.



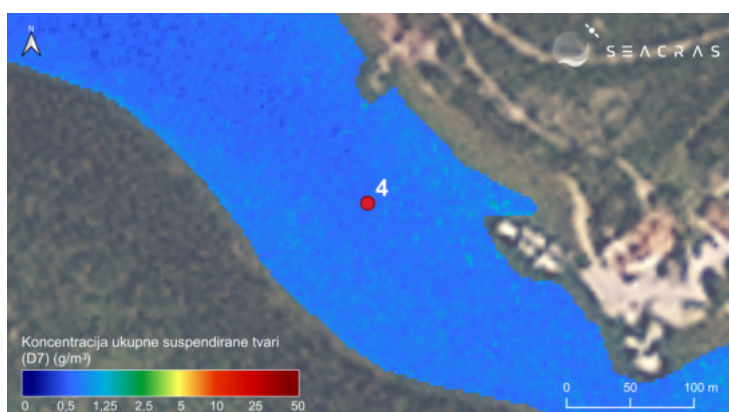
Slika 59. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.



Slika 60. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.

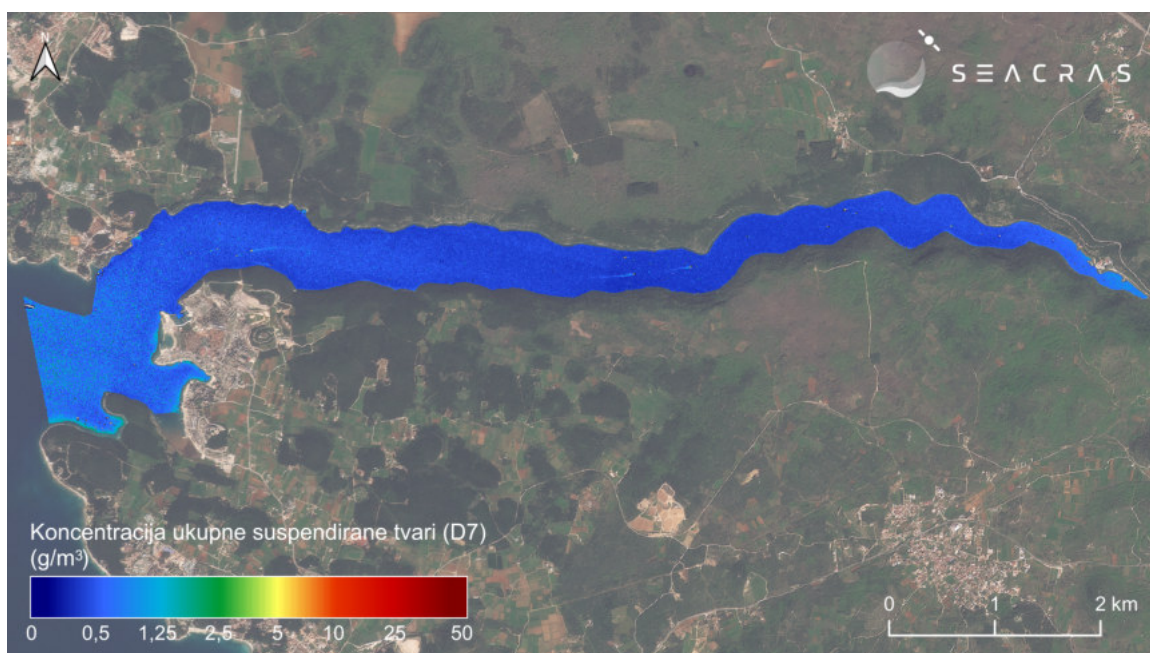


Slika 61. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.

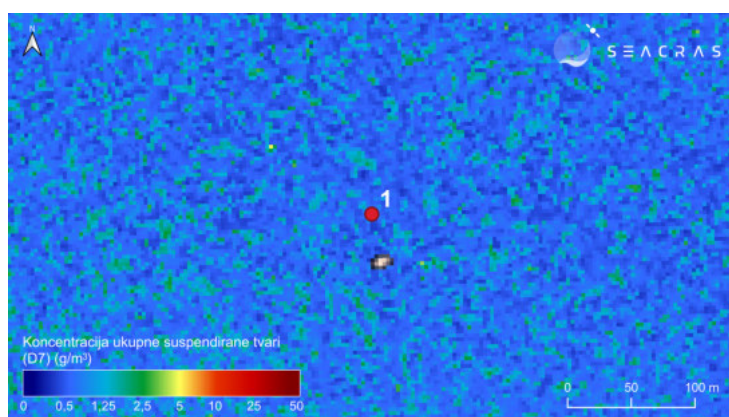


Slika 62. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 27. srpnja 2024.

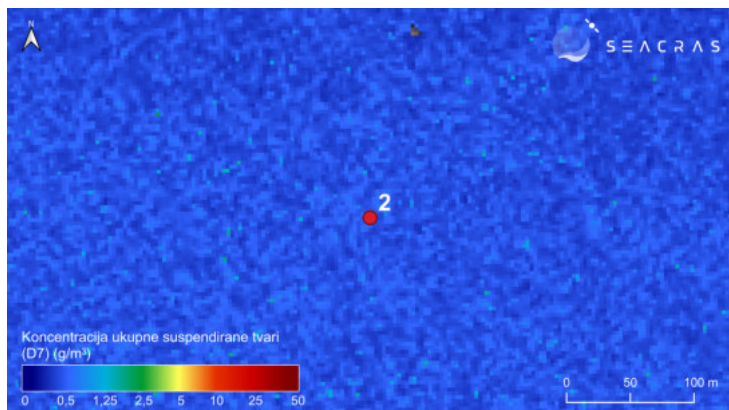
Datum: 14.08.2024.



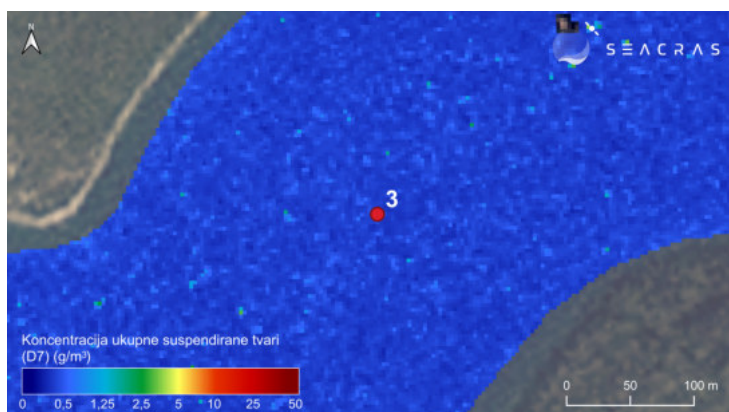
Slika 63. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na promatranom području Limskog zaljeva – 14. kolovoza 2024.



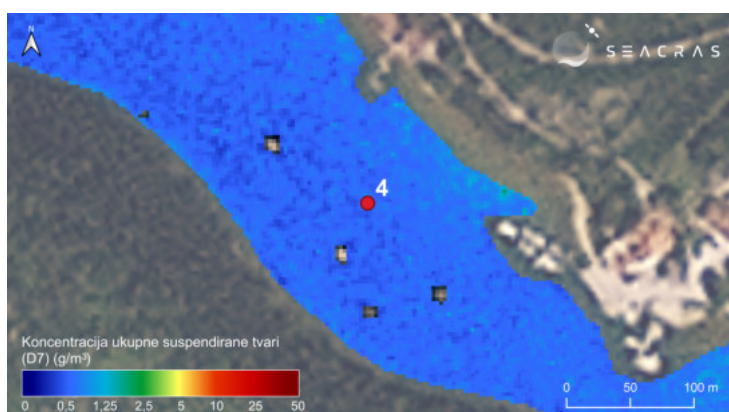
Slika 64. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.



Slika 65. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.

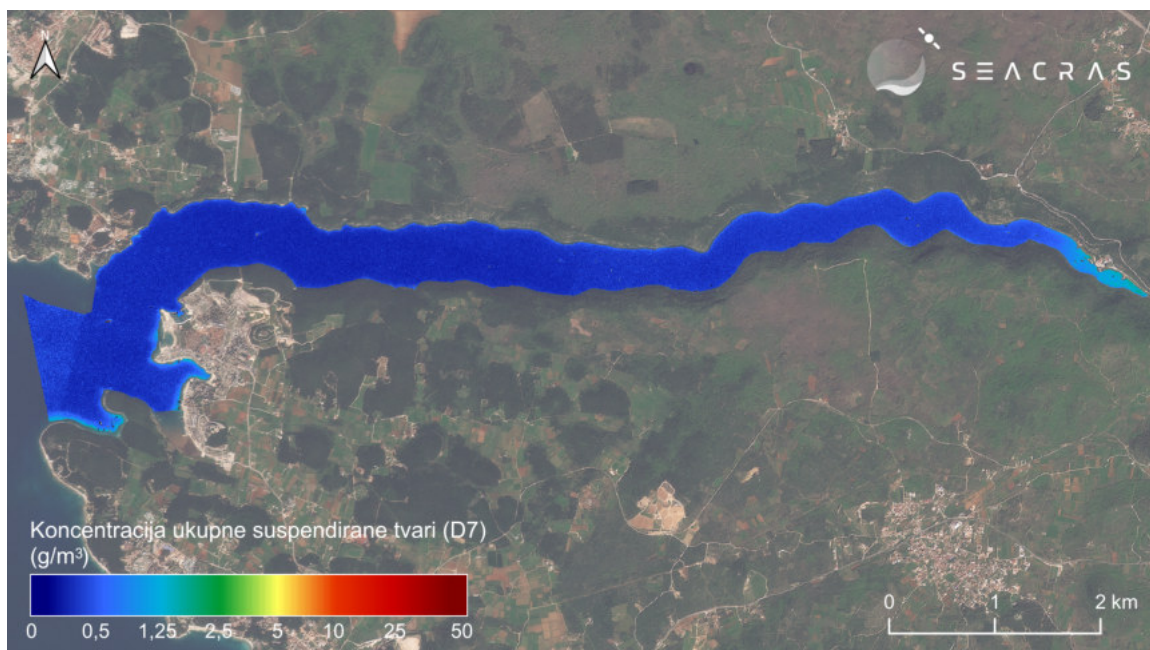


Slika 66. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.

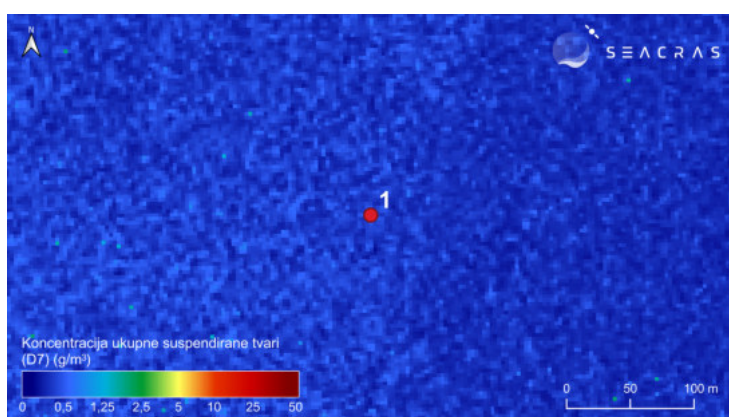


Slika 67. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 14. kolovoza 2024.

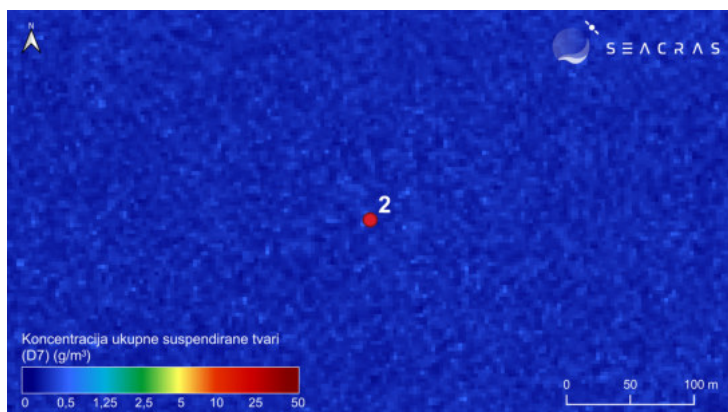
Datum: 21.9.2024.



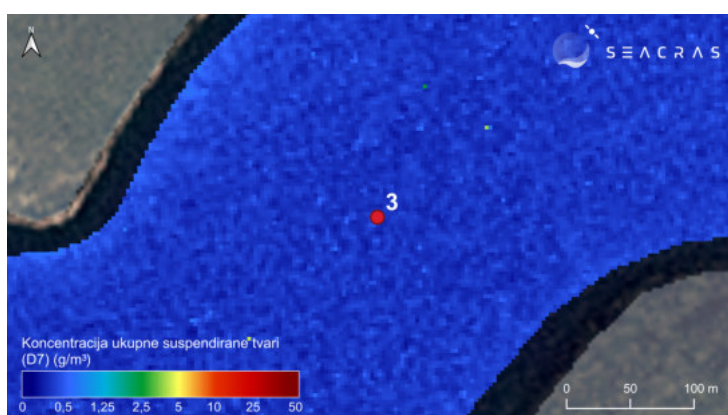
Slika 68. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na promatranom području Limskog zaljeva – 21. rujna 2024.



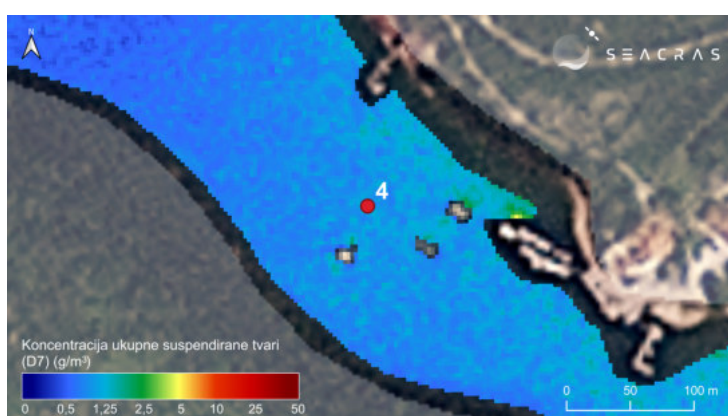
Slika 69. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 1 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 70. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 2 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 71. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 3 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.



Slika 72. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije ukupne suspendirane tvari na Lokaciji 4 u Limskom zaljevu – 21. rujna 2024.

Analiza koncentracije ukupne suspendirane tvari u razdoblju od svibnja do rujna 2024. godine pokazala je izražene razlike između lokacija, kao i sezonske oscilacije povezane s meteorološkim uvjetima.

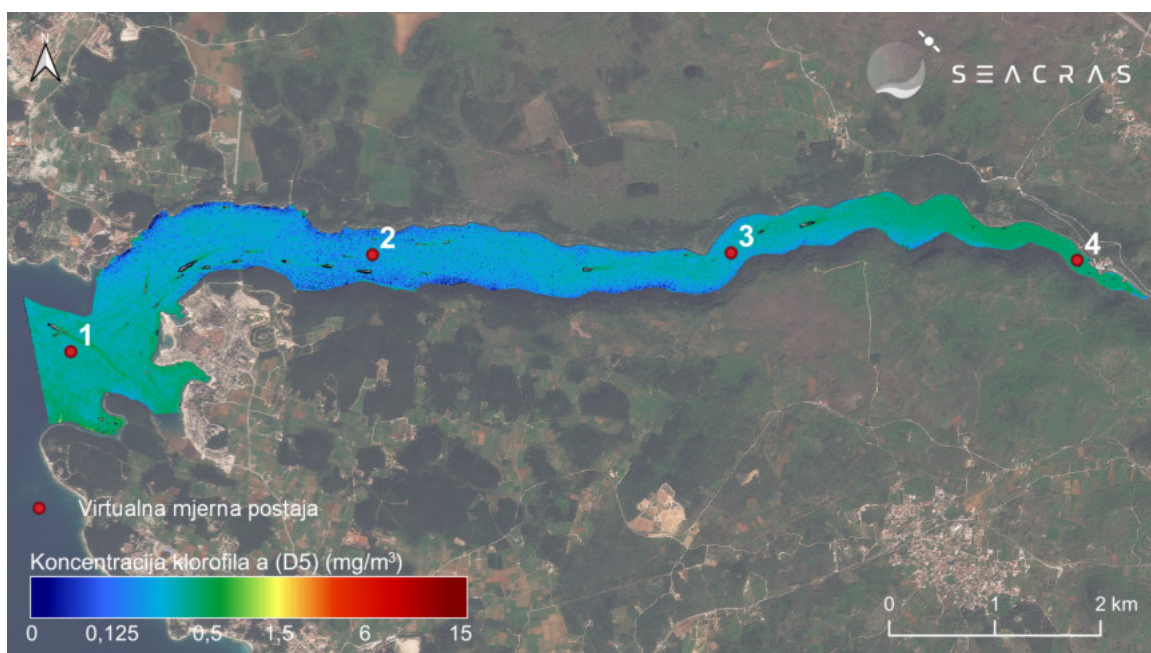
Najviše vrijednosti suspendirane tvari zabilježene su u zatvorenijem dijelu zaljeva, osobito na Lokaciji 4, što je u skladu s očekivanjima s obzirom na ograničenu izmjenu vode, manju dubinu i potencijalno jači utjecaj s kopna. Povišene vrijednosti tijekom svibnja i lipnja moguća su posljedica oborinskih epizoda koje doprinose povećanom unosu tvari s obalnog područja i resuspenziji materijala u plićim dijelovima. U srpnju i rujnu, vrijednosti su bile niže i stabilnije, osobito na otvorenijim lokacijama.

Važno je napomenuti da su u određenim slučajevima i otvorenije postaje (poput Lokacije 1) zabilježile povišene vrijednosti, što može ukazivati na lokalne procese poput vremenski uvjetovane resuspenzije sedimenta, uzburkanosti mora ili dotoka organskog materijala s otvorenog mora.

Prostorna varijabilnost jasno ukazuje na utjecaj morfoloških karakteristika zaljeva, pri čemu zatvoreniji dijelovi akumuliraju više suspendiranog materijala.

Detekcija pojave morske sluzi (mucilage)

Pojava mucilaga u Limskom zaljevu zabilježena 9. kolovoza 2024. godine jasno je detektirana i na satelitskim snimkama tog dana, osobito u zapadnom dijelu zaljeva, na području Lokacije 1 (slika 73). Ta lokacija, smještena najbliže otvorenom moru, prikazivala je vidljive plutajuće agregate karakteristične za mucilage, što je u skladu s terenskim zapažanjima Instituta Ruđer Bošković, koji su u istom razdoblju evidentirali više epizoda ovog fenomena u sjevernom Jadranu (izvor: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109222>)

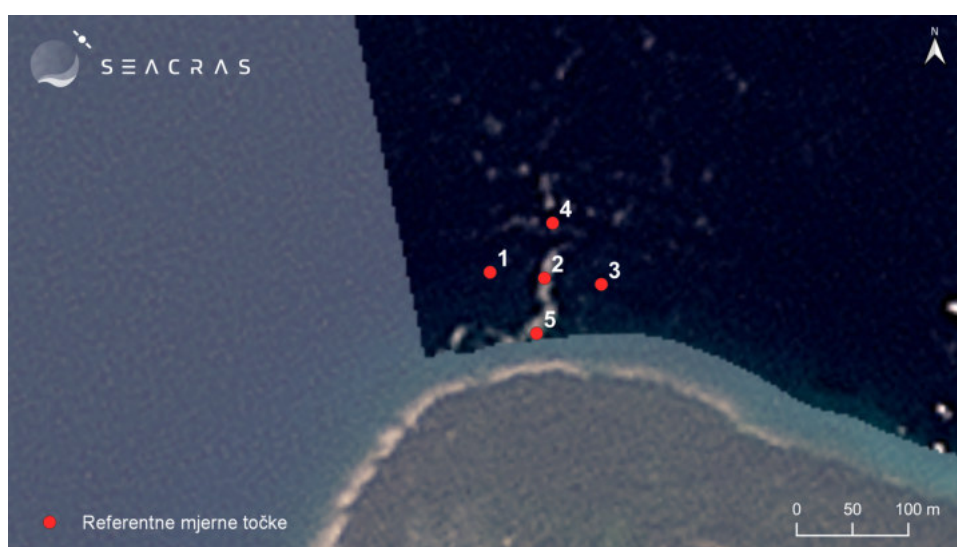


Slika 73. Tematska karta obrađene satelitske snimke na kojoj je kartirana vrijednost koncentracije klorofila-a i prikaz položaja virtualnih mjernih postaja na promatranom području Limskog zaljeva – 09. kolovoza 2024.

Satelitski podaci potvrđuju da je na dan 09. kolovoza zabilježena povišena koncentracija klorofila-a upravo na Lokaciji 1. Iako vrijednosti nisu bile najviše u čitavom razdoblju promatranja, njihov rast u odnosu na prethodne dane, kao i u odnosu na ostale otvorenije lokacije, sugerira pojačanu biološku aktivnost. Time se dodatno potvrđuje povezanost između pojave mucilaga i razdoblja cvjetanja mora.

Osim klorofila-a, i koncentracija ukupne suspendirane tvari bila je povišena na istoj lokaciji. To može ukazivati na prisutnost organskog materijala i ostataka planktonskih masa, ali i na izravnu detekciju mucilage agregata u površinskom sloju mora. Istovremeno, u zatvorenijim dijelovima zaljeva (Lokacije 3 i 4), vrijednosti suspendirane tvari bile su niže nego uobičajeno, što dodatno naglašava lokalizirani karakter ovog događaja na izlazu iz zaljeva.

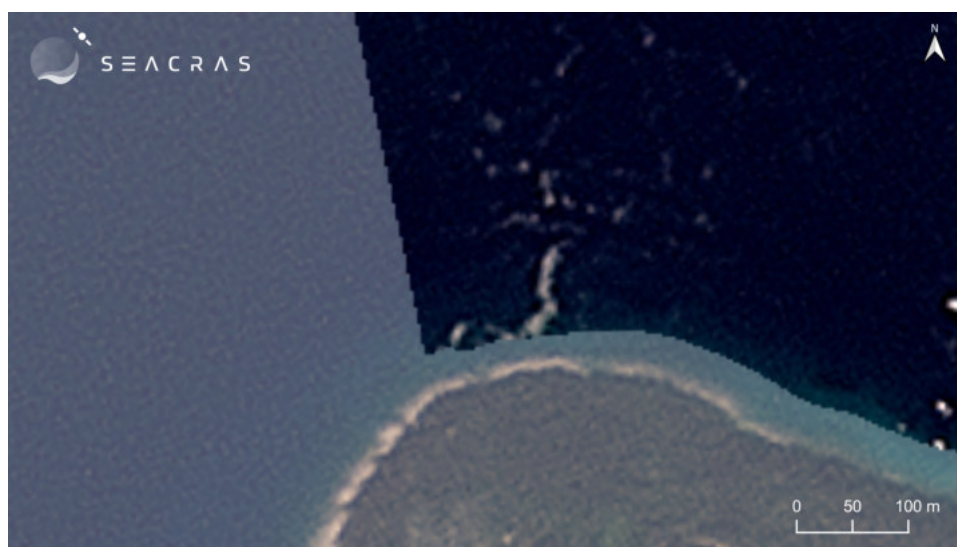
S obzirom na vizualno potvrđenu pojavu mucilaga 09. kolovoza 2024. na zapadnom rubu Limskog zaljeva, provedena je dodatna mikrolokacijska analiza kako bi se detaljno kvantificirao intenzitet i prostorni raspored agregata. Analiza je temeljena na snimkama vrlo visoke prostorne rezolucije te je uključivala pet dodatnih referentnih točaka (virtualnih mjernih postaja) unutar područja agregacije (slika 74).



Slika 74. Lokacije referentnih mjernih točaka unutar područja zahvaćenog pojavom mucilaga na RGB prikazu satelitske

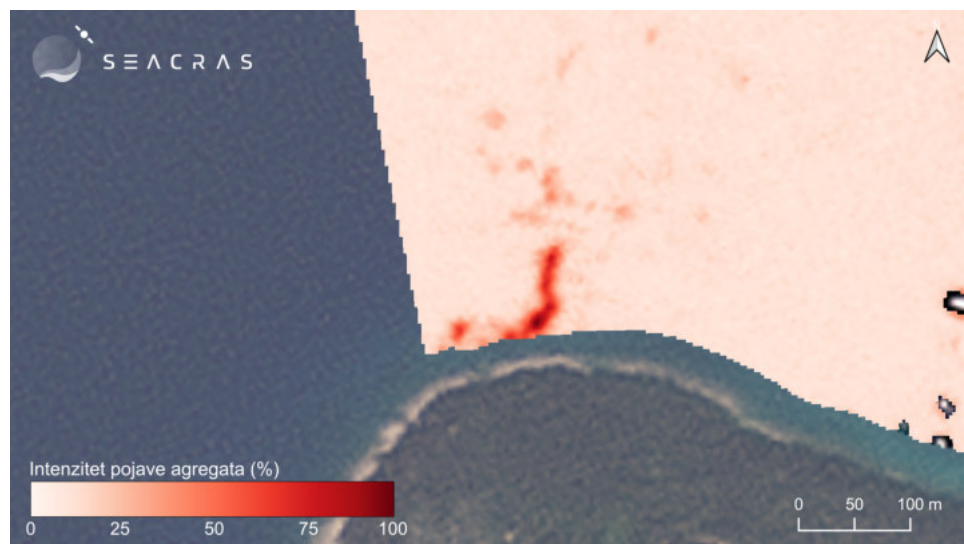
snimke, 09. kolovoza 2024.

Satelitski RGB prikaz (slika 75) jasno potvrđuje vizualnu pojavnost mucilaga u obliku bijelih vlaknastih struktura u površinskom sloju mora.

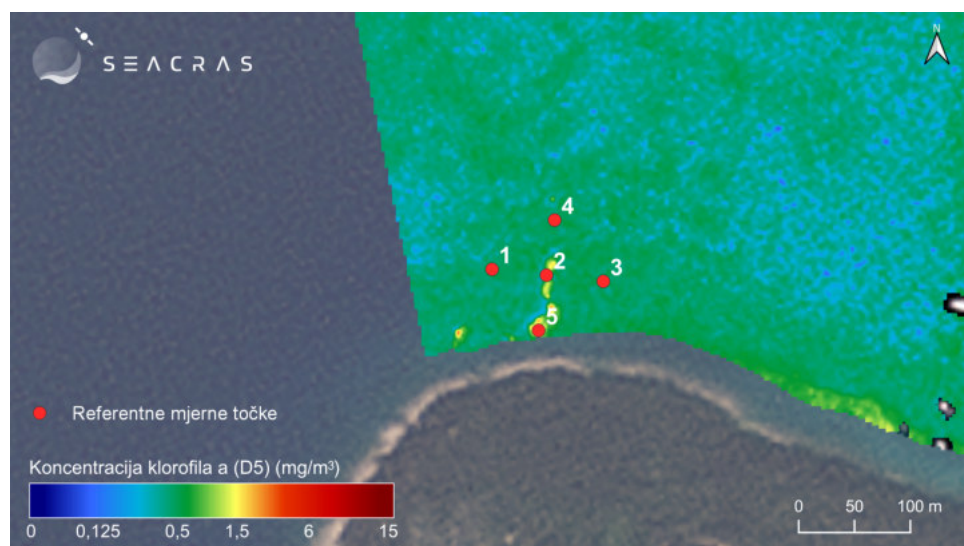


Slika 75. Satelitski RGB prikaz područja zahvaćenog pojavom mucilaga, 09. kolovoza 2024.

Tematska karta intenziteta agregata (slika 76) dodatno kvantificira prostornu distribuciju agregacije, dok tematska karta koncentracije klorofila-a (slika 77) u istom području pokazuje prisutnost povišenih vrijednosti, osobito oko točke 5.

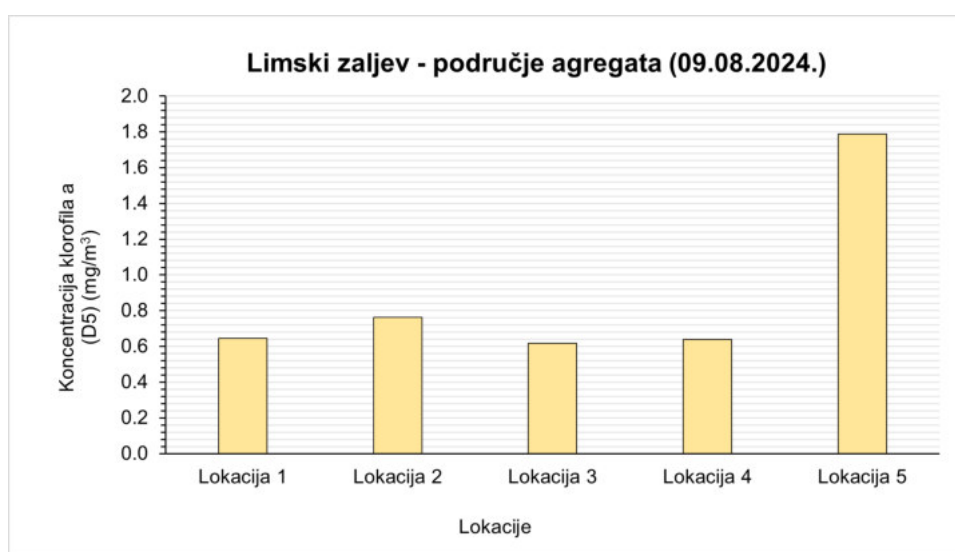


Slika 76. Tematska karta intenziteta pojave agregata unutar područja zahvaćenog pojavom mucilaga, 9. kolovoza 2024.



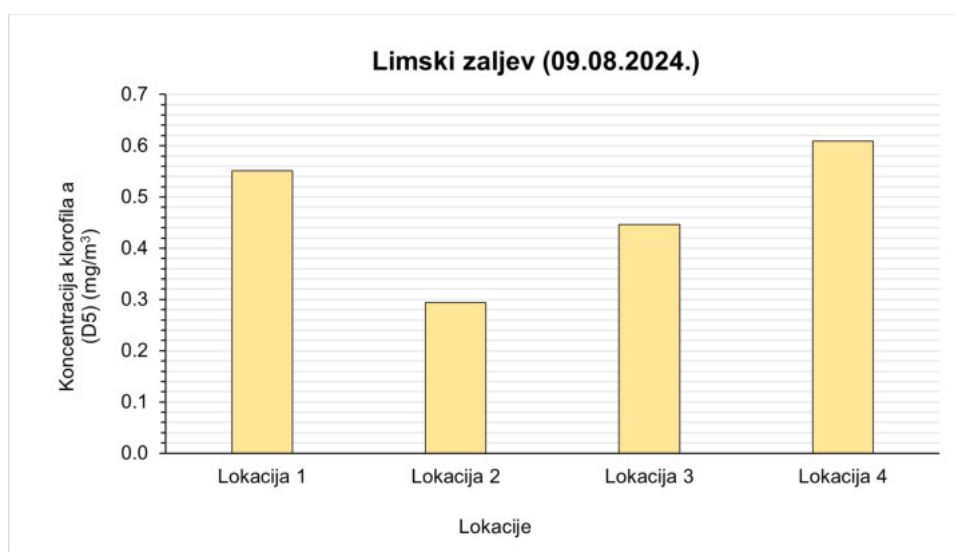
Slika 77. Tematska karta koncentracije klorofila-a u području pojave mucilaga, 09. kolovoza 2024.

Grafički prikaz koncentracija klorofila-a na mikrolokacijama (slika 78) ukazuje na znatno višu vrijednost na Lokaciji 5 u usporedbi s ostalim točkama, što može ukazivati na lokaliziranu biološku aktivnost kao jedan od mogućih uzroka pojave mucilaga.



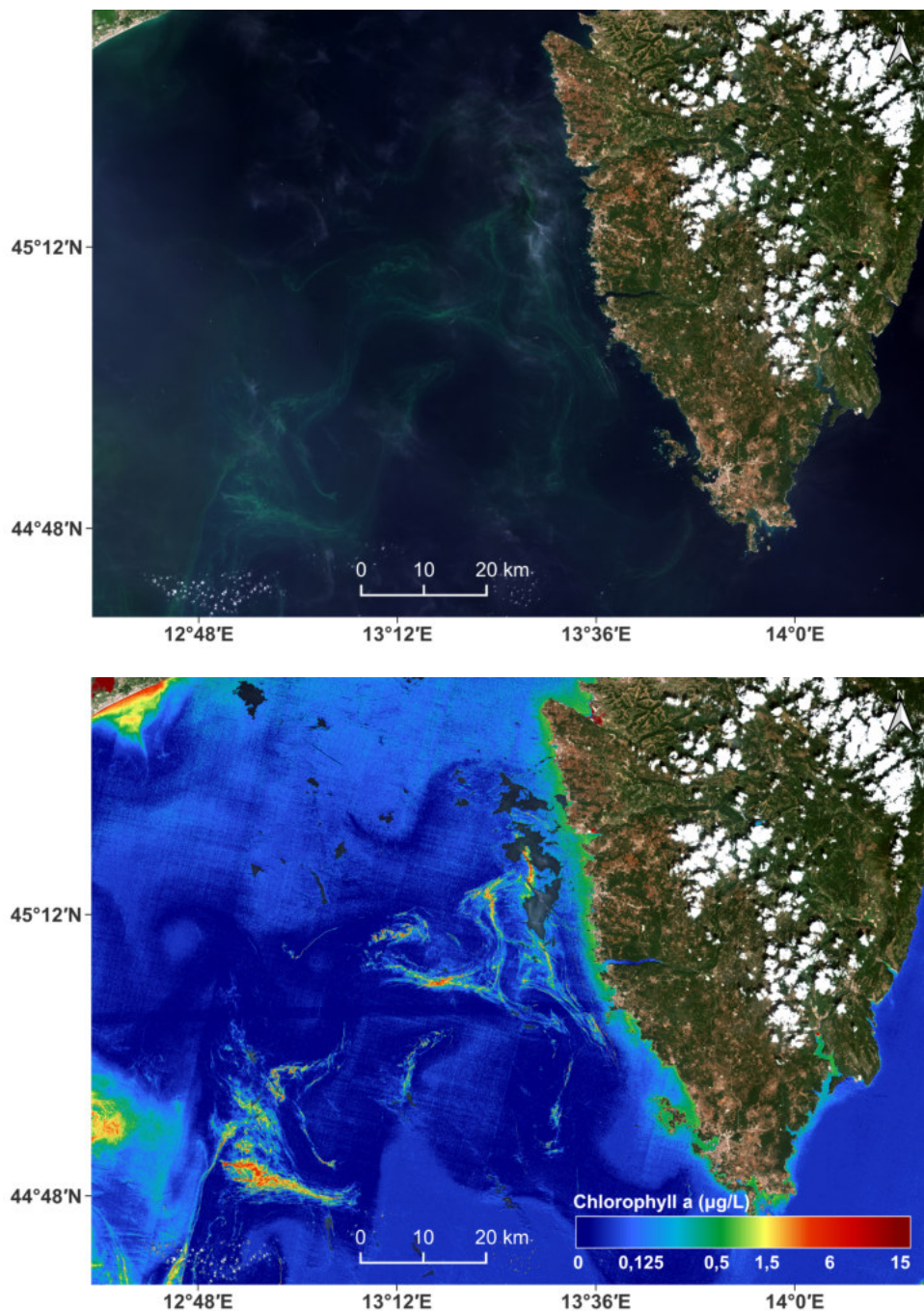
Slika 78. Grafički prikaz vrijednosti koncentracije klorofila-a na mikrolokacijama unutar područja pojave mucilaga, 09. kolovoza 2024.

Usporedba s redovnim postajama unutar zaljeva (slika 79) potvrđuje da su koncentracije u zahvaćenom području bile među višima tog dana, iako nisu ekstremno visoke na razini cijelog zaljeva.



Slika 79. Koncentracija klorofila-a na redovnim virtualnim postajama (Lokacija 1 - 4) unutar Limskog zaljeva, 09. kolovoza 2024.

Važno je istaknuti da je Lokacija 1, kao najsnažnije izložena utjecaju otvorenog mora, podložna prijenosu biološkog materijala iz šireg područja sjevernog Jadrana. Satelitski prikaz šire regije (slika 80), zabilježen 07. kolovoza 2024., ukazivao je na pojačane procese eutrofikacije, što dodatno podupire pretpostavku da su uvjeti za razvoj mucilaga bili potaknuti regionalnim okolišnim impulsima.



Slika 80. Satelitski prikaz sjevernog Jadrana, 07. kolovoza 2024. Gornji prikaz: RGB snimka; Donji prikaz: Tematska karta koncentracije klorofila-a

Raspodjela i dinamika mucilaginoznih agregata u Limskom zaljevu pokazuju jasno ograničen horizontalni prijenos, što nedvojbeno ukazuje na snažan utjecaj specifičnih lokalnih geomorfoloških i oceanografskih uvjeta. Agregati su se formirali prvenstveno na prijelaznoj zoni između otvorenog mora i zaljevskog sustava, bez znatnijeg širenja prema zatvorenijim dijelovima akvatorija.

Ovakva lokalizacija može se objasniti kombinacijom više čimbenika. Prije svega, geomorfološka zatvorenost Limskog zaljeva, karakteristična za kanjonske sustave, prirodno ograničava razmjenu morskih masa s otvorenim morem. Uz to, slaba hidrodinamika i izostanak jačih strujanja u zaljevu onemogućuju transport agregata prema unutrašnjosti, što znači da agregati ostaju koncentrirani na mjestu nastanka.

Nadalje, formiranju mucilaga prethodili su lokalno povoljni uvjeti koji su bili izraženi upravo na spomenutoj prijelaznoj zoni. U danima koji su prethodili zabilježenoj pojavi mucilaga 9. kolovoza, vremenski uvjeti bili su izrazito stabilni – uz povišene temperature mora i nisku brzinu vjetra. Takvi uvjeti pogoduju formiranju vertikalne stratifikacije vodenog stupca, preduvjetu za razvoj i površinsku akumulaciju mucilage agregata.

Stoga je kombinacija geomorfoloških karakteristika zaljeva, visoke temperature mora, mirnog vremena i izražene stratifikacije ograničila pojavu mucilaga, bez daljnjeg prostornog širenja prema unutrašnjosti zaljeva.

Detekcija otpada plastike - deskriptor D10

U sklopu satelitskog monitoringa provedena je analiza prisutnosti plutajućeg morskog otpada korištenjem snimaka visoke i vrlo visoke prostorne rezolucije. Cilj je bio detektirati i razlikovati plutajuće objekte poput plastike, mucilage i plovila, koristeći napredne algoritme za spektralnu obradu podataka.

Plovila su jasno razlučena zahvaljujući primjeni interno razvijenog (in-house) algoritma za detekciju plovila, čime je omogućena pouzdana identifikacija njihovih položaja i veličine na satelitskim snimkama. Također, pojava mucilaginoznih agregata bila je vizualno i spektralno prepoznatljiva, osobito u zapadnom dijelu Limskog zaljeva, gdje su agregati formirali jasno razlučive površinske strukture.

Detekcija plutajuće plastike prezultirala je s detekcijom više pozitivnih signala, njihova pouzdanost bila je ograničena zbog učestalih "false positive" rezultata, odnosno miješanja signala s drugim objektima poput plovila, bova, sjena ili manjih struktura na površini. Spektralna distinkcija plastike u takvim uvjetima ostaje ograničena, osobito u geomorfološki složenim sustavima poput Limskog zaljeva.

Uz to, dinamika strujanja unutar zaljeva – definirana slabom hidrodinamikom i geomorfološkom zatvorenosti – onemogućuje značajniji horizontalni prijenos materijala iz otvorenog mora prema unutrašnjosti. Kao što je pokazano i na primjeru mucilage, nije uočena migracija plutajućih objekata iz vanjskih područja, što dodatno podržava hipotezu da detektirani otpad ima lokalno podrijetlo.

Na temelju ovih nalaza, može se zaključiti da većina plutajućeg otpada u Limskom zaljevu potječe od internih izvora, unutar granica samog zaštićenog područja. U tom kontekstu,

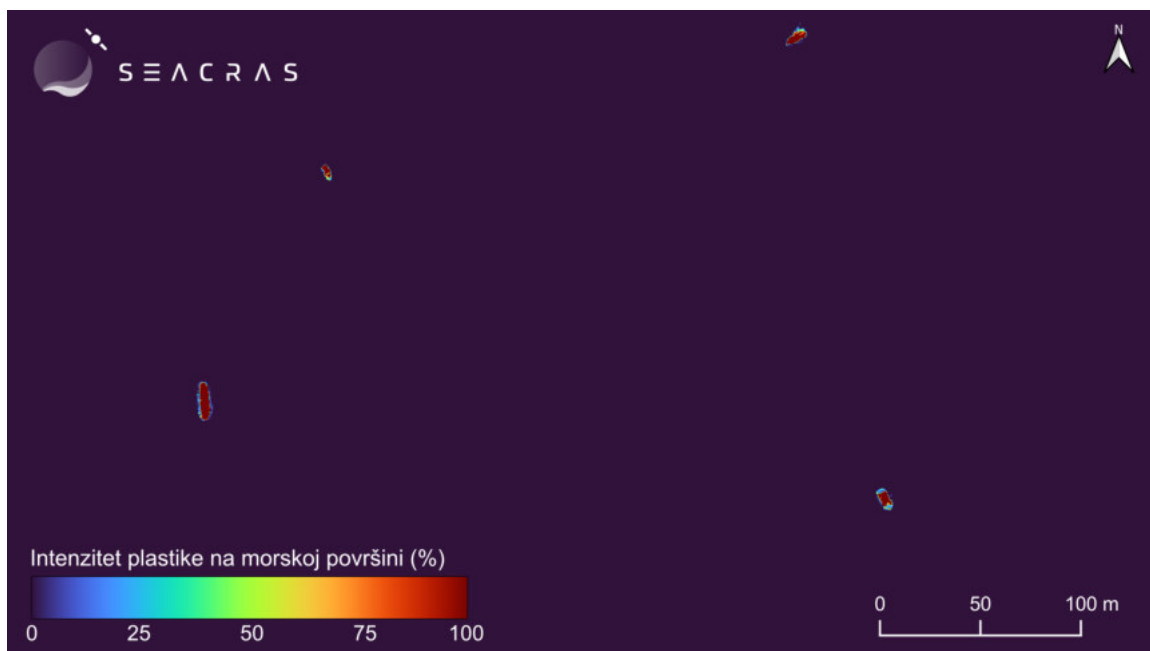
lokalne ljudske aktivnosti, osobito nautički promet i rekreacija, predstavljaju vjerojatne izvore unosa.

Dodatnom analizom obalnog pojasa uočene su male količine plastičnog otpada, uglavnom turističkih rekvizita poput zračnih madraca i plastičnih predmeta. Ovakav nalaz može odražavati stvarno nisku prisutnost plastike u promatranom razdoblju.

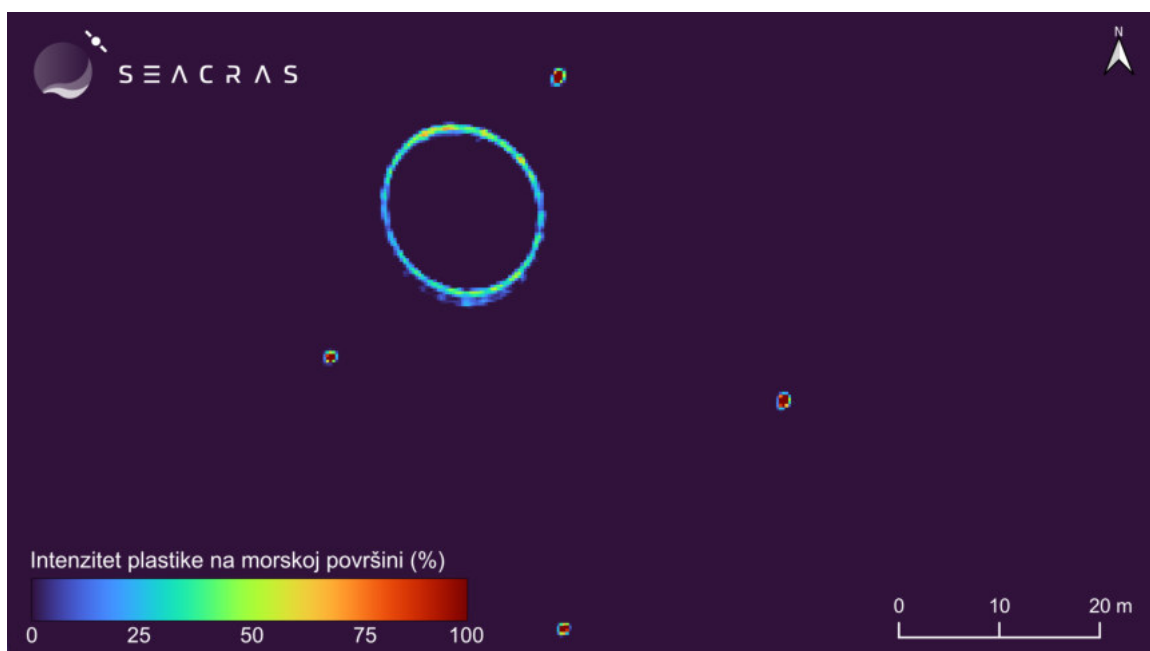
False-positive signali objekata plastične prirode statičnog i dinamičkog karaktera



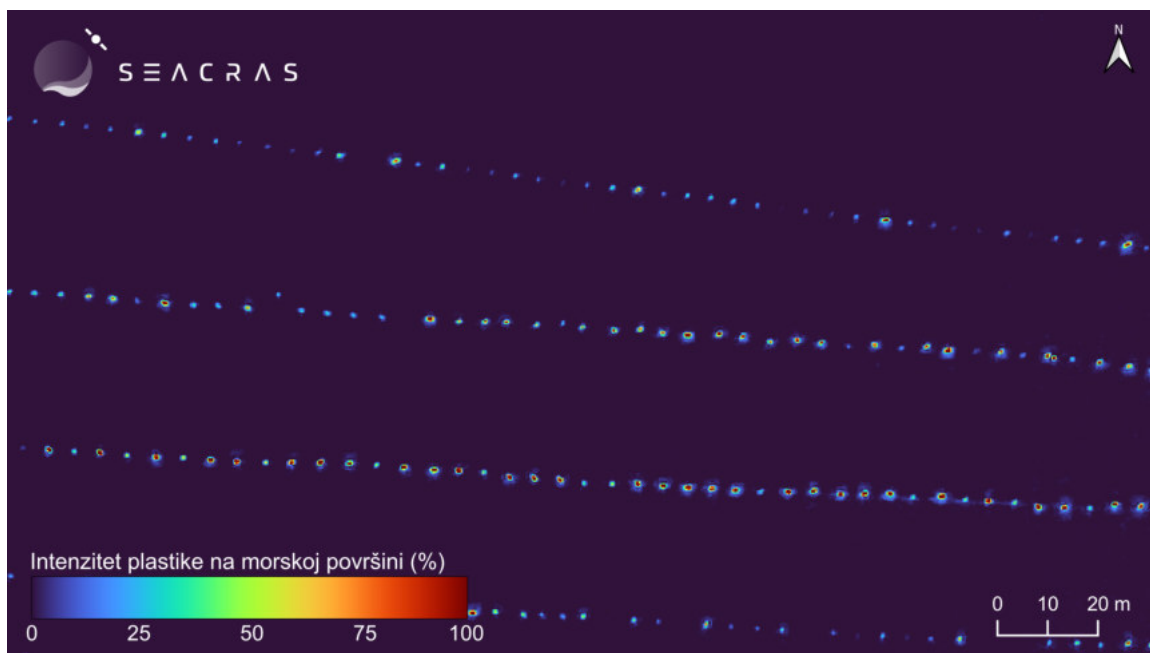
Slika 81. Istaknute lokacije false-positive signala u Limskom zaljevu, 29. kolovoza 2024.



Slika 82. Prikaz intenziteta plastike na morskoj površini na istaknutoj lokaciji 1, 29. kolovoza 2024.



Slika 83. Prikaz intenziteta plastike na morskoj površini na istaknutoj lokaciji 2, 29. kolovoza 2024.



Slika 84. Prikaz intenziteta plastike na morskoj površini na istaknutoj lokaciji 3, 29. kolovoza 2024.

Primjeri takvih *false positive* detekcija prikazani su na istaknutim lokacijama (slika 81), gdje su vidljivi objekti čija spektralna analiza upućuje na materijal plastiku (slike 82–84). Raspon veličina tih objekata kreće se od 30 cm do 25 m.

Ovi objekti predstavljaju *false positive* signale detekcije u daljinskom istraživanju onečišćenja plastikom u Limskom zaljevu. Iako su statični izvori onečišćenja mikroplastikom zbog sustavne degradacije materijala, oni su ujedno i potencijalni dinamički izvori onečišćenja makro- i mikroplastikom.

Procjena rizika i prostorna raspodjela plastičnog onečišćenja u morskom ekosustavu Limskog zaljeva

Na temelju analiza incidenata migracije mucilaga na području Limskog zaljeva, zaključeno je da je propagacija plutajućih objekata (uključujući i plutajuću plastiku) prema dubljim dijelovima zaljeva u većini slučajeva spriječena, i to pod različitim meteorološkim uvjetima.

Sukladno tome, provedena je analiza višeg reda radi identifikacije potencijalnih unutarnjih izvora onečišćenja makroplastikom, a kao posljedica sidrenja i plovidbe te korištenja postojeće infrastrukture i objekata na području zaljeva, uključujući sidrišta, prometnice i pristupne putove, kao i dostupnost turističkih sadržaja. Osim toga, u analizu su uključeni i prirodni i hidrodinamični čimbenici poput dominantnog smjera vjeta, dubine mora, tipova staništa u moru, otvorenosti uvale itd.



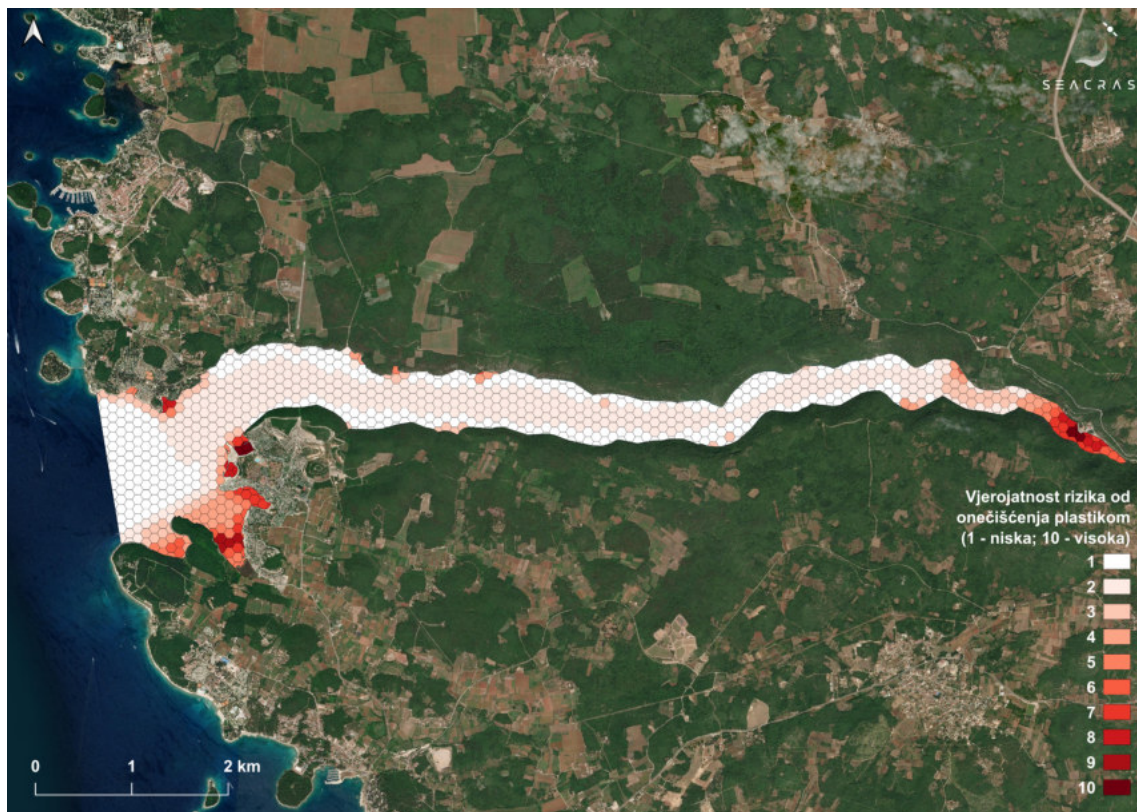
Slika 85. Detekcija plovila na području Limskog zaljeva (01.05.2024. - 30.09.2024.).

Detekcijom plovila kroz snimke iznimno visoke rezolucije određene su zone visoke incidencije plovila, odnosno istaknute zone sidrenja plovila, zone plovnih puteva plovila u migraciji te zone priveza plovila. Isti pokazatelji, u kombinaciji s drugim parametrima predstavljaju jedne od glavnih parametara prilikom određivanja vjerojatnosti rizika onečišćenja plastikom. Prema prikazanoj karti, vidljiva su sljedeća žarišta detektiranih plovila: uvale Križ, Soline, Fujaga, Vrh Lime te marina Valalta. Osim navedenih, postoji još nekoliko lokaliteta koji predstavljaju zone manje incidencije plovila poput uvale Larij ili manjih privezišta unutar zaljeva, ali svakako ne i zanemarive. U zonama sidrenja, poput uvale Križ tijekom ljetne sezone sidri se više desetaka plovila, što na površinu od cca 0.076 km² predstavlja značajan pritisak na morski okoliš te veću vjerojatnost rizika onečišćenja plastikom. Lokacije Soline, Valalta i Vrh Lima predstavljaju lokacije iznimno visoke incidencije privezanih plovila, koje također predstavljaju lokacije visoke vjerojatnosti rizika onečišćenja plastikom.



Slika 86. Postojeća infraskultura uz Limski zaljev u 2024. godini.

Na slici 86 vidljiva je postojeća infrastruktura koja se nalazi uz Limski zaljev. Na karti su prikazane sve plaže koje se nalaze uz obalu zaljeva, privezišta, ugostiteljski i smještajni objekti, trgovine te prometnice koje povezuju obalu s kopnom. Sva navedena prostorna obilježja predstavljaju zone potencijalno visoke frekvencije kretanja ljudi, odnosno povećane vjerojatnosti unosa, transporta i akumulacije plastike u vodu. Prostorna distribucija navedenih obilježja upućuje na razvijeniju infrastrukturu na samom ulazu u Limski zaljev, na sjevernoj i južnoj obali te na samome kraju zaljeva, odnosno Vrh Lima. Takva distribucija isto tako je većim dijelom sukladna prostornoj distribuciji detektiranih plovila.



Slika 87. Prostorna distribucija vjerojatnosti rizika onečišćenja plastikom na području Limskog zaljeva u 2024. godini.

Izračunata je vjerojatnost te prostorna varijabilnost zona rizika onečišćenja plastikom na području Limskog zaljeva. Rezultati analize višeg reda su prikazani na Slici 87.

Rezultati pokazuju iznimno prostornu varijabilnost vjerojatnosti rizika onečišćenja. Najveća vjerojatnost rizika onečišćenja plastikom je na samom ulasku u Limski kanal te na najistočnijoj točki, dok je uzduž kanala u sklopu manjih uvala te plovnih puteva niža ili srednja vjerojatnost rizika od onečišćenja.

Potencijalni uzorci visoke vjerojatnosti onečišćenja su migracija plutajućeg otpada s Jadranskog mora, ali lokalizirano isključivo na ulasku u zaljev, najviše unutar bliskih uvala, kao posljedica djelovanja hidrodinamičkih čimbenika. Dodatno, uz obalu najzapadnijeg dijela zaljeva, prije njegovog sužavanja, postoji dodatan pritisak pomorskog prometa te

turističkih aktivnosti, koje su na tom području najistaknutije. Osobito ranjive lokacije predstavljaju lokaciju poput marine Valalta, koja ima tijekom ljetne sezone preko 100 privezanih plovila dnevno, a protok vode je iznimno nizak zbog zatvorenosti uvale. Također, područje Vrh Lima ima jednaku vjerojatnost rizika od onečišćenja plastikom zbog visoke incidencije i usidrenih i privezanih plovila. Postojanje turističkih objekata i prometnica isto tako potiče dodatni priliv stanovništva s kopna. Osim toga, dodatan faktor zadržavanja plastike na toj lokaciji čini i slabije kretanje vode na samome kraju zaljeva.

Zone srednje vrijednosti vjerojatnosti rizika su uglavnom posljedica plovidbe plovila, sidrenja manjeg intenziteta u nekim uvalama te pristupa moru na određenim dijelovima prilaznim putevima.

Prijedlog mjera oporavka uključuje unaprijeđenu kontrolu i monitoring područja s povećanom vjerojatnošću rizika od onečišćenja.

Prijedlog mjera prevencije obuhvaća aktivnosti preventivnog djelovanja usmjerene na posjetitelje zaljeva, posebice u kontekstu pomorskih operacija, poput plovidbe.

Prijedlog mjera oporavka također uključuje aktivnosti čišćenja područja prema intenzitetu i učestalosti pojave onečišćenja.

Ograničenja podataka Sentinel-2 i Landsat-8 za primjene u detekciji plastike u odnosu na podatke korištene u ovoj studiji

Rezultati ove studije upućuju na to da korištenje satelitskih snimaka srednje prostorne rezolucije iz izvora Sentinel-2 i Landsat-8 nije pouzdan izvor za detekciju niti za kvantifikaciju plutajućeg otpada na vodenim tijelima, kao ni za njegovu evidentaciju u

priobalnom području Limskog zaljeva. Isti zaključak vrijedi i za većinu područja Jadranskog mora, osim u rijetkim slučajevima pojave većih nakupina plutajućeg otpada koji su pod značajnim utjecajem meteoroloških uvjeta. Nadalje, niska frekvencija prelaska satelita nad područjem Limskog zaljeva, kao i nad Jadranom općenito, dodatno otežava detekciju plutajuće plastike.

Zaključak

Provedeni satelitski monitoring Limskog zaljeva u razdoblju od svibnja do rujna 2024. omogućio je detaljnu analizu stanja mora kroz praćenje ključnih biokemijskih deskriptora: koncentracije klorofila-a (D5), ukupne suspendirane tvari (D7) te morskog otpada (D10). Korištenjem više satelitskih sustava visoke i vrlo visoke prostorne rezolucije, osigurana je visoka vremenska i prostorna pokrivenost, što je omogućilo prepoznavanje sezonskih obrazaca i lokalnih anomalija u ekosustavu zatvorenog priobalnog kanjona poput Limskog zaljeva.

Biokemijski deskriptori (D5 i D7)

Analiza koncentracije klorofila-a pokazala je sezonski obrazac porasta tijekom proljetno-ljetnog perioda, s najvišim vrijednostima u zatvorenijim dijelovima zaljeva (Lokacije 3 i 4), osobito tijekom svibnja i lipnja. Takvi rezultati upućuju na utjecaj unosa hranjivih tvari u uvjetima povremenih oborinskih epizoda, ali i na potencijalnu akumulaciju uslijed slabije cirkulacije u zatvorenim dijelovima akvatorija. Prostorna varijabilnost bila je izražena, s najnižim koncentracijama zabilježenima na otvorenijim dijelovima (Lokacija 1).

Koncentracija ukupne suspendirane tvari pokazala je slične prostorne obrasce, s povišenim vrijednostima u zatvorenijim dijelovima akvatorija, ali uz izraženije fluktuacije povezane s pojedinačnim vremenskim događajima i epizodama pojačane biološke aktivnosti. Visoke vrijednosti u pojedinim danima korelirale su s porastom klorofila-a, što ukazuje na međusobnu povezanost ova dva indikatora stanja.

Pojava mucilaga

Značajan događaj zabilježen je 9. kolovoza 2024., kada su na satelitskim snimkama jasno uočeni površinski agregati mucilaga u zapadnom dijelu Limskog zaljeva, na prijelaznoj zoni između otvorenog mora i zaljevskog sustava. Mikrolokacijska analiza provedena na pet

dodatnih referentnih točaka pokazala je povišene vrijednosti klorofila-a i prisutnost agregata s izraženom prostornom lokalizacijom. Usporedba sa širim satelitskim prikazima Jadrana (npr. 7. kolovoza 2024.) ukazivala je na pojačane procese eutrofikacije u regiji, što podržava tezu o regionalnim okolišnim impulsima kao potencijalnim uzročnicima.

Međutim, geomorfološka zatvorenost Limskog zaljeva, slaba hidrodinamika i lokalna stratifikacija vodenog stupca doveli su do ograničene horizontalne distribucije agregata – mucilage su ostale prostorno vezane uz vanjski, otvoreniji dio zaljeva. Ovaj nalaz potvrđuje ključnu ulogu lokalnih uvjeta u određivanju prostorne dinamike ovog fenomena.

Deskriptor D10 – detekcija otpada

Praćenje deskriptora D10 provedeno je uz primjenu specijaliziranih algoritama za detekciju plutajućih objekata. Cilj je bio razlikovati plastiku, mucilage i plovila.

Plovila su se uspješno detektirala primjenom in-house algoritma, a agregati mucilaga potvrđeni su vizualno i spektralno. Detekcija plutajuće plastike bila je ograničena zbog učestalih *false positive* signala, među kojima su potvrđeni objekti plastične prirode veličine 30 cm do 25 m, koji, iako statični, mogu biti izvori makro- i mikroplastike.

Na obalnim dijelovima uočene su male količine plastičnog otpada, primjerice turističkih rekvizita, što može biti rezultat stvarno niskih količina plastike u promatranom razdoblju, ali i smanjene detekcijske učinkovitosti satelitskih alata u složenim obalnim uvjetima.

Izračunata je vjerojatnost te prostorna varijabilnost zona rizika onečišćenja plastikom na području Limskog zaljeva. Rezultati analize višeg reda su prikazani na slici 87.

Rezultati pokazuju iznimno prostornu varijabilnost vjerojatnosti rizika onečišćenja. Najveća vjerojatnost rizika onečišćenja plastikom je na samom ulasku u Limski kanal te na najistočnijoj točki, dok je uzduž kanala u sklopu manjih uvala te plovnih puteva niža ili

srednja vjerojatnost rizika od onečišćenja.

Potencijalni uzorci visoke vjerojatnosti onečišćenja su migracija plutajućeg otpada s Jadranskog mora, ali lokalizirano isključivo na ulasku u zaljev, najviše unutar bliskih uvala, kao posljedica djelovanja hidrodinamičkih čimbenika. Dodatno, uz obalu najzapadnijeg dijela zaljeva, prije njegovog sužavanja, postoji dodatan pritisak pomorskog prometa te turističkih aktivnosti, koje su na tom području najistaknutije. Osobito ranjive lokacije predstavljaju lokaciju poput marine Valalta, koja ima tijekom ljetne sezone preko 100 privezanih plovila dnevno, a protok vode je iznimno nizak zbog zatvorenosti uvale. Također, područje Vrh Lima ima jednaku vjerojatnost rizika od onečišćenja plastikom zbog visoke incidencije i usidrenih i privezanih plovila. Postojanje turističkih objekata i prometnica isto tako potiče dodatni priliv stanovništva s kopna. Osim toga, dodatan faktor zadržavanja plastike na toj lokaciji čini i slabije kretanje vode na samome kraju zaljeva.

Zone srednje vrijednosti vjerojatnosti rizika su uglavnom posljedica plovidbe plovila, sidrenja manjeg intenziteta u nekim uvalama te pristupa moru na određenim dijelovima prilaznim putevima.

Prijedlog mjera oporavka uključuje unaprijeđenu kontrolu i monitoring područja s povećanom vjerojatnošću rizika od onečišćenja.

Prijedlog mjera prevencije obuhvaća aktivnosti preventivnog djelovanja usmjerene na posjetitelje zaljeva, posebice u kontekstu pomorskih operacija, poput plovidbe.

Prijedlog mjera oporavka također uključuje aktivnosti čišćenja područja prema intenzitetu i učestalosti pojave onečišćenja.

Literatura

Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V. *et al.* Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. *Sci Rep* 10, 5364 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z>

Muhammad Waqas, Man Sing Wong, Alessandro Stocchino, Sawaid Abbas, Sidrah Hafeez, Rui Zhu, Marine plastic pollution detection and identification by using remote sensing-meta analysis, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 197, 2023, 115746, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115746>.

Bijeesh Kozhikkodan Veetil, Nguyen Hong Quan, Leon T. Hauser, Dong Doan Van, Ngo Xuan Quang, Coastal and marine plastic litter monitoring using remote sensing: A review, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 279, 2022, 108160, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108160>.

Duplančić Leder, T. (2024) "Optical Remote Sensing Methods for Floating Marine Debris Detection – Review and Bibliography Analysis", *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 13(2). doi: 10.7225/toms.v13.n02.005.

Ivica Vilibić, Elena Terzić, Iva Vrdoljak, Iva Dominović Novković, Martin Vodopivec, Irena Ciglencečki, Tamara Djakovac, Bojan Hamer, Extraordinary mucilage event in the northern Adriatic in 2024—a glimpse into the future climate?, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 317, 2025, 109222, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109222>.

Napomena o pohrani podataka:

SEA CRAS d.o.o. pohranjuje na svojim serverima sve obrađene podatke o detekciji i nadzoru brodova na vezovima i sidrištima i snimke na period od godinu dana od dana kraja monitoringa. U tom period je moguće zatražiti pristup svim obrađenim podacima, koje je moguće dobiti u odgovarajućim formatima.