

Geoprostorne tehnologije u modeliranju kakvoće jezerske vode

Ante Šiljeg, Anja Batina, Gloria Pedić
Zadar, 2026.

Interreg



Co-funded by
the European Union

IPA Croatia – Bosnia and
Herzegovina – Montenegro



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002

 **SMART-Water**

Ante Šiljeg • Anja Batina • Gloria Pedić
**GEOPROSTORNE TEHNOLOGIJE U MODELIRANJU
KAKVOĆE JEZERSKE VODE**

Nakladnik

Sveučilište u Zadru

Za nakladnika

Josip Faričić, rektor

**Povjerenstvo za izdavačku
djelatnost Sveučilišta u Zadru**

Lena Mirošević, predsjednica

Urednici

Anja Batina

Ante Šiljeg

Recenzenti

Ljiljana Šerić

Mateo Gašparović

Lektura

Edita Medić

Dizajn korica

Tomislav Čolaković

Grafičko oblikovanje i prijelom

Sveučilište u Zadru

ISBN 978-953-331-623-9 (tisak)

ISBN 978-953-331-630-7 (online)

Djelo je objavljeno pod uvjetima Creative Commons Autorstvo-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 Međunarodne javne licence (CC-BY-NC-ND) koja dopušta korištenje, dijeljenje i umnažanje djela, ali samo u nekomercijalne svrhe i uz uvjet da se ispravno citira djelo i autora, te uputi na izvor. Dijeljenje djela u prerađenom ili izmijenjenom obliku nije dopušteno.

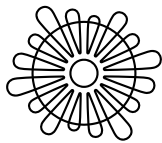


The work is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (CC BY-NC-ND), which allows for the use, sharing, and reproduction of the work, but only for non-commercial purposes and provided that the work and the author are properly credited, and the source is referenced. Sharing the work in a modified or adapted form is not permitted.

CIP zapis je dostupan u nacionalnom skupnom katalogu knjižničkog sustava Bukinet (katalog.bukinet.hr) pod brojem 991005963607809366.

Ante Šiljeg • Anja Batina • Gloria Pedić

Geoprostorne tehnologije u modeliranju kakvoće jezerske vode



Zadar, 2026.

<i>Predgovor</i>	7
<hr/>	
1. DEFINICIJA I VAŽNOST KAKVOĆE VODE	11
1.1. Parametri kakvoće vode	12
1.2. Klasifikacija jezera prema stupnju trofije	16
1.2.1. <i>Zakonodavni i institucionalni okvir upravljanja vodama</i>	16
1.3. Metode određivanja kakvoće vode	18
1.3.1. <i>In situ mjerenje sondom</i>	19
1.3.2. <i>Višeparametarska sonda EXO2s</i>	21
1.3.3. <i>Uzorkovanje vode za laboratorijska mjerenja</i>	23
<hr/>	
2. GEOPROSTORNE TEHNOLOGIJE	31
2.1. Daljinska istraživanja	31
2.2. Satelitske snimke Sentinel-2	36
2.3. Sentinel Application Platform – SNAP	37
<hr/>	
3. PRIMJENA SATELITSKIH PODATAKA SENTINEL-2 I SOFTVERA SNAP ZA MODELIRANJE KAKVOĆE VODE: PRIMJER VRANSKOG JEZERA	43
3.1. Područje istraživanja	45
3.2. Preuzimanje snimki Sentinel-2	47
3.2.1. <i>Otvaranje korisničkog računa i prijava</i>	47
3.2.2. <i>Pretraživanje i preuzimanje satelitskih snimki Sentinel-2</i>	48
3.3. Softver SNAP 13.0.0: instalacija i sučelje	51
3.3.1. <i>Instalacija i pokretanje softvera SNAP</i>	51
3.3.2. <i>Korisničko sučelje</i>	52
3.4. Predobrada podataka	53
3.4.1. <i>Učitavanje preuzetih snimki u softver SNAP</i>	53

3.4.2. Promjena prostorne rezolucije kanala	55
3.4.3. Izrada podskupa podataka (Subset)	56
3.5. Atmosferska korekcija u softveru SNAP	58
3.5.1. Prva iteracija atmosferske korekcije C2RCC	60
3.5.2. Uspostava veze s in situ mjerenjima i regresijska analiza	66
3.5.3. Druga iteracija atmosferske korekcije C2RCC	75
3.5.4. Primjena procesora C2X	80
3.5.5. Primjena procesora C2XC	83
3.6. Rezultati algoritama C2RCC, C2X i C2XC	86
3.6.1. Procesor C2RCC	86
3.6.2. Procesor C2X	87
3.6.3. Procesor C2XC	89
3.7. Usporedba rezultata	90
3.7.1. Ocjena točnosti modela	91
.....	
4. PROCJENA KAKVOĆE JEZERSKE VODE S POMOĆU INDEKSA KAKVOĆE VODE	99
4.1. Definicija i važnost indeksa kakvoće vode	100
4.2. Vrste indeksa kakvoće vode	100
4.3. Daljinska istraživanja i spektralni indeksi kakvoće vode	101
4.4. Računanje indeksa u softveru QGIS	103
4.5. Interpretacija rezultata provedenih indeksa	110
4.6. Usporedba rezultata između satelitskih indeksa i terenskih mjerenja	113
4.6.1. Povezanost indeksa NDCI i koncentracije klorofila a	113
4.6.2. Povezanost indeksa NDTI i koncentracije TSM-a	114
4.7. Smjernice za daljnji rad	115
KAZALO POJMOVA	120
POPIS SLIKA	121
POPIS TABLICA	123

This publication was co-funded by the European Union. Its contents are the sole responsibility of University of Zadar and do not necessarily reflect the views of the European Union.

Interreg



**Co-funded by
the European Union**

IPA Croatia – Bosnia and
Herzegovina – Montenegro

 **SMART-Water**

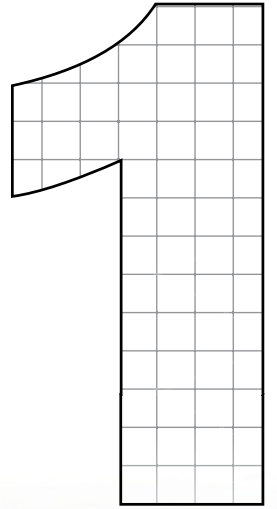
Predgovor

Praćenje kakvoće vode i razumijevanje dinamike vodenih ekosustava danas predstavlja jedan od ključnih izazova u upravljanju prirodnim resursima. Razvoj geoprostornih tehnologija, osobito metoda daljinskih istraživanja i satelitskih misija visoke prostorne i spektralne rezolucije, omogućio je istraživačima i stručnjacima dobivanje dosad nedostupnih informacija o promjenama u okolišu. Integracija satelitskih podataka, terenskih mjerenja i analitičkih modela postala je nužan preduvjet za učinkovitu i pravovremenu procjenu stanja površinskih voda.

Ovaj priručnik izrađen je s ciljem da posluži kao praktičan i metodološki dosljedan vodič za korištenje softvera SNAP (engl. *Sentinel Application Platform*) i pratećih alata geografskih informacijskih sustava (GIS) pri obradi Sentinel-2 snimaka za potrebe analize kakvoće vode. Sadržaj je koncipiran tako da čitatelja korak po korak vodi kroz postupke preuzimanja, pripreme i obrade satelitskih podataka, izračuna spektralnih indeksa te interpretacije dobivenih rezultata u kontekstu ekološkog stanja jezerskog sustava. Posebna pozornost posvećena je usporedbi satelitskih procjena s *in situ* mjerenjima, čime se naglašava važnost kombiniranog pristupa i validacije podataka.

Priručnik je namijenjen studentima, istraživačima, stručnjacima u području upravljanja vodama te svima koji se žele upoznati s mogućnostima suvremenih geoprostornih tehnologija u praćenju kakvoće površinskih voda. Nadamo se da će predstavljene metode i prikazane analitičke procedure olakšati razumijevanje i primjenu satelitskih podataka te poslužiti kao temelj za daljnja istraživanja i unapređenje sustava praćenja vodenih ekosustava.

Autori



DEFINICIJA I VAŽNOST KAKVOĆE VODE

Voda je jedan od najvažnijih prirodnih resursa (Hounslow, 2018). Osim što je ključna za očuvanje života i zdravlja ljudi, ona ima neprocjenjivu ulogu u poljoprivredi, industriji, energetici te održavanju prirodnih ekosustava. U suvremenom društvu, u kojem su pritisci na okoliš sve veći, sve se više naglašava važnost ne samo dostupnosti vode nego i njezine kakvoće. U kontekstu klimatskih promjena, rasta populacije i sve većeg pritiska na vodne resurse, očuvanje kakvoće vode postaje ključni izazov 21. stoljeća. Povećane potrebe za vodnim resursima u svrhe poput javne opskrbe, poljoprivrede, industrije i rekreacije, rezultiraju smanjenjem količine dostupne vode te pogoršanjem njezine kakvoće. Nadalje, povećanje učestalosti i intenziteta ekstremnih pojava uzrokovanih klimatskim promjenama, kao što su suše, dodatno opterećuju resurse slatke vode (Rebelo i sur., 2020). Osim navedenog, na kakvoću vode utječe niz drugih čimbenika, uključujući porast broja stanovnika, urbanizaciju, kanalizacijske sustave, ispiranje tla, eroziju stijena, promjene u korištenju zemljišta te primjenu gnojiva. Kao rezultat navedenih čimbenika dolazi do onečišćenja površinskih voda poput jezera, povećanog rizika od eutrofikacije te smanjenja bioraznolikosti (Bhagowati i Ahamad, 2019; Qin i sur., 2013; Vinçon-Leite i Casenave, 2019).

Definiranje i razumijevanje kakvoće vode ključno je za učinkovito upravljanje vodnim resursima i zaštitu okoliša. Jasna i precizna definicija pomaže u praćenju stanja vode, prepoznavanju prijetnji i onečišćenja te donošenju adekvatnih mjera za očuvanje vodnih resursa. Bez zajedničkog razumijevanja što kakvoća vode obuhvaća, teško je postaviti ciljeve zaštite, razviti politike i zakone te provoditi praćenje i nadzor ekosustava. U konačnici, razumijevanje i definiranje kakvoće vode pridonosi održivom korištenju prirodnih resursa i podržava ekonomske i društvene aktivnosti povezane s vodom, poput poljoprivrede, ribarstva i rekreacije.

Nadalje, autori ističu da Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) naglašava da je definiranje kakvoće vode složen proces s obzirom na to da na nju utječe niz različitih čimbenika te velik broj fizičkih, kemijskih i bioloških parametara koji se mogu kvantitativno pratiti (Votruba i Corman, 2020). Kakvoća vode definira se kao skup fizičkih, kemijskih, bioloških i drugih svojstava koja određuju prikladnost vode za određenu svrhu, bilo da se radi o konzumaciji, navodnjavanju, industrijskoj primjeni bilo o rekreaciji. Ta svojstva određuju se putem različitih parametara poput pH, koncentracije nitrata, razine otopljenog kisika, temperature, saliniteta, mutnoće, prozirnosti i brojnih drugih (Boyd, 2020; Omer, 2020).

Očuvanje biološke raznolikosti vodenih ekosustava predstavlja izazov za suvremenu znanost zbog njihove ključne uloge u održavanju funkcije ekosustava (Munari i sur., 2010; Stendera i sur., 2012). Jezera, kao važni ekosustavi za očuvanje biološke raznolikosti i podršku ljudskim aktivnostima, suočavaju se s globalnim problemima poput eutrofikacije i prekomjernog rasta algi, što značajno narušava njihovu ekološku ravnotežu (Binding i sur., 2023; Feng i sur., 2024; Ma i sur., 2025; Peng i sur., 2024; Yao i sur., 2025). Stoga praćenje kakvoće jezerske vode postaje ključno jer omogućava pravovremeno otkrivanje promjena i prijetnji u vodenim ekosustavima. Sustavno praćenje i analiza fizičkih, kemijskih i bioloških parametara vodenih tijela pomaže u očuvanju ekološke ravnoteže, podržava donošenje učinkovitih mjera zaštite i osigurava dugoročnu održivost jezerskih staništa. Da bi se rezultati prikupljenih parametara pravilno razumjeli i interpretirali, nužno je poznavati konkretne parametre koji se analiziraju, njihovo značenje i granične vrijednosti. U nastavku priručnika razmotrit će se fizički, kemijski i biološki parametri kakvoće vode, s posebnim naglaskom na one parametre koji imaju ključnu ulogu u modeliranju stanja vodnih tijela u okviru softvera SNAP. Razumijevanje tih parametara i njihovih međusobnih odnosa od presudne je važnosti za točnu interpretaciju rezultata te za pouzdanu procjenu kakvoće jezerskih voda.

1.1. Parametri kakvoće vode

Kakvoća vode ključna je za zdravlje ekosustava i ljudi, no voda gotovo uvijek sadrži određenu količinu kontaminanata (Bhateria i Jain, 2016; Boyd, 2020). Bez obzira na njihov izvor, ti kontaminanti mogu nastati kao posljedica prirodnih procesa ili ljudskih djelatnosti (Bhateria i Jain, 2016; Wu i sur., 2023). Procjena kakvoće vode

obuhvaća širok spektar parametara, a odabir specifičnih kriterija ovisi o ciljevima istraživanja. Jezera predstavljaju jedinstven sustav za proučavanje međusobnog utjecaja različitih parametara kakvoće vode (Vasistha i Ganguly, 2020). Za procjenu kakvoće jezerske vode najčešće se koriste tri skupine kriterija: fizički, kemijski i biološki koji zajedno pružaju cjelovitu sliku o stanju vodenog tijela (Hassan Omer, 2020; Ramesh i sur., 2018). Svaka od navedenih skupina parametara ima specifičnu funkciju u procjeni ekološkog stanja vodenih tijela, identifikaciji izvora onečišćenja te u potpori donošenju znanstveno utemeljenih odluka u kontekstu upravljanja i zaštite jezerskih ekosustava.

Razumijevanje pojedinih parametara prvi je korak u procjeni kakvoće vode. U okviru primjene softvera SNAP, poznavanje navedenih parametara ključno je za validnu interpretaciju rezultata dobivenih obradom satelitskih snimaka te za njihovu pouzdanu usporedbu s podacima prikupljenima *in situ*.

Fizička svojstva jezerske vode predstavljaju ključne parametre za razumijevanje funkcionalnosti i dinamike ekosustava. U najvažnije fizičke parametre ubrajaju se temperatura, mutnoća, boja, vodljivost i salinitet (Hassan Omer, 2020; Wu i sur., 2023). Temperatura vode predstavlja jedan od ključnih parametara u procjeni ekološkog stanja i kakvoće vodenih ekosustava (Batina i Krtalić, 2024). Posebno je značajna jer kontrolira brzinu svih kemijskih reakcija te utječe na rast, razmnožavanje i otpornost riba. Nagle promjene temperature mogu biti pogubne za riblji fond s obzirom na to da brzine bioloških i kemijskih procesa ovise o temperaturnim uvjetima. Temperatura također utječe na sadržaj kisika u vodi (razina kisika opada s porastom temperature), brzinu fotosinteze vodenih biljaka i metaboličke stope vodenih organizama. Promjene temperature uzrokuju različiti faktori, uključujući vremenske uvjete, uklanjanje biljaka koje pružaju sjenu uz obale, stvaranje brana, ispuštanje hladne vode, urbane oborinske vode te pritoke podzemnih voda u jezero (Bhateria i Jain, 2016). Točno određivanje površinske temperature vode ima značajnu ulogu u istraživanjima klimatskih i meteoroloških procesa, pri čemu daljnja istraživanja omogućuju sustavno prikupljanje tih podataka. Međutim, na pouzdanost takvih mjerenja mogu utjecati čimbenici poput emisijske sposobnosti površine i atmosfere apsorpcije. Infracrveni radiometri omogućuju mjerenje površinske temperature vode s preciznošću od približno 0,5 °C, dok se optički senzori koriste za detekciju i uklanjanje utjecaja oblaka i magle (Batina i Krtalić, 2024).

Osim temperature, još jedan važan fizički parametar koji utječe na kakvoću vode jest salinitet. Iako se salinitet najčešće povezuje s morskim i estuarijskim sustavima,

njegova prisutnost u slatkovodnim jezerima također može imati značajne ekološke posljedice, osobito u uvjetima suše, isparavanja ili antropogenih utjecaja poput ispuštanja otpadnih voda. On utječe na gustoću vode, vodene struje te proces razmjene plinova između zraka i vode. Varijacije saliniteta u unutrašnjim vodama ovise o različitim čimbenicima kao što su padaline, isparavanje, dotok riječne vode te interakcije s oceanima i morima (Batina i Krtalić, 2024).

Razumijevanje dinamike saliniteta ključno je za praćenje promjena u ekološkoj ravnoteži jezera te za detekciju mogućih izvora onečišćenja (Batina i sur., 2025).

Nadalje, mutnoća, kao još jedan važan fizički parametar, označava prisutnost suspendiranih i otopljenih čestica u vodi koje uzrokuju raspršivanje svjetlosti. Povišene koncentracije mutnoće smanjuju vidljivost vode i mogu transportirati zagađivače i hranjive tvari, čime utječu na primarnu proizvodnju, rast vodenih biljaka i kakvoću vode u jezerima (Batina i Krtalić, 2024).

Kemijska svojstva uključuju parametre poput pH-vrijednosti, koncentracije nutrijenata poput nitrata (NO_3), nitrita (NO_2), amonijaka (NH_4) i fosfata (PO_4), razine otopljenog kisika, prisutnosti teških metala, fosfora, dušika te ukupne otopljene tvari (Sun i sur., 2016; Tian i sur., 2022; Wu i sur., 2023). Važan kemijski parametar u određivanju kakvoće vode je pH koji se koristi za određivanje korozivne prirode vode pri čemu niže vrijednosti ukazuju na veću korozivnost. Nadalje, smanjena fotosintetska aktivnost, odnosno manja sposobnost usvajanja ugljikova dioksida i bikarbonata, tj. procesa koji pridonose povećanju pH-vrijednosti, povezana je s nižom koncentracijom kisika u vodi. Takve niže razine kisika obično se javljaju tijekom ljeta, kada su temperature više. Na pH vode mogu utjecati različiti čimbenici, a povišene pH-vrijednosti često ukazuju na to da je ravnoteža između ugljikova dioksida i karbonatno-bikarbonatnog sustava osjetljiva na promjene u fizičko-kemijskim uvjetima okoliša (Patil i sur., 2012).

Još jedan bitan kemijski parametar kakvoće vode jest otopljeni kisik. Njegova prisutnost u vodenim ekosustavima pruža važne informacije, i izravne i neizravne, o procesima poput bakterijske razgradnje, fotosinteze, prisutnosti hranjivih tvari te vertikalne slojevitosti vode. Kako temperature rastu tijekom ljeta, koncentracija otopljenog kisika u vodi opada, što je posljedica povećane temperature i intenzivnije aktivnosti mikroorganizama. Međutim, visoke razine zabilježene ljeti također se mogu pripisati duljem trajanju Sunčeve svjetlosti i višim temperaturama koje povećavaju topljivost plinova poput kisika i ugljikova dioksida. Dulji dani i jaka Sunčeva svjetlost potiču aktivniju fotosintezu fitoplanktona, pri čemu se smanjuje

količina CO₂, a povećava oslobađanje kisika, što može objasniti povećane koncentracije O₂ u toplijem razdoblju (Patil i sur., 2012).

Biološka svojstva uključuju parametre kao što su koncentracija klorofila, riblja biomasa, indeks biološkog integriteta, planktoni (zooplanktoni i fitoplanktoni) (Tian i sur., 2022; Wu i sur., 2023) te prisutnost bakterija, algi, virusa i protozoa (Hassan Omer, 2020). Najvažniji biološki parametar kod procjene kakvoće jezerske vode jest klorofil *a*. Fotosinteza predstavlja temeljni proces kod biljaka i fotosintetskih organizama kojim se svjetlosna energija pretvara u energiju potrebnu za metaboličke procese, pri čemu je klorofil *a* najistaknutiji pigment uključen u taj proces. Klorofil *a* služi kao važan indikator primarne proizvodnje u vodenim ekosustavima, stupnja trofije te razine hranjivih tvari, no njegova povišena koncentracija može dovesti do štetnih cvatnji algi, osobito toksičnih cijanobakterija. Povećanje tih cvatnji povezuje se s antropogenim unošenjem hranjivih tvari i klimatskim promjenama, što ističe važnost praćenja klorofila *a* u vodama (Batina i Krtalić, 2024).

Svi navedeni parametri omogućuju detaljno proučavanje međudjelovanja i njihov utjecaj na biološke procese unutar jezerskog sustava. U okviru ovog priručnika, ključni parametri koji će se analizirati jesu koncentracija klorofila *a* (conc_chl (mg/m³)) i koncentracija ukupne suspendirane tvari (conc_tsm (g/m³)), dobiveni algoritmom atmosferske korekcije C2RCC (engl. *Case 2 Regional Coast Colour*). Za potrebe ovog istraživanja provedena su terenska (*in situ*) mjerenja sondom EXO2s u svibnju 2025. godine na ukupno sedam postaja. Na sedam odabranih postaja provedeno je i dodatno uzorkovanje za potrebe laboratorijske analize. Navedeno je napravljeno s ciljem validacije modela generiranih u softveru SNAP i određivanja koncentracija ukupne suspendirane tvari (engl. *total suspended solids* – TSS) i njezine usporedbe s mutnoćom. Nadalje, u optičkom modeliranju TSS se sve češće koristi naizmjenično s TSM-om (*total suspended matter*) zbog njihove snažne korelacije u slatkovodnim sustavima zbog čega će se u ovom metodološkom pristupu TSM koristiti kao parametar. Cijeli proces modeliranja navedenih parametara opisan je u trećem poglavlju.

Modeliranje parametara kakvoće vode omogućuje praćenje njihovih prostorno-vremenskih promjena, pri čemu njihove vrijednosti čine osnovu za klasifikaciju jezera prema stupnju trofije. Poznavanje stupnja trofije ključno je za procjenu ekološkog stanja jezera, planiranja mjera zaštite i održivo upravljanje vodnim resursima.

1.2. Klasifikacija jezera prema stupnju trofije

Stupanj trofije označava razinu primarne proizvodnje organske tvari u vodi, koja se javlja kao rezultat povećanog unosa hranjivih tvari iz vanjskih izvora, posebno spojeva dušika i fosfora, u odnosu na uobičajene uvjete (NN 20/2023). Stoga se jezera klasificiraju na temelju sadržaja hranjivih tvari u četiri skupine: oligotrofna, mezotrofna, eutrofna i hipereutrofna. Oligotrofna jezera obilježava niska primarna produktivnost što je posljedica niskog sadržaja hranjivih tvari. Ta jezera imaju nisku proizvodnju algi što rezultira vrlo bistrom vodom visoke kakvoće. Nadalje, mezotrofna jezera obilježava srednja razina produktivnosti s bistrom vodom, potopljenim vodenim biljkama i srednjom razinom hranjivih tvari. S druge strane, prekomjerne količine hranjivih tvari, posebice dušika i fosfora, obilje vodenih biljaka i alga obilježja su eutrofnih jezera. Kada dominiraju vodene biljke, voda je u pravilu bistrija, no kada dominiraju alge, voda je tamnija. U procesu eutrofikacije vodenih sustava dolazi do intenzivnog rasta algi koje uzrokuju smanjenje količine kisika pri čemu dolazi do izumiranja životinjskih vrsta. Pod utjecajem eutrofikacije vodeni ekosustavi mijenjaju boju u tamnozelenu i smeđu. Hipereutrofna jezera vrlo su bogata hranjivim tvarima, karakterizirana su čestim i štetnim cvjetanjem algi i niskom produktivnošću. Prekomjerno cvjetanje algi može značajno smanjiti razinu kisika i u konačnici spriječiti odvijanje života na manjim dubinama, stvarajući mrtve zone ispod površine (Bhateria i Jain, 2016).

1.2.1. Zakonodavni i institucionalni okvir upravljanja vodama

U Hrvatskoj je Okvirna direktiva o vodama integrirana u nacionalno zakonodavstvo putem Zakona o vodama (NN 66/19, 84/21, 47/23) i Uredbe o standardu kakvoće voda (NN 96/19, 20/23, 50/23 – ispravak) koji propisuju standarde za ocjenu ekološkog i kemijskog stanja površinskih i podzemnih voda. Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije nadležno je za upravljanje vodama i politiku u tom području, predlaže zakone i propise, provodi inspekcijski nadzor te potiče međunarodnu suradnju. Institut za vode *Josip Juraj Strossmayer* prati stanje površinskih, priobalnih i podzemnih voda te izrađuje godišnja izvješća o stanju voda (Institut za vode, 2024).

Institut za vode izradio je Izvješće o stanju površinskih voda u Republici Hrvatskoj za 2023. godinu, pri čemu je stanje ocijenjeno na temelju kriterija propisanih u Uredbi o standardu kakvoće voda (NN 96/19, 20/23 i 50/23 – ispravak). Izvješće

je sastavljeno prema strukturi prethodnih izvješća koja su izrađivale Hrvatske vode radi usklađenosti, a temelji se na podacima dobivenima praćenjem površinskih voda provedenim tijekom 2023. godine (Institut za vode, 2024).

Ocjena stanja površinskih voda temelji se na procjeni ekoloških i kemijskih uvjeta, pri čemu se kao konačna uzima lošija ocjena.

Ekološko stanje procjenjuje se u skladu s člankom 15. Uredbe o standardu kakvoće voda (NN 96/19, 20/23, 50/23 – ispravak), pri čemu se koristi najniža vrijednost među ocjenama koje proizlaze iz nekoliko ključnih elemenata kakvoće, svrstanih u četiri glavne kategorije: biološki elementi, osnovni fizičko-kemijski elementi, specifične onečišćujuće tvari i hidromorfološki elementi. Za jezera u biološke elemente ubrajaju se fitoplankton, fitobentos, makrofiti, makrozoobentos i ribe. Osnovni fizičko-kemijski parametri obuhvaćaju, među ostalim, temperaturu, pH-vrijednost, otopljeni kisik, salinitet i koncentraciju hranjivih tvari. Specifične onečišćujuće tvari uključuju metale i njihove spojeve, kao što su arsen, bakar, cink i krom, dok hidromorfološki elementi obuhvaćaju hidrologiju i morfološke značajke vodenih tijela.

Da bi se osigurala pouzdanost u ocjeni ekološkog stanja, biološki elementi kakvoće nadziru se u trogodišnjim intervalima. Za izradu ocjene ekološkog stanja za 2023. godinu korišteni su podaci prikupljeni tijekom 2021., 2022. i 2023. godine. U slučajevima kada podaci za promatrano razdoblje nisu bili dostupni, korišteni su podaci iz 2020. godine. Od 2022. godine provodi se godišnje praćenje fitoplanktona, fitobentosa i makrozoobentosa, dok se makrofiti i riblje populacije prate u trogodišnjim intervalima, uzimajući u obzir prostornu dinamiku.

Hidromorfološki elementi podliježu praćenju svakih šest godina, pa se ocjena za 2023. temelji na podacima prikupljenima od 2018. do 2021. godine. S druge strane, fizičko-kemijski i kemijski parametri prate se na godišnjoj razini. Godišnje se izrađuje izvješće o kakvoći voda u Hrvatskoj koje se dostavlja nadležnom ministarstvu i ostalim dionicima.

Kemijsko stanje zasebno se procjenjuje na temelju koncentracija prioritetnih i opasnih tvari, pri čemu se uzima najlošija vrijednost rezultata. Kemijsko stanje podijeljeno je u dvije klase: „dobro kemijsko stanje” i „nije postignuto dobro kemijsko stanje”. Za „dobro stanje” potrebno je da nijedan od parametara ne prelazi propisane granične vrijednosti (Institut za vode, 2024).

Procjena kakvoće vode u jezerima temelji se na godišnjim prosječnim vrijednostima različitih fizičko-kemijskih i kemijskih parametara. Za specifične one-

čišćivače kakvoća se određuje na temelju prosječnih i maksimalnih godišnjih vrijednosti. Granice za kategorije ekološkog statusa ili potencijala definirane su u Pravilniku o standardima kakvoće voda. Površinske vode mogu se smatrati u dobrom stanju jedino ako istovremeno postižu vrlo dobro ili dobro ekološko stanje te zadovoljavajuće kemijsko stanje. Prema podacima dostupnim u Izvješću o stanju površinskih voda u Republici Hrvatskoj u 2023. godini za Vransko jezero kod Biograda utvrđeno je loše ekološko stanje. Loše stanje utvrđeno je prema makrofitima, makrozoobentosu te salinitetu. Ti parametri ukazuju na narušenu ekološku ravnotežu te prisutnost negativnih promjena u vodnom ekosustavu, koje mogu biti posljedica antropogenih pritisaka, ali i prirodnih procesa poput zaslanjivanja zbog blizine mora. S druge strane, procjena stupnja trofije, dobivena na temelju parametara eutrofikacije i analize fitoplanktona, upućuje na mezotrofni karakter jezera, što odgovara vrlo dobrom stanju u pogledu hranjivosti vode (Institut za vode, 2024). Ta razlika u rezultatima ukazuje na nesklad između različitih bioloških parametara što može biti posljedica specifične osjetljivosti svake skupine organizama na različite vrste pritisaka. Dok fitoplankton reagira primarno na hranjive tvari u vodi, makrofiti i makrozoobentos često su bolji indikatori dugoročnih promjena u staništu poput zaslanjivanja, eutrofikacije dna ili degradacije obalnih područja.

1.3. Metode određivanja kakvoće vode

Učinkovita procjena kakvoće vode često zahtijeva primjenu kombinacije različitih metoda, ovisno o specifičnosti područja istraživanja, ciljevima i dostupnim resursima (Bayable i sur., 2024; Chen i sur., 2024; Wilkinson i sur., 2020). Procjena i analiza kakvoće vode ključna je za očuvanje bioraznolikosti i stabilnosti vodenih ekosustava. Međutim, procjena kakvoće vode predstavlja značajan izazov, osobito u slučajevima velikih vodenih tijela i složenih skupova parametara koje je potrebno obraditi (Hounslow, 2018).

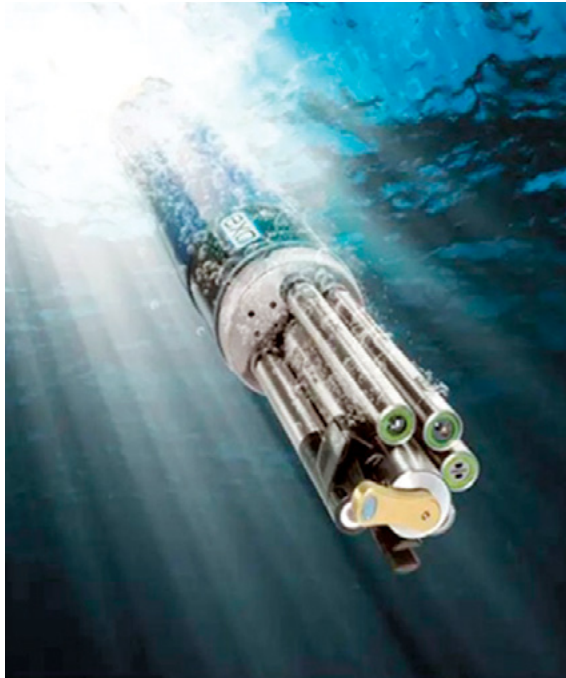
Konvencionalni pristupi u procjeni kakvoće vode temelje se na ručnom uzorkovanju vode, njihovu transportiranju u laboratorij te provođenju analiza za utvrđivanje općeg stanja vode (Koparan i sur., 2018). Iako su konvencionalne metode dugo bile temelj sustava praćenja kakvoće vode, suočavaju se s nizom izazova koji ograničavaju njihovu učinkovitost. Prije svega, riječ je o tehnički zahtjevnim po-

stupcima koji uključuju značajne troškove i u pogledu ljudskih resursa i u pogledu opreme i logistike. Naime, oprema koja se koristi često je zastarjela, a njezino održavanje zahtijeva značajne troškove. Nadalje, sam višefazni proces koji uključuje uzorkovanje, transport i analizu povećava rizik od ljudskih pogrešaka koje utječu na točnost dobivenih podataka. Jedan od glavnih nedostataka ove metode jest što ne omogućuje kontinuirano praćenje u stvarnom vremenu što znatno otežava pravovremenu reakciju na promjene u okolišu i nije prikladna za predviđanje budućih promjena u kakvoći vode (Jan i sur., 2021). Osim toga, uzorci koji se ručno prikupljaju ne mogu dati informacije o kakvoći vode na različitim dubinama, a tradicionalne metode teško bilježe prostorne varijacije kakvoće vode na velikim područjima, što može otežati razumijevanje složenih vodenih ekosustava (Koparan i sur., 2018). Konvencionalne metode također imaju ograničenu učinkovitost u bilježenju horizontalne heterogenosti kakvoće vode na većim površinama što može otežati praćenje prostorne dinamike unutar složenih slatkovodnih vodenih ekosustava (Adjovu i sur., 2023).

1.3.1. In situ mjerenje sondom

S obzirom na brojne nedostatke konvencionalnih metoda za procjenu kakvoće vode, sve se češće primjenjuju suvremene tehnologije koje omogućuju prikupljanje podataka izravno na terenu. Napredak u razvoju prijenosnih senzora i mjernih instrumenata omogućio je izravno mjerenje čime se omogućuje brzo i pouzdano dobivanje podataka o trenutačnom stanju vodenog sustava (Jan i sur., 2021). Takav pristup značajno smanjuje mogućnost pojave pogrešaka povezanih s manipulacijom uzorcima te omogućuje kontinuirano praćenje.

Za učinkovito *in situ* praćenje kakvoće vode u slatkovodnim ekosustavima, posebice u jezerima, često se koriste višeparametarske sonde koje omogućuju istovremeno mjerenje više fizičko-kemijskih parametara (Batina i sur., 2025a; Chen i sur., 2024; Feng i sur., 2024). Višeparametarske sonde mogu biti mobilne, u obliku ručnih uređaja ili integrirane s bespilotnim letjelicama (UAV), ili stacionarne, kada se trajno instaliraju na unaprijed određene točke unutar vodenog sustava. Posebno mjesto u okviru *in situ* tehnologija zauzimaju optički senzori koji sve više zamjenjuju tradicionalne laboratorijske metode zahvaljujući mogućnosti kontinuiranog mjerenja i visokoj razini preciznosti (Goblirsch i sur., 2023; Obrovski i sur., 2017; Zolfaghari i sur., 2020).



Slika 1. Višeparametarska sonda EXO2s (Xylem, 2020)

Način primjene sonde na terenu može se klasificirati u dvije temeljne kategorije:

- a) **Trajno postavljene sonde**, najčešće integrirane na bove ili plutajuće platforme, omogućuju neprekidno prikupljanje podataka na određenim dubinama vodenog stupca. Podatci se putem mobilnih mreža u stvarnom vremenu prenose u nadzorne centre omogućujući kontinuirani uvid u kakvoću vode. Stabilnost položaja sonde osigurana je GPS i sidrenim sustavima što sprječava varijacije u mjerenju uzrokovane pomicanjem tijekom valovitih uvjeta (Blažejewski i sur., 2024).
- b) **Povremena mjerenja sondama**, provedena putem čamaca ili bespilotnih letjelica, predstavljaju fleksibilniju alternativu u situacijama gdje nije moguće uspostaviti stacionarni nadzor. Ova metoda omogućuje brzo i ciljano prikupljanje podataka u plitkim ili teško dostupnim područjima. Korištenje bespilotnim letjelicama pritom značajno ubrzava proces mjerenja i omogućuje pravovremeno prepoznavanje mogućih onečišćenja (Fu i sur., 2024; Koparan i sur., 2018).

1.3.2. Višeparameterska sonda EXO2s

U okviru istraživanja kakvoće vode na Vranskom jezeru primijenjeno je *in situ* mjerenje s pomoću višeparameterske sonde EXO2s (Tablica 1). Ova metoda omogućuje istovremeno mjerenje više fizičkih i kemijskih parametara uključujući temperaturu, pH, otopljeni kisik, električnu vodljivost i mutnoću (Tablica 2).

Tvrtka Xylem, vlasnik Yellow Springs Incorporated (YSI), proizvodi nekoliko višeparameterskih sonda, uključujući EXO1, EXO2 i EXO3, koje su opremljene sensorima EXO za prikupljanje podataka. Sonda EXO2 (Slika 1) često se koristi u brojnim istraživanjima kakvoće vode (Batina i sur., 2025a; Comici, 2023; Espinola, 2017; Nelson i sur., 2017; Opsahl i sur., 2023; Stanić i Orlić, 2023; Wang i sur., 2016). Serija EXO-s slična je originalnoj seriji EXO po sensorima i dodatnoj opremi, ali je manja i financijski pristupačnija. Sonda EXO2s nudi visoku preciznost i pouzdana mjerenja u zahtjevnim uvjetima, s mogućnošću integracije za daljinsko praćenje podataka u stvarnom vremenu. Ta kompaktna sonda bez baterije dijeli iste tehničke mogućnosti i jamstvo kao i EXO2, što je čini prikladnom za specijalizirane primjene poput ugradnje na autonomna podvodna vozila (AUV), bespilotne letjelice, plutače ili horizontalno profiliranje gdje je lagana konstrukcija prednost. Sonda EXO2s pruža vrhunsku kakvoću podataka, ugrađene sustave za nadzor rada senzora, mogućnost višestrukog mjerenja s pomoću sedam univerzalnih priključaka za različite pametne senzore ili središnji čistač senzora. Ima komponente od titana i lako se integrira u sustave za praćenje morskih, estuarijskih, slatkovodnih i podzemnih voda. U usporedbi sa sondom EXO1, koja se koristi za manje složena istraživanja i pruža podatke o osnovnim parametrima, EXO2s podržava integraciju s drugim uređajima za prikupljanje i analizu podataka te ima dulji vijek trajanja baterije. Sonda EXO2s često se upotrebljava za ispitivanje kakvoće vode (Bennett i sur., 2014; Fu i sur., 2024; Harrison i sur., 2024; Wei i sur., 2022).

Tablica 1. Tehničke specifikacije višeparametarske sonde EXO2s (Xylem, 2020)

Memorija	>1 000 000 zapisanih očitavanja, ukupno 512 MB memorije
Softver	Kor Software
Računalno sučelje	YSIP putem USB Signal Output Adaptera (SOA) i Bluetootha
Izlazne opcije	RS-232 i SDI-12 putem DCP-SOA; Modbus i RS-485 putem Modbus-SOA
Napajanje	9 do 16 V
Radna temperatura	-5 do 50 °C
Temperatura skladištenja	-20 do 80 °C
Dubina rada	0 do 250 m
Brzina mjerenja	do 4 Hz (0.25 s)
Portovi za pametne senzore	7 (6 senzora i 1 središnji brisač)
Promjer	7.62 cm
Duljina	42.87 cm
Težina	1.06 kg

Tablica 2. Tehničke specifikacije senzora EXO (Xylem, 2020)

Senzor	Raspon	Rezolucija	Točnost
Klorofil <i>a</i>	0 do 100 RFU 0 do 400 µg/L	0.01 RFU ili 0.01 µg/L	Linearni koeficijent: $r^2 \geq 0.999$ za Rodamin WT u cijelom rasponu
Temperatura	-5 °C do 50 °C	0.001 °C	-5 do 35 °C: ± 0.01 °C 35 do 50 °C: ± 0.05 °C
fDOM	0 do 300 ppb QSE	0.01 ppb QSE	Linearni koeficijent: $r^2 \geq 0.999$ u rasponu 0–300 ppb QSE Minimalna granica detekcije: 0.0116 ppb QSE
pH	0 do 14 pH-jedinica	0.01 pH-jedinica	± 0.1 unutar ± 10 °C od kalibracijske temperature ± 0.2 za sve ostale temperature
Mutnoća	0-4000 FNU	0.01 FNU	0-999 FNU: 0.3 FNU ili ± 3 % 1000-4000 FNU: ± 5 %
ORP	-999 do 999 mV	0.1 mV	± 20 mV
Otopljeni kisik	0 do 50 mg/L	0.01 mg/L	0-20 mg/L: 0.1 mg/L ili ± 1 % 20-50 mg/L: ± 5 %
Zasićenje kisikom	0 do 500 % zasićenja	0.1 % zasićenja	0-200 %: ± 1 % 200-500 %: ± 5 %
Dubina	0 do 250 m	0.001 m	± 0.04 % od pune skale
Električna vodljivost	0 do 200 mS/cm	0.0001 mS/cm	0–100 mS/cm: ± 0.001 mS/cm ili ± 0.5 % 100–200 mS/cm: ± 1 %

Unatoč visokoj preciznosti i neposrednosti koju pruža, *in situ* metoda ima određena ograničenja. Među najznačajnijima su visoki troškovi opreme, ograničen prostor obuhvata, logistička složenost pristupa udaljenim ili nepristupačnim lokacijama te nedovoljna učestalost mjerenja, što otežava detekciju dugoročnih promjena u kakvoći vode (Deng i sur., 2024). S obzirom na prostorna i logistička ograničenja *in situ* metoda, javlja se potreba za integracijom tehnologija koje omogućuju širu i učinkovitiju prostornu analizu. U tom kontekstu, geoprostorne tehnologije, poput daljinskih istraživanja i geografskih informacijskih sustava (GIS), postaju ključan alat u suvremenom praćenju vodenih ekosustava.

1.3.3. Uzorkovanje vode za laboratorijska mjerenja

Uzorkovanje vode za laboratorijska testiranja predstavlja temeljnu metodu praćenja stanja vodenih sustava i jednu od ključnih komponenti u procjeni kakvoće vode. Proces se provodi prema standardiziranim protokolima, a cilj mu je prikupiti reprezentativan uzorak koji vjerno odražava kemijska, fizička i biološka svojstva vode u određenom trenutku. Uzorkovanje se obično provodi na unaprijed određenim postajama raspoređenima po vodenom tijelu, pri čemu se posebna pažnja posvećuje reprezentativnosti lokacije, dubini uzorkovanja i trenutačnim okolišnim uvjetima.

Metodologija uzorkovanja ovisi o cilju istraživanja i parametrima koji se analiziraju u laboratoriju. Najčešće se uzima površinski sloj vode s obzirom na to da je on najpodložniji kratkotrajnim promjenama i najrelevantniji za usporedbu s optičkim i daljinskim mjerenjima. Za dublje analize koriste se sonde, specijalizirane boce (npr. Niskin boce) ili automatski sustavi koji omogućuju uzorkovanje s različitih dubina. Tijekom samog uzorkovanja može se bilježiti niz terenskih parametara, poput temperature, pH-vrijednosti, električne vodljivosti, mutnoće i koncentracije otopljenog kisika, koji služe kao referentni kontekst za laboratorijske rezultate.

Nakon prikupljanja, uzorci se čuvaju i transportiraju u skladu s pravilima dobre laboratorijske prakse, uz kontrolu temperature i vremena do analize da bi se spriječila promjena kemijskog sastava. U laboratoriju se zatim provode analize poput određivanja klorofila *a*, koncentracije TSM-a, hranjivih soli, teških metala, organskih spojeva i drugih parametara kakvoće vode. Dobiveni podatci imaju ključnu ulogu u validaciji modela, u interpretaciji daljinskih mjerenja te u donošenju odluka vezanih za upravljanje vodenim ekosustavima.

LITERATURA

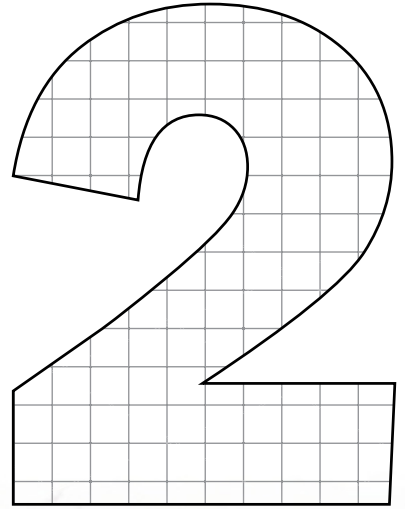
- ADJOVU, G. E., STEPHEN, H., JAMES, D., & AHMAD, S. (2023). Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters. *Remote Sensing*, 15(7), 1938. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
- BATINA, A., CUKROV, N., & ČUŽE DENONA, M. (2025). Spatiotemporal water quality analysis of Vrana Lake, Croatia. *Open Geosciences*, 17(1), 20250817. <https://doi.org/10.1515/geo-2025-0817>
- BATINA, A., & KRTALIĆ, A. (2024). Integrating Remote Sensing Methods for Monitoring Lake Water Quality: A Comprehensive Review. *Hydrology*, 11(7), 92. <https://doi.org/10.3390/hydrology11070092>
- BATINA, A., ŠILJEG, A., & PEDIĆ, G. (2025). *Salinity dynamics in Vrana Lake, Croatia: Seasonal variations and spatial distribution*. 2nd International Scientific Symposium – Interdisciplinary Approach to the Scientific Research of the Adriatic Sea (InspireAdriatic 2025).
- BAYABLE, G., CAI, J., MEKONNEN, M., LEGESSE, S. A., ISHIKAWA, K., SATO, S., & KUWAHARA, V. S. (2024). Spatiotemporal variability of lake surface water temperature and water quality parameters and its interrelationship with water hyacinth biomass in Lake Tana, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(33), 45929–45953. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34212-x>
- BENNETT, T. J., GRAHAM, J. L., FOSTER, G. M., STONE, M. L., JURACEK, K. E., RASMUSSEN, T. J., & PUTNAM, J. E. (2014). *U.S. Geological Survey quality-assurance plan for continuous water-quality monitoring in Kansas* (No. Open-File Report; p. 70).
- BHAGOWATI, B., & AHAMAD, K. U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(1), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>
- BHATERIA, R., & JAIN, D. (2016). Water quality assessment of lake water: A review. *Sustainable Water Resources Management*, 2(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7>
- BINDING, C. E., ZENG, C., PIZZOLATO, L., BOOTH, C., VALIPOUR, R., FONG, P., ZASTEPA, A., & PASCOE, T. (2023). Reporting on the status, trends, and drivers of algal blooms on Lake of the Woods using satellite-derived bloom indices (2002–2021). *Journal of Great Lakes Research*, 49(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.12.007>

- BŁAŻEJEWSKI, A., PECOLT, S., GRUNT, M., WIECZOREK, G., & KRÓLIKOWSKI, T. (2024). Multi-domain, Autonomous Measurement Buoy as an Element of the Water Quality Monitoring and Early Warning System in Rivers and Water Reservoirs. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 26, 18–29. <https://doi.org/10.54740/ros.2024.002>
- BOYD, C. E. (2020). *Water Quality: An Introduction*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>
- CHEN, F., LI, S., & SONG, K. (2024). Remote sensing of lake chlorophyll-a in Qinghai-Tibet Plateau responding to climate factors: Implications for oligotrophic lakes. *Ecological Indicators*, 159, 111674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111674>
- COMICI, C. (2023). *Test di controllo della sonda multiparametrica YSI EXO 2 s/n 21L104106 (5.12 Altro; Relazione Interna OGS 2023/36)* (No. Relazione Interna OGS 2023/36). National Institute of Oceanography and Applied Geophysics.
- DENG, Y., ZHANG, Y., PAN, D., YANG, S. X., & GHARABAGHI, B. (2024). Review of Recent Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Lake Water Quality Management. *Remote Sensing*, 16(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/rs16224196>
- ESPINOLA, B. (2017). *Statistical analysis of water data from an online EXO2 monitoring sonde: Modelling Chlorophyll-a using an EXO2 sonde* [Thesis, Metropolia University of Applied Sciences]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705107417>
- FENG, L., WANG, Y., HOU, X., QIN, B., KUTSER, T., QU, F., CHEN, N., PAERL, H. W., & ZHENG, C. (2024). Harmful algal blooms in inland waters. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(9), 631–644. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00578-2>
- FU, L., LO, Y., LU, T. C., & ZHANG, C. (2024). Water Quality Inversion of UAV Multispectral Data Using Machine Learning. In K. Papadikis, C. Zhang, S. Tang, E. Liu, & L. Di Sarno (Eds), *Towards a Carbon Neutral Future* (Vol. 393, pp. 357–365). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7965-3_31
- GOBLIRSCH, T., MAYER, T., PENZEL, S., RUDOLPH, M., & BORSODORF, H. (2023). In Situ Water Quality Monitoring Using an Optical Multiparameter Sensor Probe. *Sensors*, 23(23), 9545. <https://doi.org/10.3390/s23239545>
- HARRISON, J., OSBURN, C., HARRIS, A., & NELSON, N. (2024). Tryptophan-Like Fluorescence for Monitoring Fecal Contamination in a Marsh-Dominated Estuary. *ACS ES&T Water*, 4(12), 5633–5644. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00644>
- HASSAN OMER, N. (2020). Water Quality Parameters. In K. Summers (Ed.), *Water Quality—Science, Assessments and Policy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>

- HOUNSLOW, A. W. (2018). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation* (1st edn). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203734117>
- Institut za vode. (2024). *Izješće o stanju površinskih voda u Republici Hrvatskoj u 2023. Godini*. Institut za vode 'Josip Juraj Strossmayer'.
- JAN, F., MIN-ALLAH, N., & DÜŞTEGÖR, D. (2021). IoT Based Smart Water Quality Monitoring: Recent Techniques, Trends and Challenges for Domestic Applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- KOPARAN, C., KOC, A., PRIVETTE, C., & SAWYER, C. (2018). In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. *Water*, 10(3), 264. <https://doi.org/10.3390/w10030264>
- MA, J., DUAN, H., CHEN, C., CAO, Z., SHEN, M., QI, T., & CHEN, Q. (2025). Projected response of algal blooms in global lakes to future climatic and land use changes: Machine learning approaches. *Water Research*, 271, 122889. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122889>
- MUNARI, C., TESSARI, U., ROSSI, R., & MISTRI, M. (2010). *The ecological status of Karavasta Lagoon (Albania): Closing the stable door before the horse has bolted?* 69(1), 10–17.
- NELSON, N. G., MUÑOZ-CARPENA, R., NEALE, P. J., TZORTZIOU, M., & MEGONIGAL, J. P. (2017). Temporal variability in the importance of hydrologic, biotic, and climatic descriptors of dissolved oxygen dynamics in a shallow tidal-marsh creek. *Water Resources Research*, 53(8), 7103–7120. <https://doi.org/10.1002/2016WR020196>
- OBROVSKI, B., BAJIĆ, J., MIHAJLOVIĆ, I., MILORADOV, M. V., BATINIĆ, B., ADAMOVIĆ, D., & RAJS, V. (2017). *Sensor technology for monitoring of aquatic medium*.
- OMER, N. H. (2020). Water Quality Parameters. In K. Summers (Ed.), *Water Quality—Science, Assessments and Policy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>
- Opsahl, S. P., Beltran, J. I., & Ockerman, D. J. (2023). *Bathymetric, Hydrodynamic, Biological, and Water-Quality Characteristics of a Nearshore Area of the Laguna Madre Near South Padre Island, Texas, 2021–22* (Scientific Investigations Report No. Scientific Investigations Report; p. 19). U.S. Geological Survey.
- PATIL, P. N., SAWANT, D. V., & DESHMUKH, R. N. (2012). *Physico-chemical parameters for testing of water – A review*. 3(3), 1194–1207.
- PENG, J., CHEN, J., LIU, S., LIU, T., DENG, F., FAN, Y., & DE MAEYER, P. (2024). Dynamics of the risk of algal blooms induced by surface water temperature in an alpine eutrophic lake under climate warming: Insights from Lake Dianchi. *Journal of Hydrology*, 643, 131949. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131949>

- QIN, B., GAO, G., ZHU, G., ZHANG, Y., SONG, Y., TANG, X., XU, H., & DENG, J. (2013). Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 58(9), 961–970. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5560-x>
- RAMESH, T., DOWNS, C. T., & O'BRIEN, G. C. (2018). Movement response of Orange-Vaal largemouth yellowfish (*Labeobarbus kimberleyensis*) to water quality and habitat features in the Vaal River, South Africa. *Environmental Biology of Fishes*, 101(6), 997–1009. <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0754-y>
- REBELO, A., QUADRADO, M., FRANCO, A., LACASTA, N., & MACHADO, P. (2020). Water reuse in Portugal: New legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. *Water Cycle*, 1, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.006>
- STANIĆ, I., & ORLIĆ, S. (2023). Microbial Diversity along the Oxycline in Two Lake Systems. In *Symposium on Aquatic Microbial Ecology – SAME17* (pp. 113–113).
- STENDERA, S., ADRIAN, R., BONADA, N., CAÑEDO-ARGÜELLES, M., HUGUENY, B., JANUSCHKE, K., PLETTERBAUER, F., & HERING, D. (2012). Drivers and stressors of freshwater biodiversity patterns across different ecosystems and scales: A review. *Hydrobiologia*, 696(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1183-0>
- SUN, Y., CHEN, Z., WU, G., WU, Q., ZHANG, F., NIU, Z., & HU, H.-Y. (2016). Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: Implications for resources utilization and management. *Journal of Cleaner Production*, 131, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.068>
- TIAN, S., GUO, H., XU, W., ZHU, X., WANG, B., ZENG, Q., MAI, Y., & HUANG, J. J. (2022). Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 18617–18630. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9>
- VASISTHA, P., & GANGULY, R. (2020). Water quality assessment of natural lakes and its importance: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 32, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.092>
- VINÇON-LEITE, B., & CASENAVE, C. (2019). Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 651, 2985–3001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.320>
- VOTRUBA, A. M., & CORMAN, J. R. (2020). Definitions of Water Quality: A Survey of Lake-Users of Water Quality-Compromised Lakes. *Water*, 12(8), 2114. <https://doi.org/10.3390/w12082114>

- WANG, Z. A., KROEGER, K. D., GANJU, N. K., GONNEEA, M. E., & CHU, S. N. (2016). Intertidal salt marshes as an important source of inorganic carbon to the coastal ocean. *Limnology and Oceanography*, 61(5), Article 5. <https://doi.org/10.1002/Lno.10347>
- WEI, Y., ZHANG, Z., ZHU, X., & YUE, Y. (2022). Correlation Research between Blue-green Algae and Water Quality Indicators Using Unmanned Surface Vehicle. *2022 International Conference on Environmental Science and Green Energy (ICESGE)*, 7–13. <https://doi.org/10.1109/ICESGE56040.2022.10180367>
- WILKINSON, A. A., HONDZO, M., & GUALA, M. (2020). Vertical heterogeneities of cyanobacteria and microcystin concentrations in lakes using a seasonal In situ monitoring station. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00838. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00838>
- WU, G., LI, J., & LUO, W. (2023). Spatial distribution, source apportionment, and assessment of marine water quality parameters in the Bohai Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 195, 115526. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115526>
- Xylem. (2020). *EXO sondes best-in-class platform for the highest-quality data*. YSI. https://observator.com/wp-content/uploads/2019/07/Datasheet_YSI-EXO.pdf
- YAO, L., WANG, W., YU, K., SONG, Z., LEI, K., & AN, L. (2025). Assessment of marine eutrophication: Challenges and solutions ahead. *Marine Pollution Bulletin*, 216, 117977. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117977>
- ZOLFAGHARI, K., WILKES, G., BIRD, S., ELLIS, D., PINTAR, K. D. M., GOTTSCHALL, N., McNAIRN, H., & LAPEN, D. R. (2020). Chlorophyll-a, dissolved organic carbon, turbidity and other variables of ecological importance in river basins in southern Ontario and British Columbia, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 67. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7800-x>

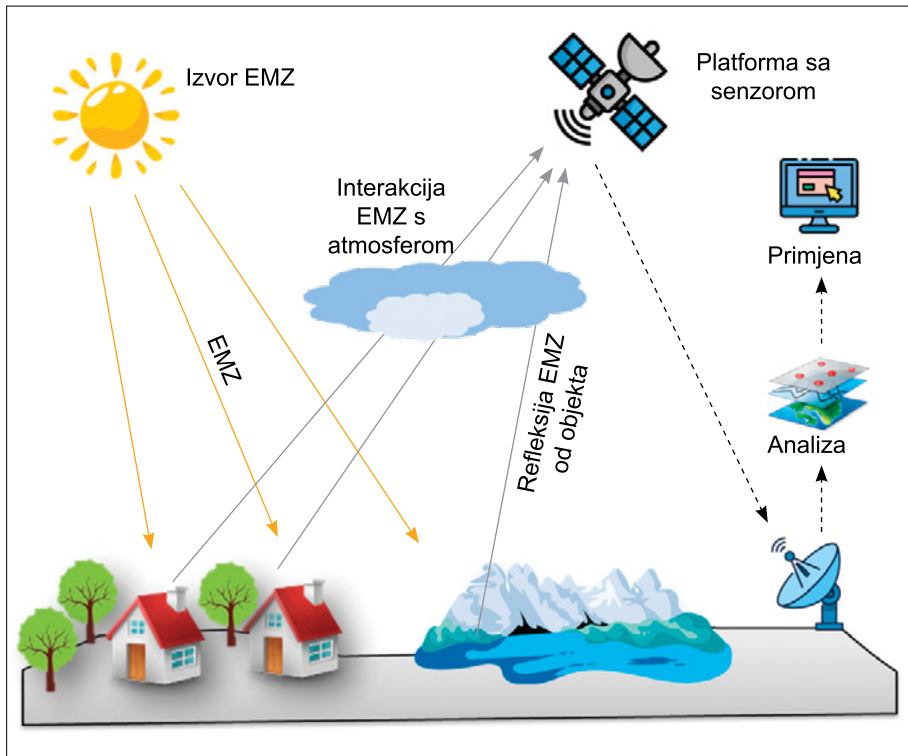


GEOPROSTORNE TEHNOLOGIJE

Geoprostorne tehnologije predstavljaju skup metoda, tehnika i postupaka koji omogućuju modeliranje složenih procesa i oblika na različitim razinama detaljnosti, ovisno o ciljevima istraživanja. Geoprostorne tehnologije, među ostalima, uključuju GIS, daljinska istraživanja i globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS) (Roland i sur., 2025; Šiljeg i sur., 2023). Tijekom istraživanja korišten je GNSS, primjerice GPS (engl. *Global Positioning System*), za precizno lociranje uzoraka na terenu. Time je osigurano točno prostorno pozicioniranje svakog uzorka, što je bilo ključno za daljnju analizu podataka. Temeljna prednost geoprostornih tehnologija ogleda se u njihovoj sposobnosti brzog prikupljanja velike količine prostornih podataka, analize prostornih odnosa te stvaranja osnove za kvalitetno donošenje odluka temeljenih na prostornim informacijama.

2.1. Daljinska istraživanja

Daljinska istraživanja (engl. *Remote Sensing*) definiraju se kao skup vještina i znanja za stjecanje informacija o nekoj pojavi, procesu ili objektu analizom podataka prikupljenih s pomoću senzora koji nije u fizičkom kontaktu s pojavom, procesom ili objektom istraživanja (Khorram i sur., 2012; Šiljeg i sur., 2023). Osnovni princip daljinskih istraživanja temelji se na interakciji elektromagnetskog zračenja (EMZ) s površinom objekta. Kada elektromagnetsko zračenje dosegne Zemljinu površinu, ono se može apsorbirati, reflektirati ili emitirati ovisno o svojstvima materijala. Svaki objekt na Zemlji ima svoj spektar refleksije, odnosno specifičan način na koji reflektira zračenje u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra. Analizom tih spektralnih svojstava moguće je identificirati i klasificirati površinske objekte, detektirati promjene tijekom vremena i kvantificirati različite



Slika 2. Princip daljinskih istraživanja

biogeofizičke parametre (Lillesand i sur., 2015).

Proces daljinskih istraživanja obuhvaća sedam ključnih faza koje uključuju (Slika 2):

- 1) izvor elektromagnetskog zračenja
- 2) put elektromagnetskih valova kroz atmosferu
- 3) interakciju s površinom
- 4) prikupljanje podataka o zračenju s pomoću senzora
- 5) prijenos, primanje i obradu
- 6) interpretaciju i analizu
- 7) primjenu.

Senzori koji se primjenjuju u daljinskim istraživanjima mogu se podijeliti na pasivne i aktivne, ovisno o načinu prikupljanja podataka. Pasivni senzori detektiraju prirodno elektromagnetsko zračenje, najčešće Sunčevo, koje se reflektira od Ze-

mljine površine, dok aktivni senzori sami emitiraju vlastiti izvor zračenja i mjere njegovu refleksiju, odnosno povratni signal s ciljne površine. Ti senzori mogu biti integrirani na različitim platformama čiji se izbor temelji na specifičnim ciljevima istraživanja. Satelitske platforme omogućuju globalni obuhvat i dugoročno praćenje promjena u okolišu, dok zračne platforme, koje uključuju avione i bespilotne letjelice (dronove), omogućuju detaljna i lokalizirana snimanja visoke prostorne rezolucije. Terestričke, odnosno kopnene platforme podrazumijevaju stacionarne senzore postavljene na tlu, koji se najčešće koriste u svrhu validacije podataka dobivenih iz zraka ili svemira (Coops i Tooke, 2017).

Jedna od ključnih prednosti daljinskih istraživanja jest mogućnost prikupljanja višespektralnih i hiperspektralnih podataka, čime se omogućuje detaljna spektralna analiza površinskih svojstava. Višespektralni senzori, poput instrumenata Sentinel-2 MSI i Landsat 8-9 OLI, snimaju površinu Zemlje u ograničenom broju širokih spektralnih kanala koji obuhvaćaju vidljivo, infracrveno i termalno područje elektromagnetskog spektra. Nasuprot tome, hiperspektralni senzori prikupljaju podatke u stotinama vrlo uskih i međusobno susjednih spektralnih kanala, čime se omogućuje detaljna identifikacija i kvantifikacija fizičkih i kemijskih karakteristika materijala na površini Zemlje (Coops i Tooke, 2017).

Osim spektralne rezolucije, za interpretaciju i primjenu podataka od ključne su važnosti i druge rezolucije. Prostorna rezolucija označava najmanju dimenziju objekta koja se može pouzdano detektirati na snimci te može varirati od nekoliko centimetara do nekoliko kilometara, ovisno o senzoru (npr. 10 m, 30 m, 1 km). Vremenska rezolucija odnosi se na učestalost snimanja istog područja, što je primjerice kod satelita Sentinel-2 svakih pet dana. Radiometrijska rezolucija određuje sposobnost senzora da razlikuje fine razlike u intenzitetu zračenja, izražena u bitovima (npr. 8-bit, 12-bit), dok se spektralna rezolucija odnosi na broj i širinu spektralnih kanala u kojima se podatci prikupljaju (Coops i Tooke, 2017; Zhu i sur., 2017).

Analiza podataka dobivenih daljinskim istraživanjima uključuje širok raspon metoda, od osnovne vizualne interpretacije do kompleksnih modela temeljnih na računalnoj obradi. Među klasičnim analitičkim pristupima ističu se izračun vegetacijskih indeksa, poput normaliziranog vegetacijskog indeksa razlike (engl. *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), klasifikacija zemljišnog pokrova, detekcija promjena tijekom vremena te izrada tematskih karata vodenih i zemljišnih površina.

S obzirom na rastući volumen i složenost podataka, sve veću važnost u ovom području imaju metode strojnog učenja i umjetne inteligencije. Algoritmi poput

Random Forest, Support Vector Machines i neuronskih mreža omogućuju automatiziranu klasifikaciju objekata visoke točnosti, kao i prediktivno modeliranje različitih okolišnih pojava, pri čemu se značajno oslanjaju na obilježja iz spektralnih, teksturnih i prostornih podataka (Zhu i sur., 2017).

U suvremenoj znanosti daljinska istraživanja predstavljaju ključnu tehnologiju u brojnim disciplinama, uključujući ekologiju, geoinformatiku, hidrologiju, urbanizam, poljoprivredu i klimatske znanosti. Osobito značajnu primjenu imaju u području praćenja i procjene kakvoće voda gdje omogućuju uvid u prostorno i vremenski promjenjive parametre vodenih tijela.

Daljinska istraživanja predstavljaju jednu od najnaprednijih tehnologija za procjenu kakvoće vode (Chen i sur., 2024; Yang i sur., 2022). Naime, jedan od glavnih izazova u praćenju kakvoće voda nedostupnost je terena, složena morfologija jezerskih i riječnih sustava, što može otežati ili čak onemogućiti *in situ* mjerenja te dodatno zahtijeva dugotrajan terenski monitoring. U tom kontekstu, daljinska istraživanja nude vrijednu alternativu zahvaljujući mogućnosti prikupljanja podataka na velikim prostornim razmjerima i u kratkim vremenskim intervalima (Adjovu i sur., 2023; Chen i sur., 2024; Deng i sur., 2024; Šiljeg i sur., 2024; Yang i sur., 2022). Ova tehnologija omogućuje detekciju ključnih parametara kakvoće vode uključujući koncentraciju klorofila *a*, ukupnih suspendiranih tvari, prozirnost vode, trofički status te prisutnost algi i fitoplanktona (Adjovu i sur., 2023; Deng i sur., 2024).

Daljinska istraživanja omogućuju široko prostorno pokrivanje i učinkovito praćenje nepristupačnih ili teško dostupnih područja čime se osigurava dugoročna i sustavna vremenska analiza. Prednost im je u objektivnosti i ponovljivosti prikupljenih podataka, uz mogućnost postizanja visoke razine detalja, ovisno o prostornoj rezoluciji senzora. Također, njihova integracija s geografskim informacijskim sustavima (GIS) značajno proširuje analitičke mogućnosti u prostornom planiranju i upravljanju resursima.

Unatoč brojnim prednostima, daljinska istraživanja suočavaju se s određenim ograničenjima uključujući atmosferske utjecaje (npr. oblake kod pasivnih senzora), potrebu za validacijom s pomoću terenskih podataka te zahtjevne računalne resurse zbog obrade velikih količina podataka. Nadalje, znatni tehnološki razvoj bespilotnih letjelica omogućio je kontinuirano praćenje kakvoće vode koristeći podatke visoke spektralne, vremenske i prostorne rezolucije koje prikupljaju dronovi. Ipak, njihova primjena uključuje izazove poput povećanih troškova te ograničenja u kapacitetu i tehničkim mogućnostima za snimanje opsežnih područja jezera

(Chen i sur., 2024; Deng i sur., 2024). Unatoč ograničenjima, bespilotne letjelice sve se češće koriste zbog mogućnosti prikupljanja vrlo detaljnih podataka u stvarnom vremenu. Tehnološki napredak omogućio je njihovo opremanje raznovrsnim sensorima, uključujući RGB kamere, višespektralne i hiperspektralne senzore te LiDAR sustave, čime se značajno proširuju mogućnosti detekcije različitih fizičko-kemijskih svojstava vode (Batina i Krtalić, 2024). Međutim, dodatni izazovi uključuju visoke troškove opreme i obrade podataka, ograničeno trajanje leta te nedostatnu pokrivenost većih područja (Chen i sur., 2024).

Satelitske i zračne metode daljinskih istraživanja, uključujući one izvedene putem zrakoplova i bespilotnih letjelica, značajne su za procjenu kakvoće voda u slatkovodnim ekosustavima (Batina i Krtalić, 2024). Uzimajući u obzir ograničenja primjene bespilotnih letjelica, satelitske snimke predstavljaju značajnu i često učinkovitiju alternativu za praćenje kakvoće voda, osobito na većim prostornim razmjerima. Satelitski sustavi omogućuju redovito i široko prostorno i vremensko pokrivanje čime doprinose sustavnom i kontinuiranom praćenju stanja vodenih ekosustava. Višespektralni podatci, dostupni za daljinsko praćenje i procjenu kakvoće vode, uključuju brojne senzore među kojima su najčešće korišteni višespektralni sustavi MSS (engl. *Multispectral Scanner System*), TM (engl. *Thematic Mapper*), ETM+ (engl. *Enhanced Thematic Mapper Plus*), OLI (engl. *Operational Land Imager*) na platformama Landsat te višespektralni senzori na satelitima Sentinel-2 (Šiljeg i sur., 2024; Yang i sur., 2022).

U novije vrijeme sve se veća važnost pridaje upotrebi umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence* – AI) i strojnog učenja u analizi podataka daljinskih istraživanja. Algoritmi strojnog učenja, kao što su regresijski modeli, neuronske mreže i algoritmi dubokog učenja, koriste se za automatizaciju interpretacije snimaka i procjenu parametara kakvoće vode s visokom točnošću (Adjovu i sur., 2023; Zhu i sur., 2023). Time se dodatno smanjuje potreba za skupim i dugotrajnim terenskim radovima.

U konačnici, primjena daljinskih istraživanja za praćenje kakvoće vode donosi prednosti poput širokog prostornog i vremenskog obuhvata te brze dostupnosti podataka za gotovo trenutačnu analizu i detekciju promjena. Ipak, zbog ograničenja poput točnosti, utjecaja atmosferskih uvjeta i potrebe za terenskim uzorcima radi validacije, daljinska istraživanja ne mogu u potpunosti zamijeniti konvencionalne metode praćenja kakvoće vode. Stoga je najefikasniji pristup kombinacija daljinskih istraživanja i *in situ* mjerenja, čime se postiže komplementarnost podataka i značajno unapređuje cjelokupna procjena stanja vodnih sustava.

Za procjenu kakvoće vode tijekom jednog mjeseca, na primjeru Vranskog jezera, koristit će se snimke satelita Sentinel-2C (razina proizvoda L1C). Ove snimke omogućuju visokokvalitetne višespektralne podatke koji su prikladni za praćenje promjena u vodenom okolišu (Batina, 2023).

2.2. Satelitske snimke Sentinel-2

Program Copernicus predstavlja značajan iskorak u upravljanju okolišem, razumijevanju i ublažavanju posljedica klimatskih promjena te u zaštiti svakodnevnog života stanovništva, koristeći podatke dobivene metodama daljinskih istraživanja (Batina, 2023).

U okviru programa Copernicus, misija Sentinel-2 ima ključnu operativnu i znanstvenu ulogu. Sastoji se od konstelacije triju identičnih satelita koji kruže u istoj Sunčevoj sinkronoj orbiti, raspoređeni tako da omogućuju optimalnu vremensku učestalost snimanja. Sunčeva sinkrona orbita osigurava da satelit prolazi nad istim područjima u približno isto doba dana, što omogućuje usporedivost snimki kroz vrijeme (Copernicus SentiWiki, n. d.). Tri satelita raspoređena u orbiti omogućuju gotovo potpuno pokrivanje kopnenih površina Zemlje, velikih otoka te unutar njih i obalnih voda svakih pet dana na ekvatoru. Ipak, pojedine snimke ponekad samo djelomično pokrivaju Vransko jezero, što je posljedica kombinacije nekoliko čimbenika: ograničene širine senzorskog pojasa, preklapanja orbita, tehničkih karakteristika senzora te vremenskih uvjeta poput oblačnosti ili sjena. Zbog toga određeni dijelovi jezera u pojedinom preletu mogu biti izostavljeni ili zamagljeni, a za potpunu pokrivenost često je potrebno koristiti više preleta i metapodatke koji omogućuju preciznu analizu cijelog područja.

Sateliti Sentinel-2 opremljeni su naprednim višespektralnim sensorima visoke prostorne i spektralne rezolucije, koji obuhvaćaju 13 spektralnih kanala. Ti instrumenti omogućuju promatranje u vidljivom, bliskom i kratkovalnom infracrvenom dijelu spektra, s prostornom rezolucijom od 10, 20 i 60 metara, ovisno o spektralnom kanalu, te sa širinom trake snimanja od 290 km. Kombinacija tih tehničkih značajki pruža detaljan i frekventan uvid u stanje površine Zemlje i vegetacijskih pokrova.

Glavne primjene misije Sentinel-2 uključuju praćenje poljoprivrednih i šumarskih aktivnosti, s posebnim naglaskom na upravljanje proizvodnjom hrane i sigurnost

opskrbe. Satelitski podatci omogućuju izračun različitih vegetacijskih indeksa, poput NDVI, indeksa sadržaja klorofila i vode, što je ključno za procjenu zdravstvenog stanja usjeva i modeliranje prinosa.

Uz to, Sentinel-2 omogućuje kartiranje promjena u pokrovu tla, detekciju degradacije šumskih ekosustava te nadzor kakvoće voda u jezerima i obalnim područjima. Satelitski podatci također pridonose upravljanju prirodnim katastrofama, kao što su poplave, vulkanske erupcije i odroni tla, osiguravajući pravovremenu podršku humanitarnim i kriznim intervencijama.

Razvoj misije Sentinel-2 rezultat je suradnje između Europske svemirske agencije (ESA), Europske komisije, industrijskih partnera, pružatelja usluga i korisnika podataka. Tehnički razvoj vodio je Airbus Defence and Space, uz potporu francuske svemirske agencije CNES (za optimizaciju kvalitete snimki) te njemačkog svemirskog centra DLR (za unapređenje prijenosa podataka putem optičke komunikacije). Dosad su lansirana tri satelita Sentinel-2 prema sljedećem rasporedu: Sentinel-2A (23. lipnja 2015.), Sentinel-2B (7. ožujka 2017.) i Sentinel-2C (5. rujna 2024.) (ESA, 2024).

2.3. Sentinel Application Platform – SNAP

SNAP (engl. *Sentinel Application Platform*) višenamjenski je softverski alat razvijen u okviru programa Copernicus. Razvila ga je ESA i partnerske organizacije. Dizajniran je kao zajednička platforma za obradu, vizualizaciju i analizu podataka sa satelita Sentinel, uključujući Sentinel-1, Sentinel-2 i Sentinel-3.

Za potrebe Sentinel-2, SNAP predstavlja ključni alat za obradu višespektralnih optičkih podataka visoke prostorne i spektralne rezolucije. Softver podržava cjelokupni lanac obrade podataka, od sirovih podataka (Level-1C) do atmosferski korigiranih proizvoda (Level-2A), uključujući širok spektar analitičkih funkcija i algoritama.

SNAP koristi standardizirani BEAM-DIMAP format, ali omogućuje i izvoz u formate kao što su GeoTIFF, JPEG2000, HDF5 te generiranje geolociranih metapodataka u skladu s OGC standardima. BEAM-DIMAP je format podataka koji se koristi za pohranu satelitskih snimki, posebno podataka iz programa Copernicus, poput Sentinel-1 i Sentinel-2 satelita. Razvila ga je ESA da bi standardizirala pohranu i razmjenu podataka s radarskih i optičkih senzora. Format se sastoji od dvije glavne komponente: DIMAP datoteke (DIM format), koja sadrži metapodatke o

snimkama poput prostorne reference, vremena snimanja i karakteristika senzora, te BIN datoteke (IMG ili DATA format), koja pohranjuje same rasterske podatke, odnosno vrijednosti piksela slike. BEAM-DIMAP omogućuje jednostavno učitavanje, obradu i analizu satelitskih podataka u softverima poput ESA SNAP Toolboxa, QGIS-a ili ENVI-ja, a njegova je prednost u standardiziranoj strukturi i bogatim metapodacima koji olakšavaju automatsku obradu i preciznu analizu satelitskih snimaka (ESA, n. d. b).

U sljedećem poglavlju detaljno su objašnjeni koraci u softveru SNAP za cjelokupan proces obrade satelitskih podataka za procjenu kakvoće vode.

LITERATURA

- ADJOVU, G. E., STEPHEN, H., JAMES, D., & AHMAD, S. (2023). Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters. *Remote Sensing*, 15(7), 1938. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
- BATINA, A. (2023). Data Cubes – A Modern Approach for Handling Earth Observation Data. *2023 International Conference on Earth Observation and Geo-Spatial Information (ICEOGI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEOGI57454.2023.10292958>
- BATINA, A., & KRTALIĆ, A. (2024). Integrating Remote Sensing Methods for Monitoring Lake Water Quality: A Comprehensive Review. *Hydrology*, 11(7), 92. <https://doi.org/10.3390/hydrology11070092>
- CHEN, F., LI, S., & SONG, K. (2024). Remote sensing of lake chlorophyll-a in Qinghai-Tibet Plateau responding to climate factors: Implications for oligotrophic lakes. *Ecological Indicators*, 159, 111674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111674>
- COOPS, N. C., & TOOKE, T. R. (2017). Introduction to remote sensing. In *Learning Landscape Ecology: A Practical Guide to Concepts and Techniques* (pp. 3–19). Springer New York.
- Copernicus SentiWiki. (n. d.). *S2 Mission*. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
- DENG, Y., ZHANG, Y., PAN, D., YANG, S. X., & GHARABAGHI, B. (2024). Review of Recent Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Lake Water Quality Management. *Remote Sensing*, 16(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/rs16224196>
- ESA. (2024). *Introducing Sentinel-2*. ESA. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2
- ESA. (n.d.). *STEP - Scientific Toolbox Exploitation Platform*. <https://step.esa.int/main/>
- KHORRAM, S., KOCH, F. H., VAN DER WIELE, C. F., & NELSON, S. A. (2012). *Remote sensing*. Springer Science & Business Media.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (Seventh edition). Wiley.
- ROLAND, V., BATINA, A., & TASIĆ, D. (2025). *Praktična primjena GIS alata: Primijenjeni zadatci*. Sveučilište u Zadru; Prehnit d.o.o.
- ŠILJEG, A., CUKROV, N., BATINA, A., & MARIĆ, I. (2024). *Spatial-temporal assessment of water quality dynamics using Sentinel-2 satellite data: Vrana Lake, Croatia*. 43rd CIESM Congress.

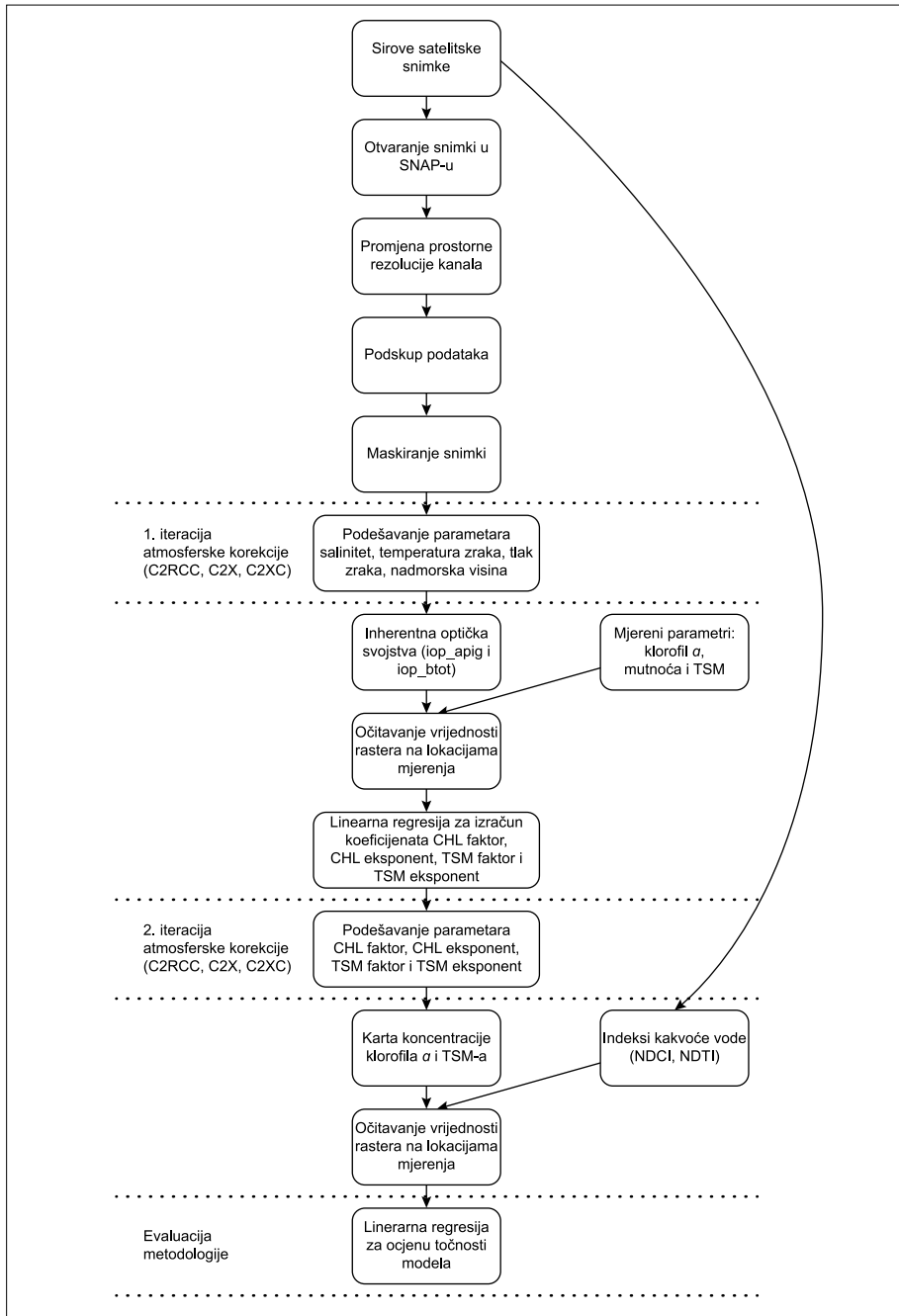
- ŠILJEG, S., MILOŠEVIĆ, R., & DOMAZETOVIĆ, F. (2023). *Geoprostorne tehnologije u modeliranju zelenih površina*.
- YANG, H., KONG, J., HU, H., DU, Y., GAO, M., & CHEN, F. (2022). A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sensing*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs14081770>
- ZHU, X., LIU, D., & CHEN, J. (2017). A review of remote sensing for environmental monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 192, 273–295.
- ZHU, X., WANG, Y., & LI, H. (2023). Advances in AI-based water quality monitoring using satellite imagery. *Remote Sensing*, 15(4), 1011.

3



PRIMJENA SATELITSKIH PODATAKA SENTINEL-2 I SOFTVERA SNAP ZA MODELIRANJE KAKVOĆE VODE: PRIMJER VRANSKOG JEZERA

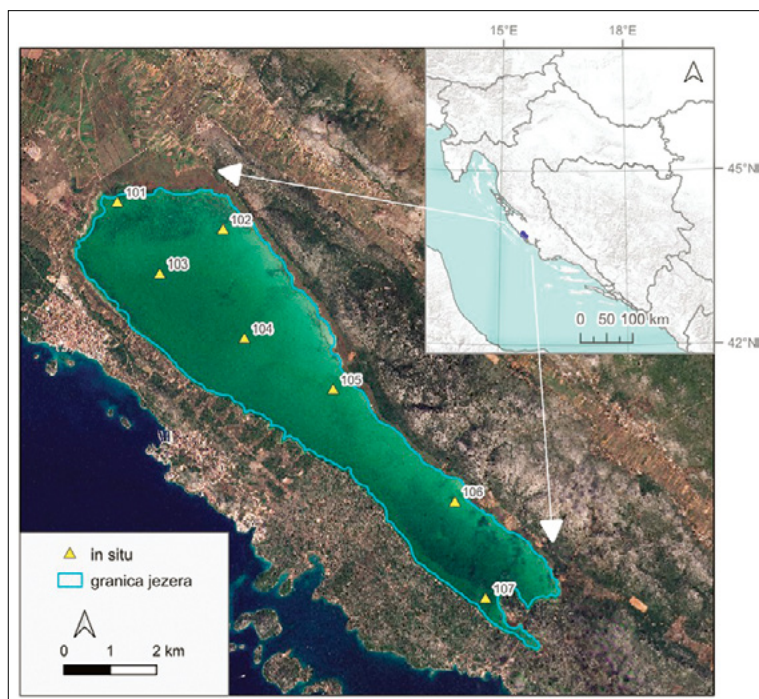
S ciljem demonstracije primjene suvremenih geoprostornih tehnologija u modeliranju kakvoće jezerske vode, napravljena je procjena kakvoće vode za jedan mjesec na primjeru Vranskog jezera, najvećeg prirodnog slatkovodnog jezera u Hrvatskoj. Korištenjem satelitskih podataka Sentinel-2 (L1C) i obradom u softveru SNAP prikazan je cjelokupan proces modeliranja, od preuzimanja podataka, atmosferske korekcije i generiranja parametara kakvoće vode, uključujući mutnoću i koncentraciju klorofila *a*, do validacije modela (Slika 3).



Slika 3. Dijagram metodologije

3.1. Područje istraživanja

Vransko jezero, smješteno u Dalmaciji duž istočne obale Jadranskog mora (Slika 4), predstavlja najveće prirodno jezero u Hrvatskoj, s ukupnom površinom od približno 30 km² (Šiljeg, 2013). Hidrološki režim jezera obilježen je izraženim sezonskim fluktuacijama vodostaja, pri čemu se viši vodostaji javljaju u zimskim i proljetnim mjesecima, s prosječnom razinom od 1,26 m iznad razine mora u razdoblju od 1961. do 2022. godine (Batina i sur., 2025). U ljetnim i jesenskim razdobljima dolazi do znatnog pada razine vode, pri čemu je najniža zabilježena vrijednost iznosila 0,40 m iznad razine mora (Batina i sur., 2025).



Slika 4. Područje istraživanja

Hidrodinamičke karakteristike jezera rezultat su složenog međudjelovanja više prirodnih i antropogenih čimbenika. Povezanost s Jadranskim morem, dotoci slatke vode, bočati podzemni pritoci te intenzitet isparavanja primarni su regulatorni elementi vodostaja. Posebno je značajan utjecaj umjetnog kanala Prosika, kojim se u uvjetima nižeg vodostaja omogućuje ulazak morske vode u jezero, što

posljedično dovodi do porasta saliniteta (Batina i sur., 2025). Uz to, zapadni dio jezera podložan je utjecaju podzemnih krških pukotina, dok južni dio obilježava proboj bočate podzemne vode, naročito izražen tijekom jakih juga i visokih plima.

Dotoci slatke vode u jezero ostvaruju se prvenstveno iz okolnih krških izvora i polja, osobito putem kanala u njegovu sjevernom dijelu, te oborinskim otjecanjem s brežuljkastog reljefa sjevernog i istočnog zaleđa (Vuković i sur., 2020). Osim prirodnih čimbenika, na ekološku stabilnost jezera znatno utječu i ljudske aktivnosti u slivu pritoka, a negativan učinak dodatno se intenzivira tijekom perioda nižinih vodostaja kada je sustav osjetljiviji na utjecaj prodora morske vode. Praćenje kakvoće vode u složenim ekosustavima poput Vranskog jezera zahtijeva pažljivo planiranje da bi se osigurala učinkovitost i relevantnost prikupljenih podataka.

Projekt SMART-Water (Samoodrživi višesenzorski sustav za nadzor kvalitete stajaćih kopnenih voda) financiran je kroz Interreg VI-A IPA Program Hrvatska – Bosna i Hercegovina – Crna Gora 2021. – 2027. Cilj je projekta unaprijediti postupke kontrole kvalitete kopnenih (jezerskih) voda koristeći se modelima umjetne inteligencije. Projektna istraživanja vode se na tri pilot-lokacije: Vranskom jezeru u Hrvatskoj, Deranskom jezeru u Bosni i Hercegovini te sjeverozapadnom dijelu Skadarskog jezera u Crnoj Gori. Projekt SMART-Water namjerava poboljšati postupke praćenja i inspekcije kvalitete unutrašnjih voda koristeći se modelima umjetne inteligencije i integracijom više senzora s geoprostornim podacima. Integriranjem različitih izvora podataka i modela u jedinstvenu mrežnu GIS platformu te promicanjem zajedničke prekogranične suradnje i komunikacije SMART-Water uključuje aktivnosti angažmana zajednice za podizanje svijesti građana i njihova sudjelovanja u praćenju i zaštiti kvalitete vode. Više informacija o projektu može se pronaći na njegovoj stranici: <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-istrazivanje-mora-i-okolisa/Laboratorij-za-fizicku-kemiju-tragova/Projekti/SMART-Water-Self-sustainable-Multisensor-System-for-Monitoring-Water-Quality-in-Inland-Waterbodies>.

U sklopu projekta SMART-Water uspostavljena je nova sveobuhvatna mreža za monitoring (Slika 4) s ciljem prikupljanja dostatnih podataka za modele strojnog učenja temeljene na metodama daljinskih istraživanja. Mreža kombinira postojeće stanice za praćenje s novima da bi se osiguralo temeljito praćenje koje je ključno za razvoj modela strojnog učenja u okviru projekta. Lokacije stanica za praćenje pažljivo su odabrane da bi se omogućilo uzorkovanje jednake površine

te uključile postojeće stanice za praćenje. Zbog dostupnosti samo jedne višeparametarske sonde YSI EXO2s za jezero za sva mjerenja, broj stanica za praćenje je ograničen.

Dizajn mreže za praćenje oblikovan je prema karakteristikama jezera, položajima postojećih stanica, vremenu potrebnom za obavljanje mjerenja brodom te hidrološkim modelima, uključujući batimetriju i pritoke jezera (Batina i sur., 2025; Uslu i sur., 2024).

Mreža uključuje strateški postavljene stanice da bi se osigurala potpuna pokrivenost jezera, pri čemu su kvadrati mreže (*fishnet*) dimenzionirani prema površini područja istraživanja jezera. Na primjer, kvadrati na Vranskom jezeru imaju površinu od 1,56 km². Stanice za praćenje strateški su raspoređene da bi se izbjegla blizina obale jezera te osigurala dostupnost brodom tijekom cijele godine s obzirom na plitku prirodu istraživanih područja. *In situ* mjerenje planirano je za sunčane, neoblačne dane, uz integraciju satelitskih snimki i snimki bespilotnom letjelicom za određene datume *in situ* mjerenja.

Uzorkovanje vode na Vranskom jezeru višeparametarskom sondom provedeno je 28. listopada 2025. na ukupno sedam postaja. Postaje su raspoređene prema mreži kvadrata veličine 1250 x 1250 m, temeljenoj na prethodnom sustavu monitoringa koji su razvili Batina i sur. (2025), te dodatno optimizirane višekriterijskom GIS analizom (Batina i Šiljeg, 2025).

3.2. Preuzimanje snimki Sentinel-2

3.2.1. Otvaranje korisničkog računa i prijava

Satelitske snimke Sentinel-2 dostupne su besplatno na platformi Copernicus Browser. Da bi se započeo proces preuzimanja satelitskih podataka za modeliranje kakvoće jezerske vode u softveru SNAP, potrebno je otvoriti korisnički račun na spomenutoj platformi. Registracija se odvija tako da se otvori mrežna stranica browser.dataspace.copernicus.eu i odabere opcija *Sign up* u kojoj je potrebno ispuniti tražene podatke (Slika 5).

Nakon uspješne registracije, moguće je prijaviti se na platformu (Slika 6) i pristupiti pretraživanju i preuzimanju podataka Sentinel, što je sljedeći korak u procesu pripreme podataka za obradu u softveru SNAP.

Slika 5. Kreiranje korisničkog računa

Slika 6. Prijava u Copernicus Browser

3.2.2. Pretraživanje i preuzimanje satelitskih snimki Sentinel-2

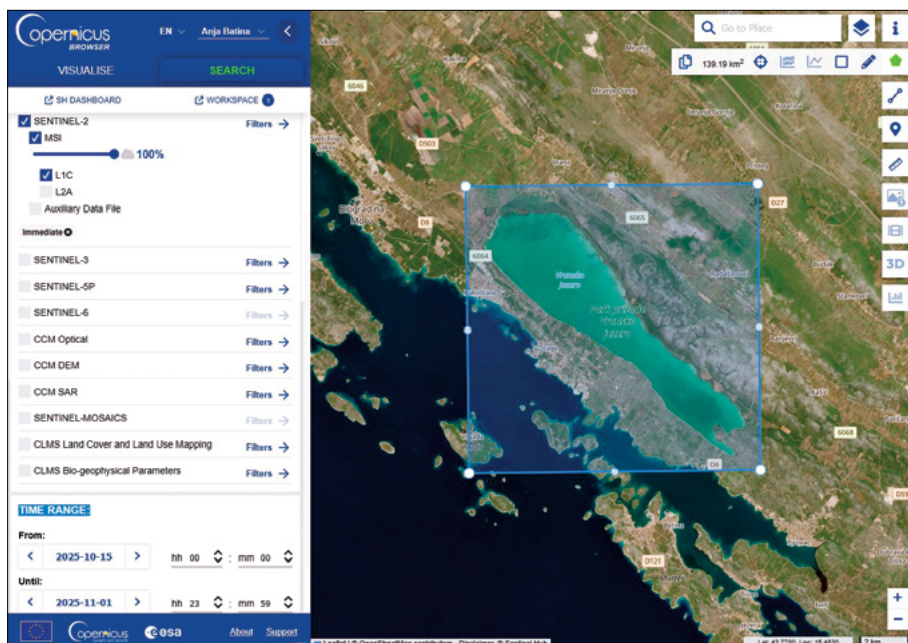
Nakon uspješne prijave na portal Copernicus Browser, korisnik može pristupiti velikom broju snimaka satelita Sentinel. Za potrebe modeliranja kakvoće vode u softveru SNAP najčešće se koriste podatci misije Sentinel-2, koja pruža višespektralne snimke visoke prostorne i vremenske rezolucije. U okviru glavnog sučelja moguće je pretraživati snimke prema sljedećim kriterijima: lokacija područja istra-

živanja, satelitska misija, vremenski raspon i naoblaka.

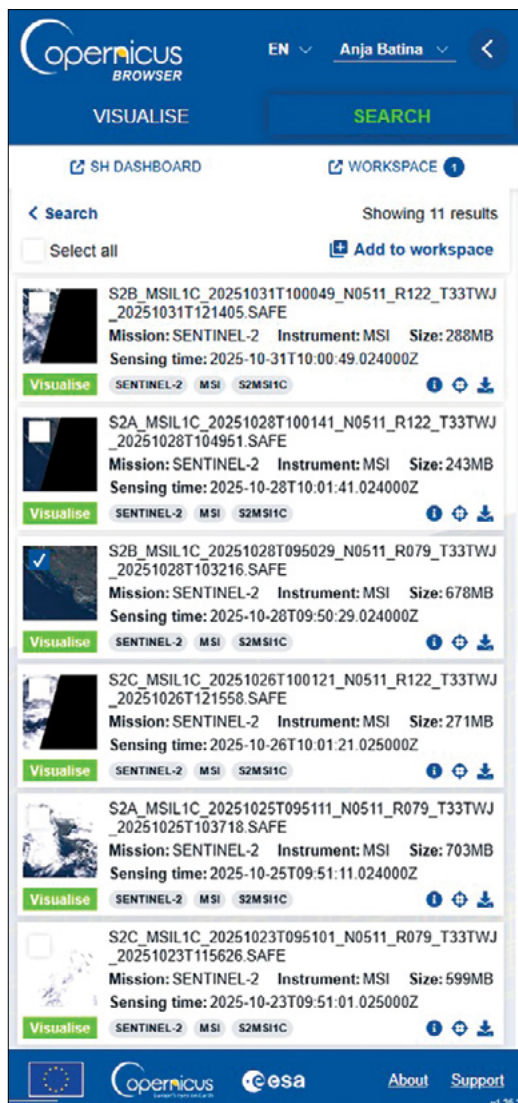
Pri preuzimanju snimki potrebno je postaviti odgovarajuće razdoblje istraživanja te obratiti pozornost na vrijeme prelaska satelita iznad promatranog područja. Da bi se osigurala usporedivost podataka sa satelitskim snimkama, *in situ* mjerenja potrebno je uskladiti s vremenom preleta satelita Sentinel-2 uzimajući u obzir i vremenske uvjete. Potrebno je izbjegavati *in situ* prikupljanje podataka tijekom nepovoljnih meteoroloških uvjeta, osobito za vrijeme intenzivnih oborina. Osim toga, vremenski razmak između satelitskog i *in situ* prikupljanja podataka treba biti što manji.

Za preuzimanje satelitskih snimki potrebno je označiti područje istraživanja (Vransko jezero) tako da se označi poligon na Copernicus Browseru ili da se učitaju KML ili SHP datoteke područja istraživanja. Zatim se u lijevom padajućem izborniku odabire *SEARCH* i pod *Time Range* postavlja vremenski raspon istraživanja (15. 10. 2025. – 31. 10. 2025.). Odabirom Sentinel-2 MSI L1C (atmosferski nekorigirani podatci) i odabirom *Search* prikazat će se sve dostupne snimke za odabrano područje i vremenski raspon (Slika 7).

Nakon što se pojavi popis dostupnih snimki, kliknuti na jednu od njih da bi se



Slika 7. Pretraga satelitskih snimki prema vremenu i području istraživanja



Slika 8. Popis dostupnih snimki prema zadanim parametrima

otvorio detaljan prikaz. Za preuzimanje, kliknuti na ikonu strelice prema dolje (Download), s desne strane (Slika 8).

Copernicus Browser omogućuje preuzimanje GeoTIFF datoteka za odabrano područje istraživanja. GeoTIFF je standardni rasterski format koji pohranjuje prostorne podatke zajedno s informacijama o georeferenciranju što znači da se svaka točka

na snimci može povezati s točnom koordinatom na Zemlji. Uz same GeoTIFF datoteke, dostupni su i metapodatci koji sadrže važne informacije o snimci, uključujući datum i vrijeme snimanja, tip senzora, prostornu referencu, rezoluciju, dimenzije slike te eventualno dodatne podatke o kvaliteti i obradi slike. Metapodatci su ključni za pravilnu analizu i interpretaciju satelitskih podataka jer omogućuju korisniku razumijevanje uvjeta snimanja i parametara datoteke prije daljnje obrade.

3.3. Softver SNAP 13.0.0: instalacija i sučelje

3.3.1. Instalacija i pokretanje softvera SNAP

Sentinel-2 je dio programa Copernicus koji pruža višespektralne snimke visoke rezolucije, a SNAP je službeni softver Europske svemirske agencije za analizu i obradu tih podataka. U ovom poglavlju bit će objašnjena instalacija softvera SNAP 13.0.0 namijenjenog obradi besplatno dostupnih satelitskih podataka uključujući sve potrebne korake da bi se moglo učinkovito preuzimati, pregledavati i analizirati snimke Sentinel-2.

Cilj je ovog poglavlja osposobiti korisnika za rad u softveru SNAP te primijeniti njegove mogućnosti u obradi satelitskih podataka, analizi i vizualizaciji.

Prvi korak odnosi se na preuzimanje odgovarajućeg instalacijskog paketa za operativni sustav na: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Nakon instalacije pokreće se softver (Slika 9).



Slika 9. Softver SNAP 13.0.0

3.3.2. Korisničko sučelje

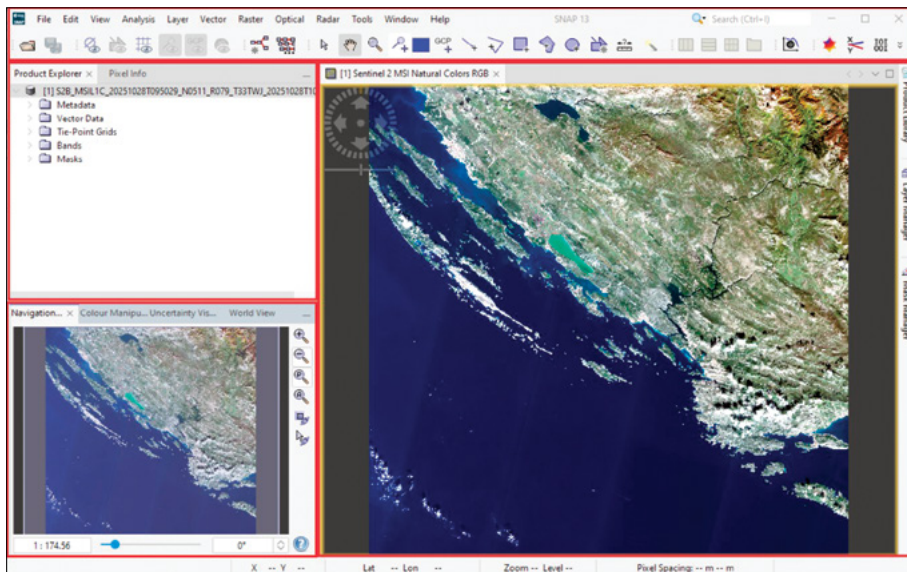
Korisničko sučelje napravljeno je da korisnicima olakša pristup i obradu satelitskih podataka. Sučelje je podijeljeno u četiri glavna dijela: (1) glavni izbornik; (2) preglednik podataka; (3) prostor za prikazivanje podataka; (4) prozor s informacijama (Slika 10).

Glavni izbornik softvera SNAP 13.0.0 predstavlja polazišnu točku za pristup svim osnovnim funkcijama programa. Glavni izbornik omogućuje jednostavan i organiziran pristup svim ključnim funkcijama, što korisniku olakšava rad i navigaciju unutar softvera.


Preglednik podataka (engl. *Product Explorer*) omogućava pregled i upravljanje učitanim satelitskim podacima. U ovom dijelu korisnik može vidjeti listu dostupnih proizvoda, pregledavati njihove detalje, otvarati ih za daljnju analizu ili uklanjati iz radnog prostora.

Za navigaciju po prostoru za prikazivanje i usporedbu podataka potrebno je u glavnom izborniku odabrati *Window* → *Tile Horizontally/Vertically*. Nadalje, za lakšu analizu, može se uključiti i sinkronizacija prikaza *View* → *Synchronize Image Views*.

S pomoću navigacijskog prozora *Navigation window*, koji se može uključiti u glavnom izborniku klikom na *View* → *Tool Windows* → *Navigation*, korisnik se može lakše orijentirati unutar slike i uspoređivati različite spektralne kanale. Nakon uklju-



Slika 10. Sučelje softvera SNAP 13.0.0

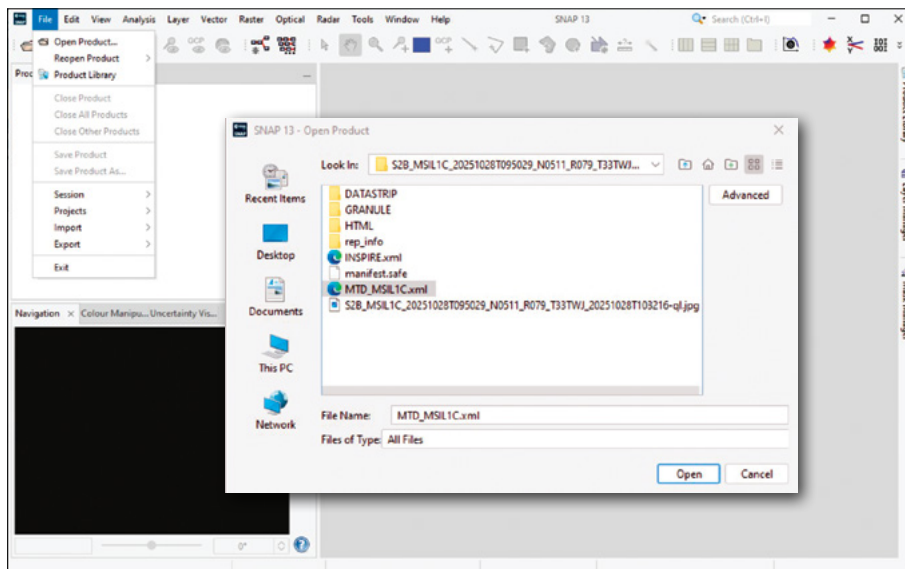
čivanja navigacijskog prozora, klikom na gumb  omogućuje se da kada korisnik klikne mišem na određenu lokaciju u jednom prikazu, ista pozicija automatski će biti označena i u svim ostalim otvorenim prikazima. Na taj način može se paralelno promatrati istu točku na različitim kanalima ili fazama obradama snimke što je posebno korisno kod analize podataka Sentinel-2.

3.4. Predobrada podataka

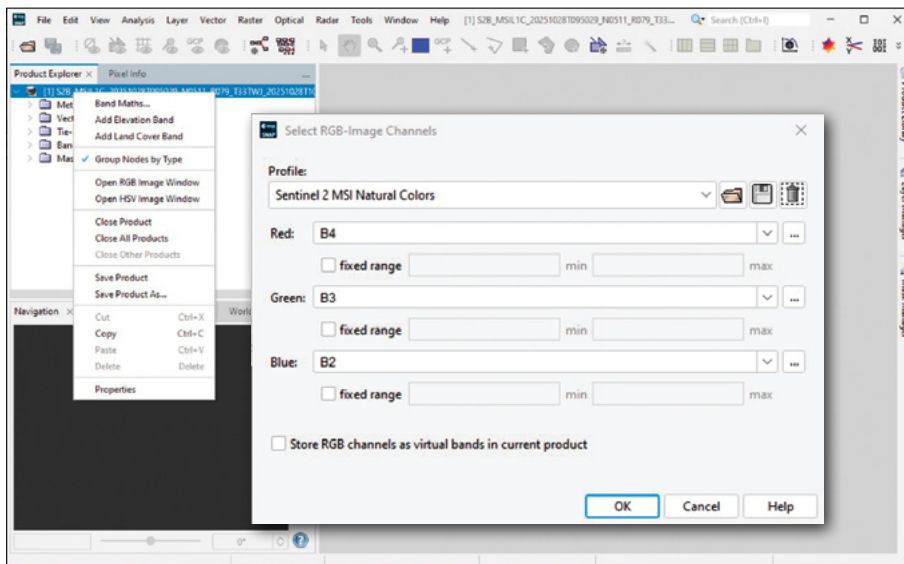
3.4.1. Učitavanje preuzetih snimki u softver SNAP

U ovom poglavlju objašnjen je osnovni postupak učitavanja prethodno preuzetih snimki Sentinel-2 u softver SNAP. Snimke se učitavaju putem glavnog izbornika odabirom *File* → *Open Product*. Moguće je otvoriti podatke iz raspakirane mape (.SAFE) ili izravno iz .zip arhive, bez prethodnog raspakiravanja (Slika 11). Osim toga, snimka se može učitati i jednostavnim povlačenjem (*drag & drop*) datoteke MTD_MSIL1C.xml u radno sučelje softvera SNAP. Nakon učitavanja, snimka se pojavljuje u prozoru *Product Explorer* gdje se može pregledavati i otvoriti za prikaz.

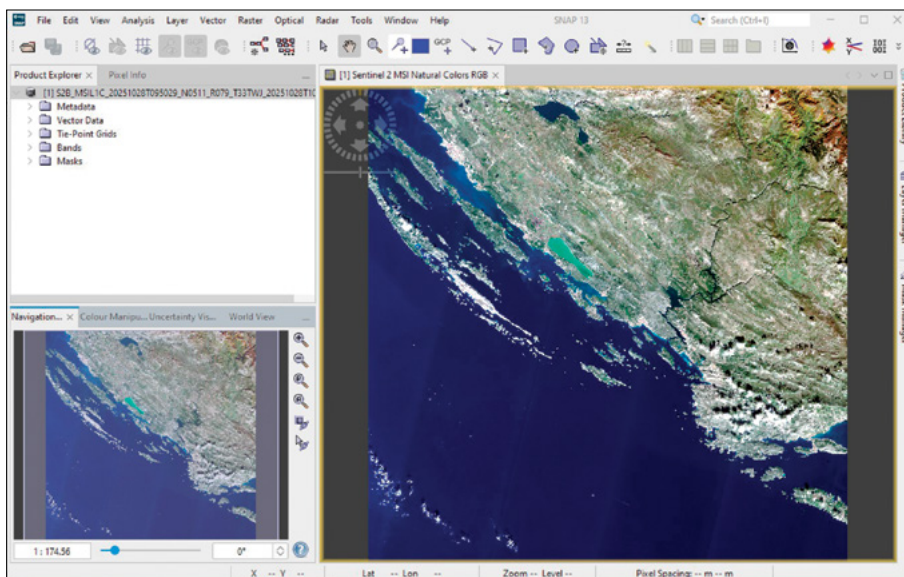
Nakon učitavanja, desnim klikom na snimku i odabirom *Open RGB Image Window*



Slika 11. Učitavanje preuzete snimke u softver SNAP



Slika 12. Pregled satelitske snimke

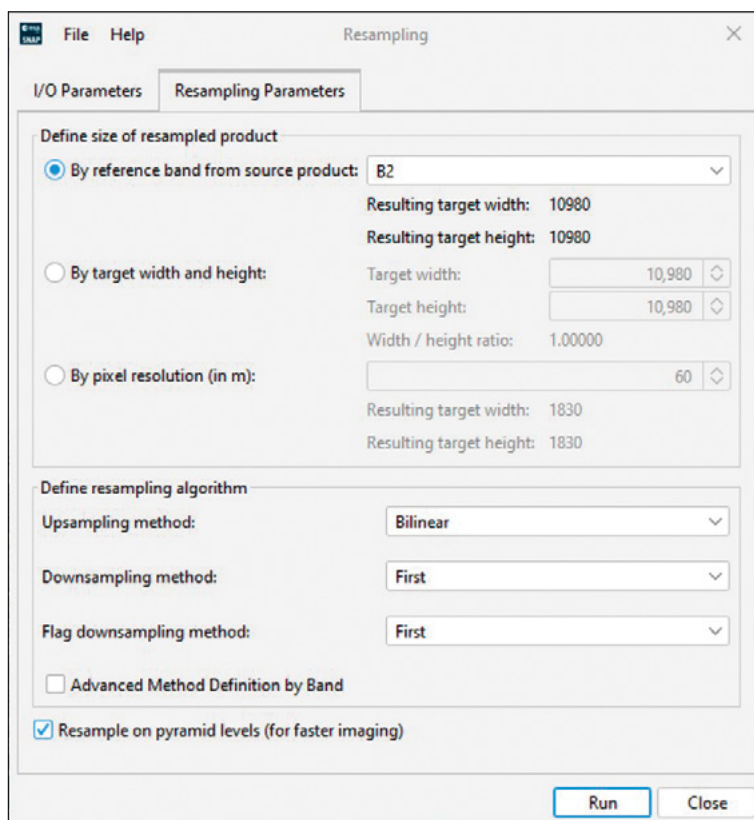


Slika 13. Prikaz snimke u natural colour

otvara se prozor *Select RGB-Image Channels* (Slika 12). U njemu se može odabrati prikaz u prirodnim bojama (*natural colour*). U prostoru za prikazivanje podataka treba biti prikazana satelitska snimka (Slika 13).

3.4.2. Promjena prostorne rezolucije kanala

Budući da Sentinel-2 sadrži kanale različite prostorne rezolucije (10 m, 20 m, 60 m), za uspješnu kombinaciju više kanala potrebno je prethodno izjednačiti njihovu rezoluciju. Razumijevanje navedenog ključno je za pravilnu obradu podataka i odabir odgovarajuće metode *resamplinga*. Na primjer, kod podataka Sentinel-2 kanali B2, B3, B4 i B8 imaju rezoluciju od 10 metara, kanali B5, B6, B7, B8A, B11 i B12 rezoluciju od 20 metara, dok kanali B1, B9 i B10 imaju rezoluciju od 60 metara.



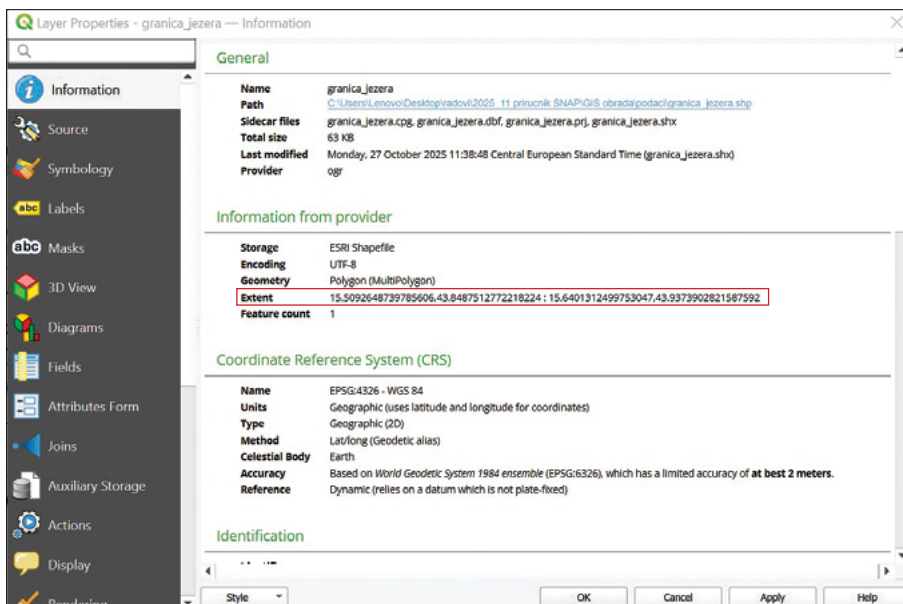
Slika 14. Parametri u usklađivanju prostorne rezolucije kanala

Usklađivanje prostorne rezolucije postiže se korištenjem alata *Resampling* putem opcije *Raster* → *Geometric* → *Resampling*. U dijalogu je potrebno postaviti sljedeće korisničko-definirane parametre: *Define size of resampled product* → *By reference band from source product* → **B2** (10 m); *Upsampling method* → preporučeno: **Bilinear**;

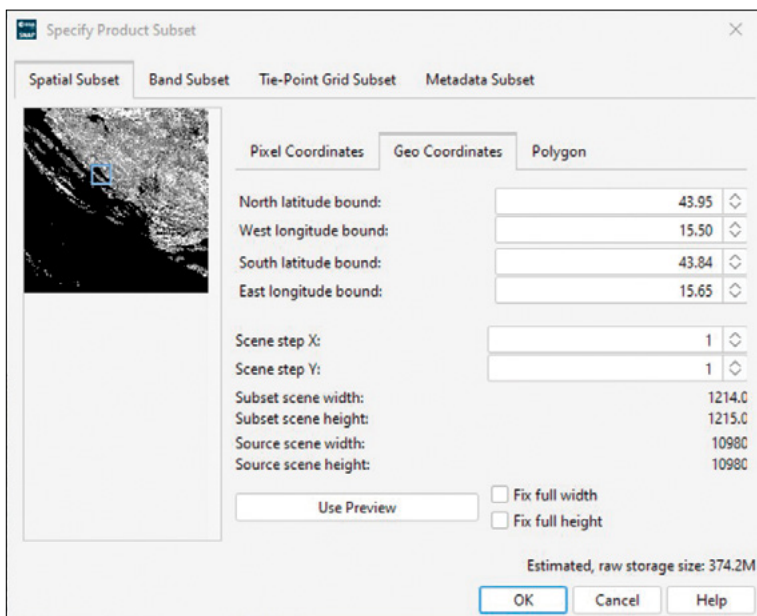
Downsampling method → **First**. Metoda Bilinear izračunava vrijednost novog piksela kao ponderirani prosjek četiriju susjednih piksela što omogućuje glatke prijelaze između piksela i očuvanje prostornih uzoraka na snimci. Takav pristup je posebno pogodan za kvantitativnu analizu jer bolje odražava stvarne promjene u refleksiji. Osim toga, metoda Bilinear računski je učinkovita i lako se implementira u većini GIS i satelitskih softverskih alata što je čini standardnim izborom pri promjeni prostorne rezolucije kanala satelita. Klikom na *Run* kreirat će se nova verzija proizvoda gdje su svi spektralni kanali postavljeni na istu prostornu rezoluciju (Slika 14).

3.4.3. Izrada podskupa podataka (*Subset*)

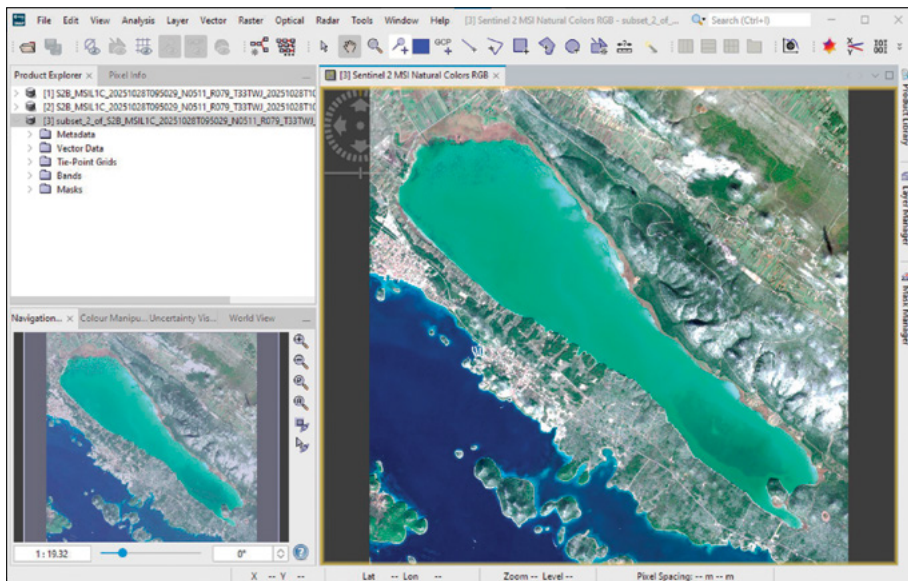
Da bi se smanjila količina podataka te izbjegla dugotrajna obrada velike količine podataka koji nisu nužni za analizu, koristi se alat *Subset*. Pri analizi satelitskih podataka za određeno područje, poput Vranskog jezera, preporučuje se korištenje podskupa (*subset*) iz veće granule snimke. Granula često pokriva vrlo velike površine, dok je površina jezera znatno manja, pa izdvajanjem samo relevantnog dijela podataka smanjujemo veličinu datoteka, ubrzavamo obradu i olakšavamo preciznu analizu. Podskup omogućuje fokusiranje na područje interesa bez nepotreb-



Slika 15. Prozor *Layer Properties – Information* u softveru QGIS



Slika 16. Definiranje prostornog podskupa prema geografskim koordinatama



Slika 17. Prikaz snimke koja je rezultat prostornog podskupa

nih rubnih informacija i optimizira korištenje računalnih resursa. Vizualno, podskup predstavlja izrezani dio granule koji u potpunosti obuhvaća geometriju jezera čime se osigurava da analiza refleksije bude precizna i relevantna za ciljano područje.

U softveru SNAP to se postiže odabirom *Raster* → *Subset* unutar glavnog izbornika. Tako korisnik može odabrati manje područje (*Spatial Subset*) i određene spektralne kanale (*Band Subset*). Unutar opcije *Spatial Subset* korisnik može ručno unijeti koordinate područja istraživanja ili koristiti alat za selekciju područja.

Ako je područje istraživanja definirano s pomoću sloja Shapefile u softveru QGIS, moguće je iskoristiti točne granice za definiranje prostornog obuhvata. To se postiže tako da se sloj učita u QGIS, zatim se desnim klikom odabire *Properties* → *Information*. U prikazanom prozoru, pod odjeljkom *Extent*, nalaze se koordinate granica sloja (u koordinatnom sustavu **WGS 84, EPSG:4326**) (Slika 15), koje se zatim mogu kopirati i ručno unijeti u alat *Subset* u softveru SNAP (Slika 16). Rezultat prostornog podskupa treba prikazati koristeći opciju *Open RGB Image Window* (Slika 17).

3.5. Atmosferska korekcija u softveru SNAP

S obzirom na to da sateliti bilježe svjetlosni signal na vrhu atmosfere, atmosferska korekcija predstavlja ključan korak u modeliranju kakvoće jezerske vode. Zbog vrlo niske refleksije s površine vode više od 90 % ukupnog signala koji dopire do senzora potječe iz atmosfere, što ovu korekciju čini iznimno zahtjevnim postupkom (Brockmann i sur., 2016). Satelitske snimke Sentinel-2 vrlo su korisne za proučavanje vodenih ekosustava, međutim za njihovu primjenu potrebna je atmosferska korekcija. Cilj je atmosferske korekcije uklanjanje atmosferskog utjecaja iz ukupne refleksije zabilježene na vrhu atmosfere (engl. *Top of Atmosphere* – TOA) da bi se dobila točna površinska refleksija (engl. *Bottom of Atmosphere* – BOA) koja predstavlja stvarna optička svojstva vodene površine (Soriano-González i sur., 2022).

Jedan od najčešće korištenih algoritama za atmosfersku korekciju je C2RCC. To je procesor za atmosfersku korekciju dostupan putem ESA-ina softvera SNAP i koristi se za dobivanje svojstvenih optičkih svojstava vodenog tijela (engl. *Inherent Optical Properties* – IOP) iz optičkih satelitskih snimaka prikupljenih različitim sensorima. Primjenjiv je na senzore MERIS, OLCI, MODIS, SeaWiFS i Sentinel-2 MSI (Brockmann i sur., 2016). Algoritamske osnove C2RCC-a postavili su Schiller i Doerffer (1999), koji su prvi razvili metodologiju za rješavanje problema atmosferske korekcije i određi-

vanja parametara unutar vodenog stupca primjenom tehnika strojnog učenja.

Promjena prostorne rezolucije kanala može utjecati na rezultate C2RCC-a jer mijenja izvorne vrijednosti ulaznih podataka na kojima su umjetne neuronske mreže trenirane. Postupci interpolacije dovode do zaglađivanja signala i miješanja informacija susjednih piksela čime se može promijeniti lokalna varijabilnost i statistička raspodjela vrijednosti reflektivnih svojstava vode. Kao posljedica toga, neuronska mreža može dobivati ulaze koji odstupaju od uvjeta u kojima je trenirana što može rezultirati smanjenom točnošću i potencijalnom pristranošću procijenjenih optičkih parametara, osobito u prostorno heterogenim područjima i u blizini granice jezera s kopnom. Istodobno, promjena prostorne rezolucije kanala nužan je korak da bi se spektralni kanali različitih prostornih rezolucija doveli na zajedničku mrežu, što je preduvjet za primjenu C2RCC algoritma na Sentinel L1C podatcima.

Učinkovitost procesora ovisi o različitim uvjetima uključujući geometriju Sunčeva osvjetljenja i promatranja, atmosferske karakteristike, optička svojstva i specifične uvjete lokacije (Soriano-González i sur., 2022; Sòria-Perpinyà i sur., 2022). Ne postoji jedinstveni, standardizirani pristup, te se algoritmi atmosferske korekcije i dalje razvijaju, što dodatno naglašava važnost njihove usporedbe i testiranja u različitim kontekstima primjene. To čini nužnim kontinuiranu validaciju različitih pristupa atmosferskoj korekciji, kao i metoda za dobivanje parametara kakvoće vode, uz upotrebu *in situ* podataka (Sòria-Perpinyà i sur., 2022).

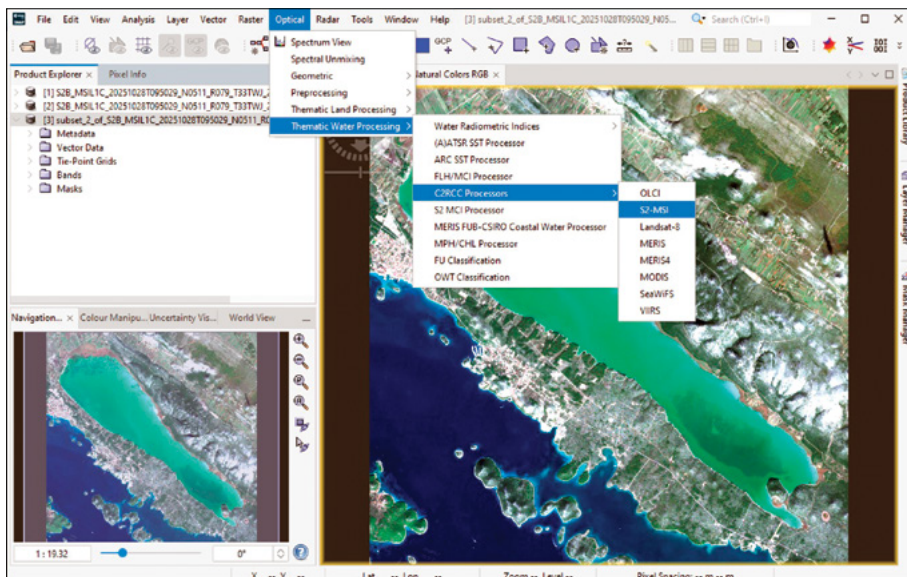
C2RCC MSI temelji se na naprednom sustavu neuronskih mreža koji uključuje tri specijalizirana procesora, poznata kao C2-Nets: C2RCC, C2X i C2X-COMPLEX (C2XC). C2RCC-Nets predstavljaju skup dubokih neuronskih mreža razvijenih za atmosfersku korekciju satelitskih podataka nad vodenim ekosustavima. Njihova je primarna funkcija inverzija spektra radijacije zabilježene na vrhu atmosfere radi preciznog određivanja refleksije vode na površini, čime se omogućuje kvantifikacija inherentnih optičkih svojstava vodenih tijela, uključujući koncentraciju klorofila *a*, ukupnu suspendiranu tvar i dubinu vidljivosti. Svaki od tih procesora treniran je na različitim skupovima podataka da bi bio prilagođen specifičnim uvjetima u vodenim tijelima. Zahvaljujući toj raznolikosti sustav može preciznije interpretirati satelitske podatke i pružiti pouzdane procjene optičkih i biokemijskih svojstava vode (Soriano-González i sur., 2022).

Primjena standardne mreže C2RCC-Nets preporučuje se za eutrofne do mezotrofne vode koje karakteriziraju umjerene do visoke koncentracije hranjivih tvari. Mreža C2X-Nets optimizirana je za uvjete s visokim koncentracijama suspendiranih

tvari i klorofila *a*. Mreža C2XC-Nets predstavlja najnoviju verziju, namijenjenu za obradu složenih vodenih tipova koji uključuju kombinaciju različitih optičkih svojstava. Ta se mreža koristi drugačijim skupom parametara za modeliranje raspršenja i apsorpcije, fokusirajući se na ukupno stražnje raspršenje vode za bolju prilagodbu u zahtjevnijim uvjetima. Posebno je pogodna za primjenu u kopnenim vodama (ESA, n.d.-a). Navedeno potvrđuju Sòria-Perpinyà i sur. (2022) te Soriano-González i sur. (2022). Rezultati njihovih istraživanja pokazali su da su C2X i C2XC imali bolju sposobnost očuvanja spektralnog oblika u odnosu na standardni C2RCC, osobito u složenijim i mutnijim vodama, dok je C2RCC zadržao prednost u oligotrofnim i mezotrofnim uvjetima. C2XC se istaknuo kao najpouzdaniji model u većini kanala i tipova voda, iako je njegova primjena bila ograničena većim brojem odbačenih piksela. Dobiveni rezultati sugeriraju da bi kombinacija C2RCC i C2XC, ovisno o optičkom tipu vode, mogla poboljšati točnost procjene refleksije i kakvoće vode (Soriano-González i sur., 2022; Sòria-Perpinyà i sur., 2022).

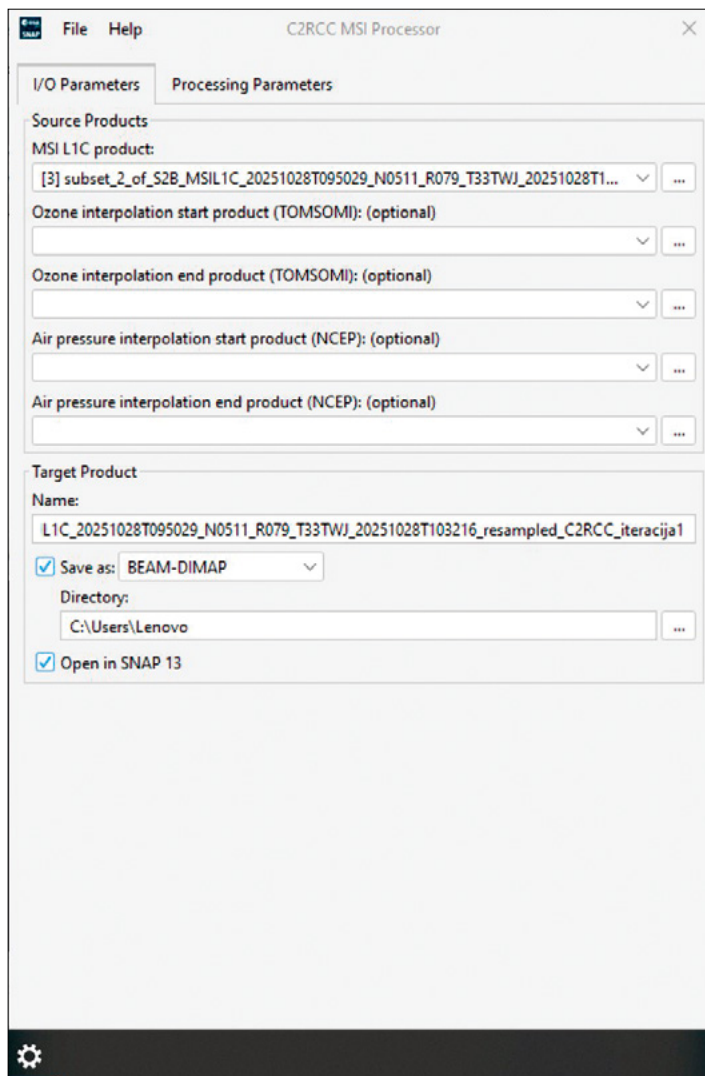
3.5.1. Prva iteracija atmosferske korekcije C2RCC

Za pokretanje procesora C2RCC potrebno je u glavnom izborniku odabrati *Optical* → *Thematic Water Processing* → *C2RCC Processor* → *S2 MSI* (Slika 18).



Slika 18. Procesor C2RCC

Otvara se prozor u kojem je potrebno odabrati ulazni proizvod (odabrati proizvod nad kojim je prethodno napravljen prostorni *subset* i *resample*). Time se osigurava da se atmosferska korekcija primjenjuje samo na izdvojeno područje istraživanja, čime se ubrzava obrada i smanjuje količina nepotrebnih podataka. Nadalje, pod *Target Product-Name* imenovati izlazni proizvod, a pod *Directory* odabrati gdje će se spremi kao BEAM-DIMAP format (Slika 19).



Slika 19. Opcije za C2RCC I/O Parameters

Tijekom prvog pokretanja algoritma C2RCC mijenja se prvih pet ulaznih parametara, dok ostali ostaju na zadanim vrijednostima. Važno je pritom biti dosljedan u načinu unosa numeričkih vrijednosti. Ako je u postavkama definirano da se decimalna mjesta odvajaju zarezom ili točkom, tada se taj način mora zadržati tijekom cijelog procesa. Osim toga, važno je naglasiti da su atmosferski parametri, osobito tlak zraka i ozon te nadmorska visina, visoko osjetljivi u okviru atmosferske korekcije, dok su parametri salinitet i temperatura zraka umjerno značajni, s većim utjecajem u uvjetima ekstremnih vrijednosti. S druge strane, koeficijenti CHL faktor, CHL eksponent, TSM faktor i TSM eksponent izravno određuju krajnje vrijednosti biološko-optičkih procjena te predstavljaju ključnu točku kalibracije u svrhu lokalno relevantne primjene algoritma C2RCC u modeliranju kakvoće vode.

Procesor C2RCC, integriran u softverski paket SNAP, predstavlja sofisticirani algoritam za atmosfersku korekciju i derivaciju biološko-optičkih parametara u obalnim i kopnenim vodama, koji se temelji na unaprijed istreniranoj neuronskoj mreži. Algoritam omogućuje izračun spektralno ovisnih inherentnih optičkih svojstava (IOPs) te sekundarnih varijabli poput koncentracije klorofila *a* (CHL) i TSM-a. Radi postizanja optimalne točnosti i pouzdanosti u specifičnim hidrološkim uvjetima nužno je prilagoditi ulazne fizičke parametre prema lokalnim karakteristikama vodenog tijela.

U otvorenom prozoru za postavke *Processing Parameters* korisnik mora definirati niz fizičkih parametara koji direktno utječu na rad algoritma. Ti parametri uključuju: salinitet, temperaturu zraka, ozon, tlak zraka, nadmorsku visinu te kalibracijske varijable: TSM faktor, TSM eksponent, CHL faktor i CHL eksponent. Parametar salinitet (izražen u Practical Salinity Units – PSU) unosi se na temelju terenskih mjerenja. Temperatura zraka unosi se u Celzijevim stupnjevima (°C) za dan preleta satelita te se koristi u modeliranju atmosferskih uvjeta unutar algoritma. Ako je dostupna samo vrijednost u kelvinima (K), potrebno ju je pretvoriti u °C prema jednadžbi:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (1)$$

gdje je

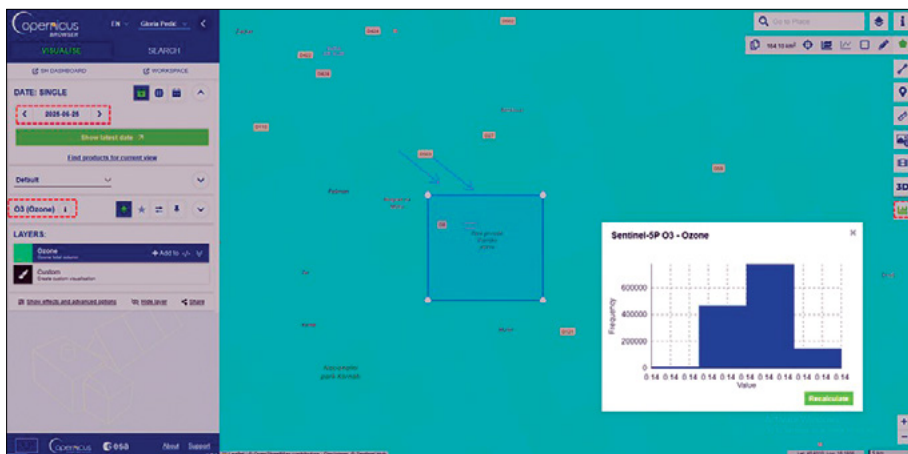
$T(^{\circ}\text{C})$ temperatura u Celzijevim stupnjevima te

$T(\text{K})$ temperatura u kelvinima.

Preporučuje se korištenje terenskih mjerenja, no ako nisu dostupna, mogu se koristiti prosječne vrijednosti preuzete s reanalize ERA5 putem Copernicus Climate Data Storea (CDS). Tlak zraka također se može preuzeti iz reanalize ERA5 te mora biti izražen u hektopaskalima (hPa). Budući da tlak zraka ima izravan utjecaj na izračun Rayleighova raspršenja, preporučuje se korištenje prostorno i vremenski usklađenih podataka.

Parametar nadmorska visina (*elevation*) unosi se u metrima i služi za korekciju količine atmosferskog stupca iznad površine vode. Parametar ozon predstavlja još jedan važan atmosferski parametar koji utječe na apsorpciju kratkovalnog zračenja, osobito u plavom dijelu spektra.

U Copernicus Browseru način pretraživanja podataka razlikuje se ovisno o vrsti satelitskog proizvoda. Sentinel-2 L1C snimke predstavljaju optičke satelitske slike visoke prostorne rezolucije koje prikazuju Zemljinu površinu, stoga se pretražuju prema području od interesa (AOI), razdoblju i postotku oblačnosti. Ti su parametri važni jer optički senzori ovise o vremenskim uvjetima i osvjetljenju. S druge strane, podatci o ozonu (npr. iz misije Sentinel-5P) pripadaju skupini atmosferskih proizvoda koji prikazuju raspodjelu i koncentraciju plinova u atmosferi na globalnoj razini. Budući da ti podatci nisu stvarne slike već tematske mape izračunane iz spektralnih mjerenja, pretražuju se samo prema datumu i vrsti proizvoda, bez potrebe za definiranjem područja ili razine oblačnosti. Podatci o ozonu mogu se preuzeti putem platforme Copernicus Browser, selekcijom senzora Sentinel-5P O₃ (Ozone) i odabirom odgovarajućeg datuma.



Slika 20. Copernicus Browser – koncentracija ozona

Dodatno, s pomoću ikone histograma može se prilagoditi prikaz vrijednosti ozona na karti, čime se poboljšava vizualni kontrast i uočavanje koncentracijskih razlika. Za detaljniju analizu određenog područja moguće je nacrtati poligon na karti, čime se definira vlastito područje interesa za prikaz i preuzimanje podataka (Slika 20).

Dobivena vrijednost treba se izraziti u Dobsonovim jedinicama (DU) koje se računaju prema sljedećoj formuli (Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, n. d.):

$$DU = \frac{O_3 \left(\frac{mol}{m^2} \right)}{4.4615 * 10^{-4}}, \quad (2)$$

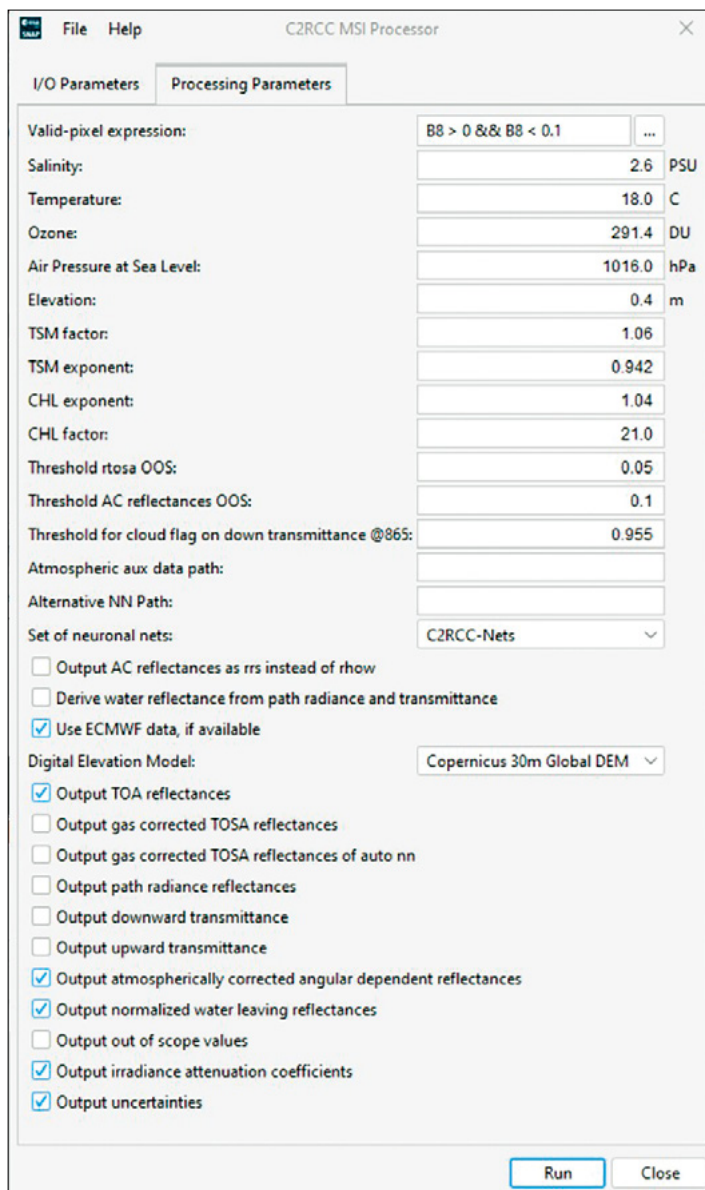
gdje je

DU koncentracija ozona u Dobsonovim jedinicama, a
 O_3 (mol/m²) ukupna količina ozona izražena u mol/m².

Važno je istaknuti da se navedeni parametri, odnosno njihove vrijednosti, unose za dan preleta satelita, odnosno za dan na koji se odnosi satelitska snimka s obzirom na to da se koriste za atmosfersku korekciju snimke. Ključno je da vrijeme preuzimanja tih podataka bude usklađeno s vremenom nastanka satelitske snimke što je za ovo područje približno 10 sati ujutro. Ako podatci za točno vrijeme nisu dostupni, preporučuje se korištenje podataka za najbliže moguće vrijeme snimanja. Ako ni to nije moguće, primjenjuje se srednja vrijednost za taj dan.

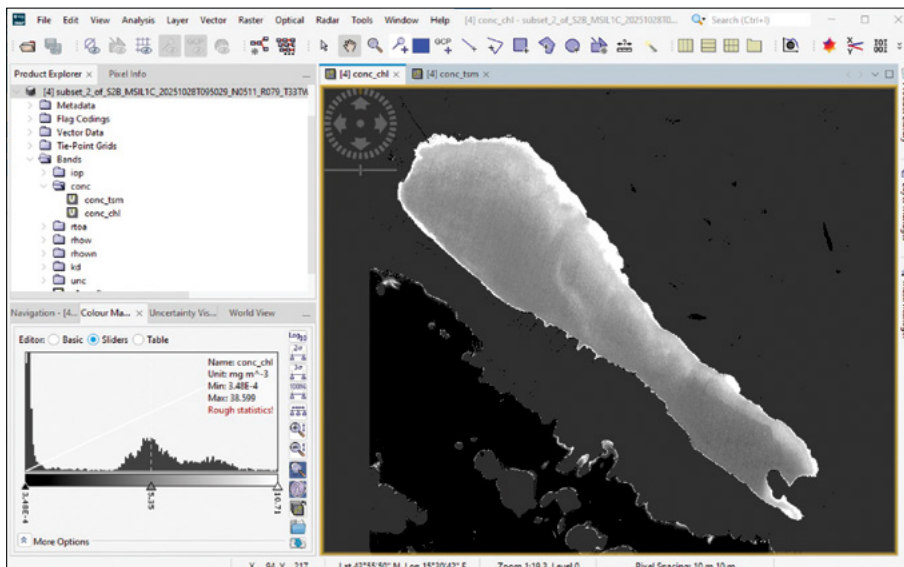
Treba unijeti potrebne vrijednosti za parametre *Salinity*, *Temperature*, *Ozone*, *Air Pressure at Sea Level* i *Elevation*, označiti opciju *Use ECMWF data, if available*, za *Digital Elevation Model* izabrati opciju **Copernicus 30 m Global DEM** i sve ostale parametre ostaviti prema postavkama projekta. Nakon unosa potrebnih parametara, odabirom *Run* pokreće se proces (Slika 21). U prozoru *Product Explorer* nalaze se slojevi s rezultatima obrade.

Nakon primjene procesora C2RCC, dobivaju se rezultati koji uključuju brojne kanale, među ostalima i koncentraciju ukupne suspendirane tvari (**conc_tsm**), koncentraciju klorofila *a* (**conc_chl**), inherentna optička svojstva (**iop**), slojeve nesigurnosti **unc** (*uncertainty*) i pomoćne maske za identifikaciju oblaka, kopna i problematičnih piksela (Slika 22).



Slika 21. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2RCC

U daljnjoj analizi podataka ključni slojevi bit će inherentna optička svojstva, posebno **iop_apig** (apsorpcija pigmenta) i **iop_btot** (ukupno raspršenje), jer pružaju važne informacije o optičkim karakteristikama vodenog stupca te koncentra-



Slika 22. Rezultati obrade podataka s pomoću procesora C2RCC

ciji tvari u vodi, uključujući **conc_tsm** (koncentracija ukupne suspendirane tvari) i **conc_chl** (koncentracija klorofila *a*).

3.5.2. Uspostava veze s in situ mjerenjima i regresijska analiza

Za modeliranje koncentracija TSM i CHL, procesor C2RCC koristi empirijske potencijske funkcije u obliku:

$$TSM = TSM_faktor * iop_bot^{TSM_eksponent}, \quad (3)$$

gdje je

TSM laboratorijski mjerena vrijednost ukupne suspendirane tvari, iop btot optički parametar ukupnog raspršenja čestica dobiven iz neuronske mreže, a TSM_faktor i TSM_eksponent predstavljaju koeficijente modela te

$$CHL = CHL_faktor * iop_apig^{CHL_eksponent}, \quad (4)$$

gdje je

CHL mjerena vrijednost klorofila a sondom, iop apig predstavlja optički parametar apsorpcije pigmenta fitoplanktona pri 443 nm dobiven iz neuronske mreže, a CHL_faktor i CHL_eksponent predstavljaju koeficijente modela.

Formule (3) i (4) omogućuju pretvorbu optičkih svojstava u koncentracije suspendiranih tvari i fitoplanktona. Početne vrijednosti tih faktora i eksponenata temelje se na globalnim treninzima algoritma, ali se preporučuje njihova lokalna kalibracija ako su dostupna *in situ* mjerenja koncentracija TSM-a i klorofila a . Kalibracija se može provesti regresijskom analizom odnosa između inherentnih optičkih svojstava i izmjerenih vrijednosti čime se značajno povećava točnost i pouzdanost satelitske procjene.

Za izračun CHL faktora, CHL eksponenta, TSM faktora i TSM eksponenta korištena je regresijska analiza. U Excel tablicu unesene su izmjerene vrijednosti klorofila a i TSM-a, pri čemu je svaka mjerna lokacija označena jedinstvenim identifikacijskim brojem (ID).

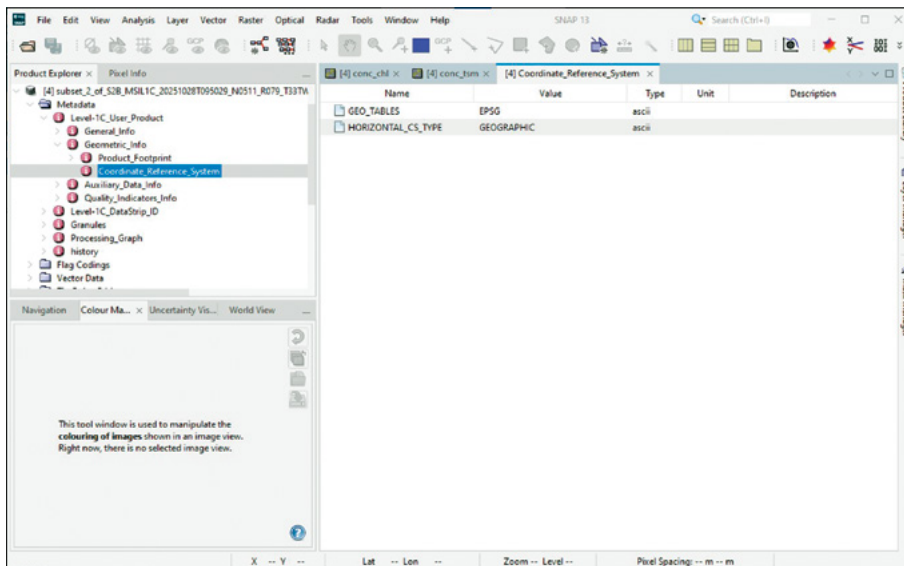
Važno je napomenuti da se pojmovi TSS i TSM sve češće koriste naizmjenično u kontekstu optičkog modeliranja. Sve postaje korištene su za mjerenja višeparame-tarskom sondom, pri čemu su prikupljeni podatci o parametrima kvalitete vode kao što su mutnoća i klorofil a . Na svim postajama provedeno je dodatno ručno uzorkovanje vode da bi se izmjerio TSM. Slijedeća je metoda EPA 160.2 za određivanje TSM-a u uzorcima slatke vode. Metoda EPA 160.2 koristi se za određivanje TSM-a u uzorcima slatke vode i temelji se na gravimetrijskoj analizi. Postupak započinje filtracijom uzorka kroz specijaliziranu membranu koja zadržava sve čestice suspendirane u vodi. Nakon filtracije, membrana s uhvaćenim česticama pažljivo se suši do konstantne mase. Razlika mase membrane prije i nakon filtracije omogućuje izračunavanje koncentracije suspendiranih tvari u uzorku, koja se obično izražava u mg/L (United States Environmental Protection Agency, 1999).

Uzorci su prikupljeni tehnikom ručnog uzorkovanja, uz minimalno ometanje vodnog stupca. Na svakoj postaji čista, prethodno isprana polietilenska boca od 1 L uronjena je do približne dubine od 0,2 m radi prikupljanja uzorka. Uzorci su omotani aluminijskom folijom da bi se spriječila mikrobiološka aktivnost koja bi mogla promijeniti koncentraciju suspendiranih čestica do analize. Odmah su pohranjeni na 4 °C u prijenosnom hladnjaku i transportirani u laboratorij unutar tri sata.

U laboratoriju su uzorci temeljito izmiješani da bi se čestice ravnomjerno raspodijelile u boci i da bi se osigurala homogenost. Zatim su filtrirani kroz prethodno izvagane staklene mikrofiltrarske filtre (LGG Labware; veličina pora 1,6 μm ; promjer filtra 47 mm) koristeći filtracijski sustav (MF31, Rocker Scientific) spojen na vakuumsku pumpu (Büchi® V-500). Stijenke lijevka temeljito su isprane Milli-Q® vodom da bi se sve preostale čestice prenijele na filtre. Za svaki uzorak zabilježen je filtrirani volumen. Filtri su zatim sušeni na 105 °C do konstantne mase (promjena mase < 0,5 mg), ohlađeni u čistom okruženju i ponovno izvagani radi određivanja koncentracije TSM-a, izražene u gramima po kubičnom metru (g/m^3), što odgovara miligramima po litri (mg/L).

Nadalje, za potrebe analize korišteni su spektralni kanali **iop_apig** i **iop_btot**, pri čemu su njihove vrijednosti uspoređivane s izmjerenim vrijednostima.

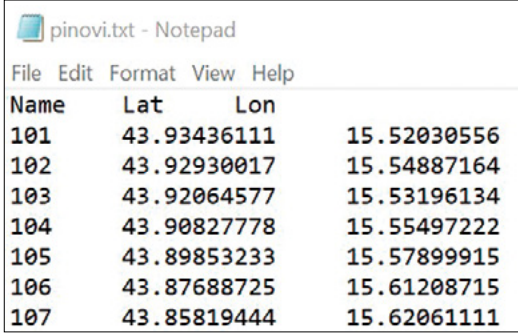
Prije nego što se započne s unosom točaka, potrebno je provjeriti koordinatni sustav rastera da bi se osiguralo da su točke pravilno geolocirane. To se u softveru SNAP radi tako da se u prozoru *Product Explorer* otvori čvor *Metadata*, a zatim *Level-1C_User_Product* pa *Geometric_Info* i unutar njega *Coordinate_Reference_System* (Slika 23). U donjem prikazu metapodataka može se pročitati informacija o horizontalnom koordinatnom sustavu. Ako u polju **HORIZONTAL_CS_TYPE** piše **GEOGRAPHIC**, podatci su u stupnjevima, što znači da se radi o sustavu WGS84



Slika 23. Provjera koordinatnog sustava projekta

(EPSG:4326). Ako je navedeno *PROJECTED*, riječ je o metričkom projekcijskom sustavu, najčešće UTM (npr. EPSG:32633). Ako postoji unos EPSG_CODE, on daje točan broj koordinatnog sustava. To je važno jer pinovi koji će se uvoziti moraju biti u istom sustavu kao i raster.

Kada je poznat koordinatni sustav, priprema se tekstualna datoteka s točkama koje će se koristiti kao pinovi. Datoteka se može nazvati, primjerice, pinovi.txt i treba sadržavati tri stupca: **Name** (naziv točke), **Lon** (geografsku dužinu) i **Lat** (geografsku širinu). Format datoteke mora biti jednostavan, s vrijednostima odvojenima *tabom* (Slika 24). Koordinate u datoteci trebaju biti izražene u istom koordinatnom sustavu kao i raster, najčešće u WGS84 ako se radi o Sentinel proizvodima koji nisu reprojektirani.



Name	Lat	Lon
101	43.93436111	15.52030556
102	43.92930017	15.54887164
103	43.92064577	15.53196134
104	43.90827778	15.55497222
105	43.89853233	15.57899915
106	43.87688725	15.61208715
107	43.85819444	15.62061111

Slika 24. Primjer formata datoteke s pinovima

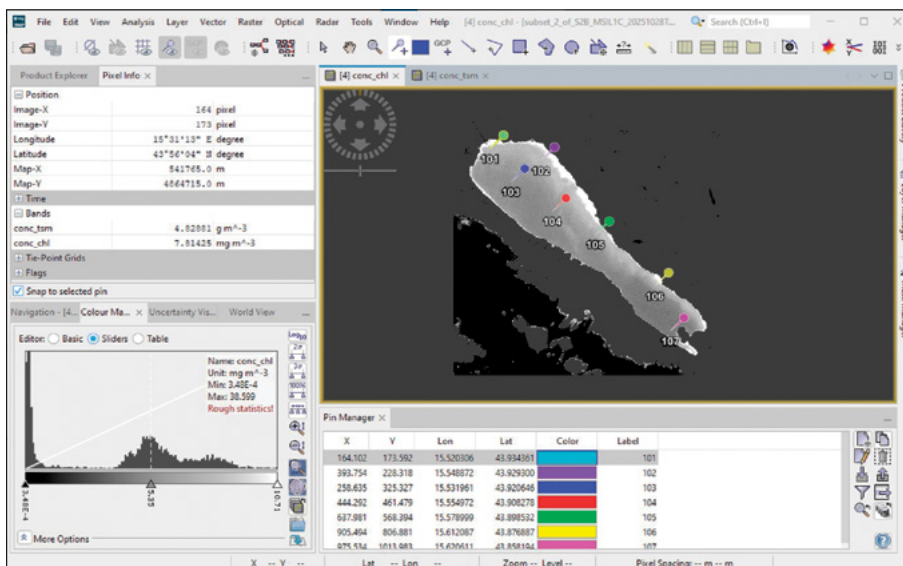
Budući da je potrebno očitati vrijednosti piksela iz slojeva **iop_apig** i **iop_btot**, potrebno ih je otvoriti u softveru SNAP. Ti su parametri odabrani zbog svoje relevantnosti u modeliranju biološko-optičkih svojstava vode i korelacije *in situ* mjerenjima. Za proizvod koji je rezultat provođenja prve iteracije atmosferske korekcije C2RCC, u prozoru *Product Explorer* treba proširiti mapu *Bands*, zatim proširiti mapu *iop* pa napraviti dvostruki klik na sloj **iop_apig** pri čemu se otvara prikaz tog sloja u prostoru za prikazivanje podataka. Isti postupak primjenjuje se i na sloj **iop_btot**.

Prozor *Pin Manager* otvara se putem izbornika *View* → *Tool Windows* → *Pin Manager*. Nakon što se otvori panel, u njemu će se pojavljivati popis svih pinova. Uvoz pinova iz pripremljene datoteke obavlja se izravno unutar panela *Pin Manager*. Potrebno je kliknuti na gumb *Import all pins from XML or text file* i odabrati pripremljenu datoteku u TXT formatu. Nakon potvrde, sve točke iz datoteke bit

će prikazane na slici kao pribadače, a njihove koordinate i nazivi pojavit će se u tablici u donjem dijelu prozora. Ako se točke ne nalaze na očekivanim mjestima, to najčešće znači da koordinatni sustav datoteke s točkama nije isti kao onaj u rasteru.

Za precizno pozicioniranje i pregled točaka korisna je opcija *Snap to selected pin* (Slika 25). Ona se aktivira klikom na pin u tablici ili na karti (ikona pribadače), aktiviranjem prozora *Pixel Info* s lijeve strane i označavanjem opcije *Snap to selected pin* na dnu tog prozora. Ako prozor *Pixel Info* nije vidljiv, treba ga uključiti putem izbornika *View → Tool Windows → Pixel Info*. Kada je ta funkcija uključena, klik na bilo koji pin u tablici ili na karti automatski kursor „prianja“ uz točan središnji piksel na kojem se pin nalazi i pokazuje vrijednosti piksela za rastere **iop_apig** i **iop_btot**. Time se osigurava da očitavanje vrijednosti piksela bude precizno i da ne dođe do pomaka zbog pogreške pri ručnom odabiru.

Nakon što su pinovi uvezeni i opcija *Snap to selected pin* aktivirana, može se pristupiti očitavanju vrijednosti piksela unutar panela *Pixel Info*. Očitane vrijednosti refleksancije ili intenziteta piksela treba unijeti u Excel datoteku u stupac **iop_apig** te **iop_btot** za svaku točku (pin). Očitane vrijednosti trebaju iznositi kao što je prikazano u tablici 3 i tablici 4.



Slika 25. Očitavanje vrijednosti piksela

Tablica 3. Očitane vrijednosti rastera *iop_apig*

ID	Izmjerene vrijednosti	C2RCC
	klorofil <i>a</i> (µg/L)	<i>iop_apig</i>
101	0.32	0.38653
102	0.31	0.40915
103	0.57	0.25155
104	0.43	0.27931
105	0.13	0.37806
106	0.17	0.35055
107	0.40	0.22336

Tablica 4. Očitane vrijednosti rastera *iop_btot*

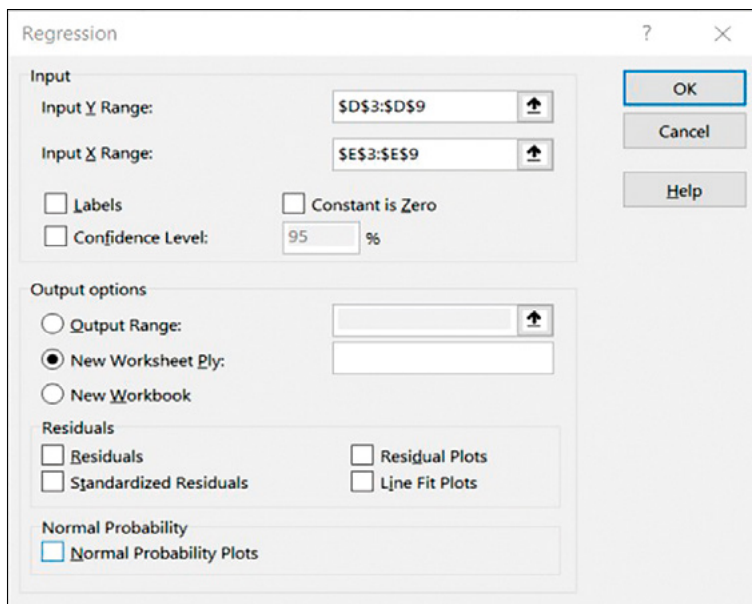
ID	Izmjerene vrijednosti	C2RCC
	TSM (mg/L)	<i>iop_btot</i>
101	3.00	5.00127
102	9.71	6.86728
103	11.67	4.01717
104	10.59	4.47872
105	10.67	6.83917
106	9.41	7.09955
107	9.12	2.67942

Nadalje, za svaku mjernu lokaciju (točku uzorkovanja), u pripadajući stupac u Excel tablici dodane su vrijednosti iz spektralnih izlaznih kanala ***iop_apig*** i ***iop_btot*** (Tablica 3 i Tablica 4). U svrhu normalizacije podataka i pripreme za statističku obradu dodatno je izračunat prirodni logaritam (\ln) izmjerenih koncentracija klorofila *a* i TSM-a te vrijednosti odabranih spektralnih kanala (Tablica 5). Taj korak kod obrade podataka poboljšava valjanost pretpostavki regresijskih modela i olakšava interpretaciju odnosa među promatranim parametrima.

Tablica 5. Usporedba prirodnih logaritama vrijednosti dobivenih algoritmom C2RCC i izmjerenih vrijednosti klorofila *a*

ID	Izmjerene vrijednosti	C2RCC	Prirodni logaritmi	
	klorofil <i>a</i> (µg/L)	iop_apig	ln(klorofil <i>a</i>)	ln(iop_apig)
101	0.32	0.38653	-1.14256	-0.95055
102	0.31	0.40915	-1.18744	-0.89367
103	0.57	0.25155	-0.56387	-1.38011
104	0.43	0.27931	-0.84863	-1.27543
105	0.13	0.37806	-2.03256	-0.97270
106	0.17	0.35055	-1.76609	-1.04825
107	0.40	0.22336	-0.92634	-1.49897

U svrhu kvantitativne analize odnosa između parametra **iop_apig** i izmjerene koncentracije klorofila *a* (stupac **klorofil a (µg/L)**) provedena je linearna regresijska analiza korištenjem alata *Data Analysis – Regression* unutar programa Microsoft Excel 2010 (*Data → Data Analysis*). Ako alat za analizu podataka nije unaprijed dostupan, potrebno ga je aktivirati putem izbornika *File → Options → Add-ins* gdje se u donjem dijelu sučelja, unutar opcije *Manage: Excel Add-ins*, odabire *Analysis Tool-*



Slika 26. Provođenje regresije za klorofil *a*

Pak te potvrđuje klikom na OK. Nakon aktivacije, alat se pojavljuje unutar izbornika Data pod nazivom Data Analysis.

U prozoru *Data Analysis* treba izabrati *Regression* te kliknuti OK. Zatim u postavkama regresije, u polje **Y Range** unesene su vrijednosti koncentracije klorofila *a* (**ln(klorofil-a)**), dok su u **X Range** unesene vrijednosti **ln(iop_apig)** te treba kliknuti OK (Slika 26). Rezultati regresijske analize otvaraju se u novom listu u Excelu (Slika 27).

SUMMARY OUTPUT									
<i>Regression Statistics</i>									
Multiple R		0.644020263							
R Square		0.414762099							
Adjusted R Square		0.297714518							
Standard Error		0.43537274							
Observations		7							
<i>ANOVA</i>									
		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression		1	0.671674854	0.671674854	3.543534157	0.118506636			
Residual		5	0.947747114	0.189549423					
Total		6	1.619421968						
		<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept		-2.825613479	0.874079335	-3.232673929	0.023136909	-5.072505941	-0.578721017	-5.072505941	-0.578721017
X Variable 1		-1.41050194	0.749299385	-1.88242773	0.118506636	-3.336637328	0.515633448	-3.336637328	0.515633448

Slika 27. Rezultat regresije za klorofil *a*

Dobiveni regresijski rezultati poslužili su za procjenu stupnja povezanosti između satelitski izvedenih i terenski izmjerenih parametara te za vrednovanje potencijala primjene rezultata C2RCC-a u modeliranju koncentracije klorofila *a* u površinskim vodama. Na temelju regresijske analize između prirodnog logaritma koncentracije klorofila *a* i vrijednosti *iop_apig*, izračunate su vrijednosti CHL eksponenta i CHL faktora. Vrijednost koeficijenta uz polje *X Variable 1* (Slika 27) predstavlja CHL eksponent, dok je CHL faktor dobiven tako da je na vrijednost koeficijenta uz polje *Intercept* (Slika 27) primijenjena Excel formula EXP, čime je izračunata stvarna vrijednost faktora u jednadžbi.

Identičan postupak primijenjen je i za izračun prirodnih logaritama za TSM i *iop_btot* (Tablica 6), izračun regresijske analize (Slika 28) te izračun TSM faktora i eksponenta, s time da je jedina razlika bila u tome što su se u regresijskoj analizi u polje **Y Range** unosile vrijednosti prirodnog logaritma koncentracije TSM-a (**ln(TSM)**), dok su se u polje **X Range** unosile vrijednosti prirodnog logaritma vrijednosti *iop_btot* (**ln(iop_btot)**). Vrijednost koeficijenta uz polje *X Variable 1* (Slika 28) predstavlja TSM eksponent, dok je TSM faktor dobiven tako da je na vrijednost koeficijenta uz

polje *Intercept* (Slika 28) primijenjena Excel formula EXP, čime je izračunata stvarna vrijednost faktora u jednadžbi.

Tablica 6. Usporedba prirodnih logaritama vrijednosti dobivenih algoritmom C2RCC i izmjerenih vrijednosti TSM-a

ID	Izmjerene vrijednosti	C2RCC	Prirodni logaritmi	
	TSM (mg/L)	iop_btot	ln(TSM)	ln(iop_btot)
101	3.00	5.00127	1.10	1.60969
102	9.71	6.86728	2.27	1.92677
103	11.67	4.01717	2.46	1.39058
104	10.59	4.47872	2.36	1.49934
105	10.67	6.83917	2.37	1.92267
106	9.41	7.09955	2.24	1.96003
107	9.12	2.67942	2.21	0.98560

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.011498399							
R Square	0.000132213							
Adjusted R Square	-0.199841344							
Standard Error	0.513336166							
Observations	7							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	1	0.000174223	0.000174223	0.000661153	0.980481002			
Residual	5	1.317570095	0.263514019					
Total	6	1.317744318						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	2.119739776	0.963165139	2.200806166	0.079013642	-0.356155034	4.595634586	-0.356155034	4.595634586
X Variable 1	0.015034216	0.584695404	0.025712902	0.980481002	-1.487973169	1.518041601	-1.487973169	1.518041601

Slika 28. Rezultat regresije za TSM

Izračunate vrijednosti koeficijenta CHL faktora, CHL eksponenta, TSM faktora i TSM eksponenta prikazane su u tablici 7.

Tablica 7. Vrijednosti koeficijenta CHL faktora, CHL eksponenta, TSM faktora i TSM eksponenta

Koeficijent	Vrijednost
CHL faktor	0.059
CHL eksponent	-1.411
TSM faktor	8.329
TSM eksponent	0.015

3.5.3. Druga iteracija atmosferske korekcije C2RCC

Nakon provedene regresijske analize algoritam C2RCC ponovno se pokreće s ažuriranim ulaznim parametrima. U ovoj fazi, uz prethodno unesene vrijednosti za parametre salinitet, temperatura zraka, ozon, tlak zraka i nadmorska visina, unose se izračunate vrijednosti TSM faktora, TSM eksponenta, CHL faktora i CHL eksponenta (Tablica 7, Slika 29).

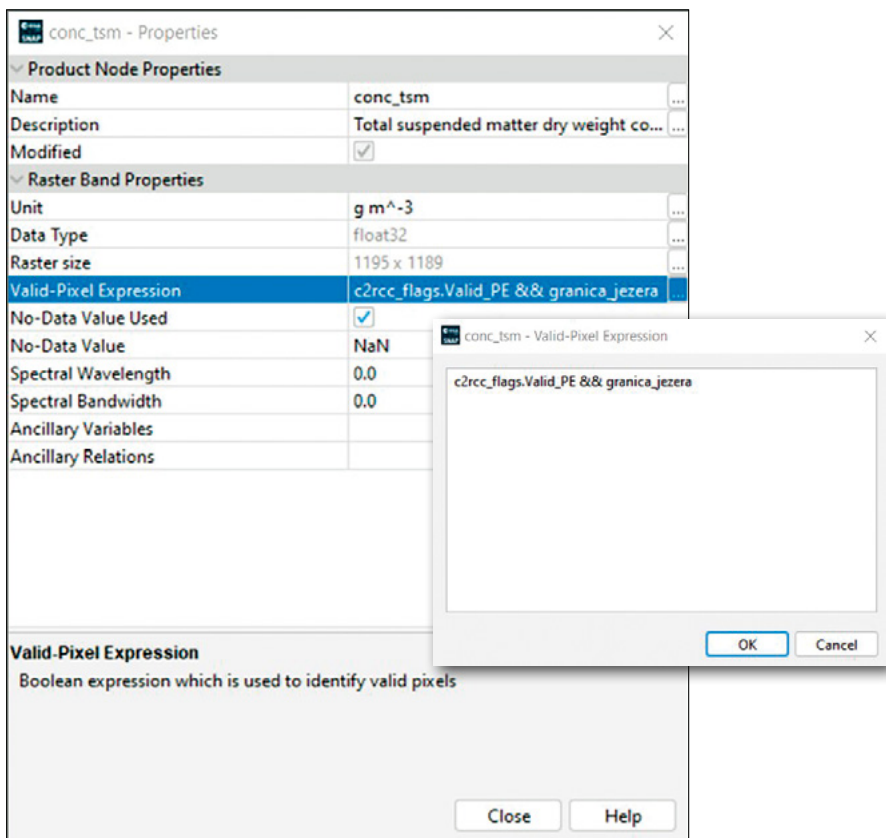
The screenshot shows the 'C2RCC MSI Processor' window with the 'Processing Parameters' tab selected. The parameters are as follows:

Parameter	Value	Unit
Valid-pixel expression:	B8 > 0 && B8 < 0.1	
Salinity:	2.6	PSU
Temperature:	18.0	C
Ozone:	291.4	DU
Air Pressure at Sea Level:	1016.0	hPa
Elevation:	0.4	m
TSM factor:	8.329	
TSM exponent:	0.015	
CHL exponent:	-1.411	
CHL factor:	0.059	
Threshold rtosa OOS:	0.05	
Threshold AC reflectances OOS:	0.1	
Threshold for cloud flag on down transmittance @065:	0.955	
Atmospheric aux data path:		
Alternative NN Path:		
Set of neuronal nets:	C2RCC-Nets	
Output AC reflectances as rrs instead of rhow	<input type="checkbox"/>	
Derive water reflectance from path radiance and transmittance	<input type="checkbox"/>	
Use ECMWF data, if available	<input checked="" type="checkbox"/>	
Digital Elevation Model:	Copernicus 30m Global DEM	
Output TOA reflectances	<input checked="" type="checkbox"/>	
Output gas corrected TOSA reflectances	<input type="checkbox"/>	
Output gas corrected TOSA reflectances of auto nn	<input type="checkbox"/>	
Output path radiance reflectances	<input type="checkbox"/>	
Output downward transmittance	<input type="checkbox"/>	
Output upward transmittance	<input type="checkbox"/>	
Output atmospherically corrected angular dependent reflectances	<input checked="" type="checkbox"/>	
Output normalized water leaving reflectances	<input checked="" type="checkbox"/>	
Output out of scope values	<input type="checkbox"/>	
Output irradiance attenuation coefficients	<input checked="" type="checkbox"/>	
Output uncertainties	<input checked="" type="checkbox"/>	

Slika 29. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2RCC

Rezultat druge iteracije atmosferske korekcije C2RCC treba prikazati u prostoru za prikazivanje podataka dvostrukim klikom na sloj **conc_chl** i **conc_tsm**. Kada se u analizi želi raditi samo s područjem jezera, potrebno je ograničiti obradu isključivo na piksele koji se nalaze unutar njegove granice. To se najčešće postiže tako da se granica jezera unese kao maska ili vektorski sloj **granica_jezera.shp**, a zatim se ta maska uključi u *Valid Pixel Expression*. Ako se uveze Shapefile s granicom jezera putem izbornika *Vector* → *Import* → *ESRI Shapefile*, SNAP automatski stvara masku s istim nazivom kao i sloj. Ta se maska pojavljuje u prozoru *Mask Manager*, a može se pozvati u izrazu s pomoću njezina imena (bez imena formata datoteke).

Polje *Valid Pixel Expression* nalazi se u prozoru *Properties* za pojedini band. Nakon što se u njega upiše odgovarajući izraz (npr. za sloj **conc_chl** treba upisati

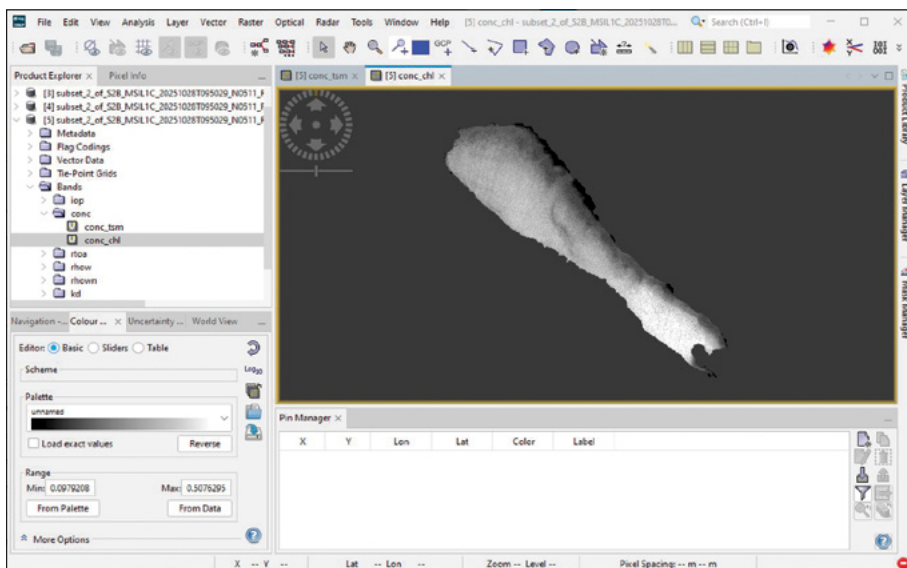


Slika 30. Maskiranje rastera na područje jezera

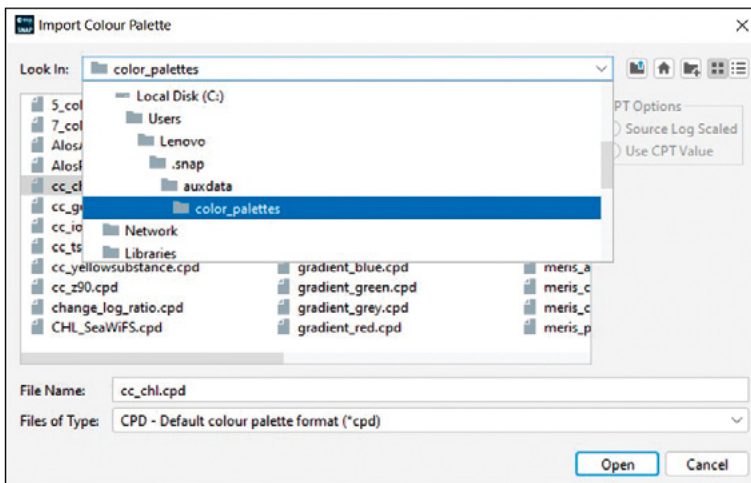
c2rcc_flags.Valid_PE && granica_jezera) (Slika 30), SNAP automatski primjenjuje filtriranje. Pikseli koji ne zadovoljavaju uvjet više se ne prikazuju u prozoru slike, a svi izračuni i statistike (histogram, profil, ROI analiza) odnose se isključivo na područje koje je određeno izražajem. U praksi to znači da će se svi rezultati odnositi samo na vodeno tijelo omeđeno granicom jezera. Isti izraz treba primijeniti za sloj **conc_tsm**.

Upisivanje granice jezera u *Valid Pixel Expression* stoga predstavlja način da se precizno definira prostor obrade i izbjegne utjecaj okolnog kopna, vegetacije ili drugih površina. Na taj se način svi statistički parametri i vrijednosti piksela odnose isključivo na stvarno područje vode, što je ključno za točnost analize i validaciju rezultata.

Maskirani sloj **conc_chl** prikazan je na slici 31. Stilizacija rastera u programu SNAP provodi se da bi se poboljšala čitljivost, kontrast i vizualna interpretacija podataka. Dodjeljivanje odgovarajućih boja pojedinim rasponima vrijednosti omogućuje brže prepoznavanje uzoraka, prostorne distribucije ili promjena unutar scene. Za daljnju stilizaciju koristi se alat *Colour Manipulation* koji omogućuje definiranje raspona vrijednosti piksela (minimum i maksimum), dodjeljivanje boja pojedinim klasama te odabir načina prikaza prijelaza između boja (linearno, diskretno ili logaritamski). SNAP automatski izračunava osnovnu distribuciju vrijednosti i prema

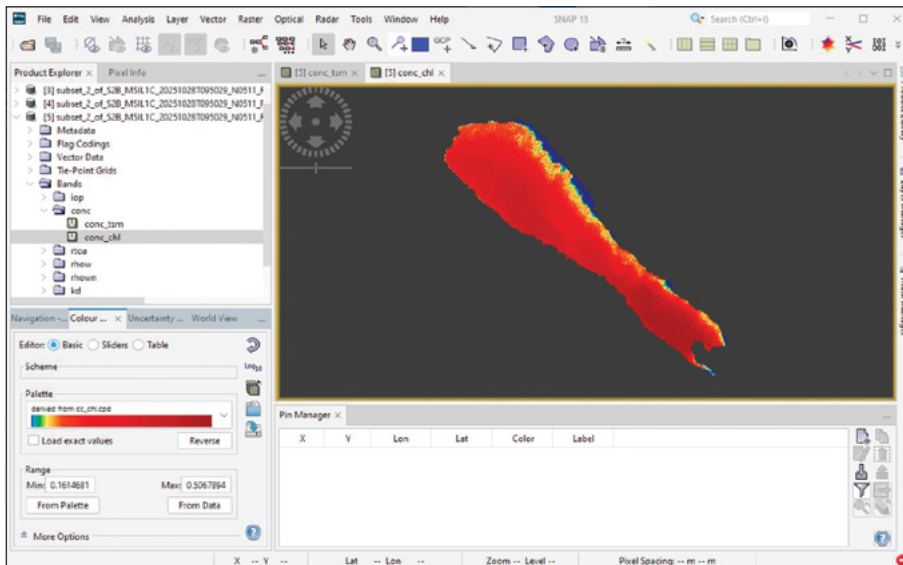


Slika 31. Prikaz maskiranog sloja **conc_chl**




Slika 32. Učitavanje palete boja

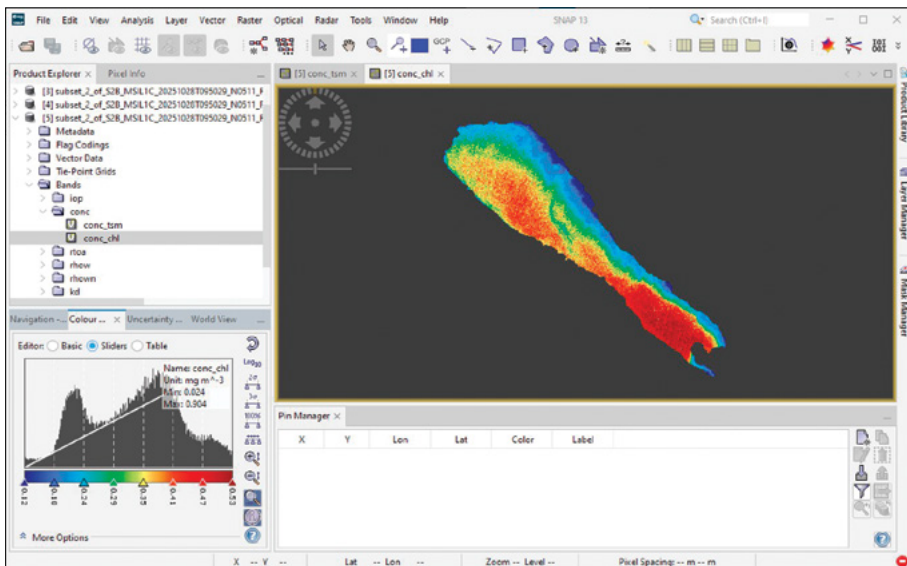
njoj predlaže početnu paletu boja. Korisnik može paletu boja ručno prilagoditi ili uvesti unaprijed pripremljenu datoteku s definicijom boja. Uvoz unaprijed definiranih paleta boja izvodi se putem opcije *Import Colour Palette from Text File* u prozoru *Colour Manipulation*. Ta opcija omogućuje učitavanje tekstualne datoteke koja sadrži parove vrijednosti i pripadajućih RGB boja.



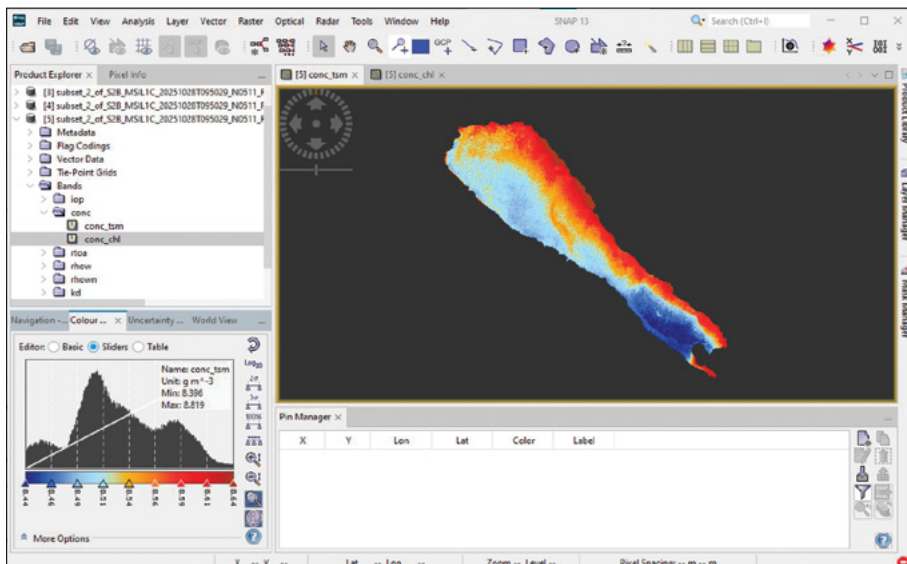
Slika 33. Prikaz sloja conc_chl s predefiniranom skalom boja

Promjena raspona skale boja može se ažurirati tako da se u prozoru *Colour Manipulation* pod *Editor* izabere *Sliders* i klikne na tekst *Rough statistics!* da se izračuna točnija statistika. Zatim pod *Editor* treba izabrati *Basic* te kliknuti na gumb *From Data*. Zatim treba učitati predefiniciranu skalu boja tako da se klikne na gumb *Import colour pallete from text file* te izabrati paletu **cc_chl** za sloj *conc_chl* (Slika 32) i paletu **cc_tsm** za sloj *conc_tsm*. Slika 33 prikazuje izgled sloja **conc_chl** s primijenjenom predefiniciranom skalom boja.

Samo učitavanje predefinicirane skale boja ne osigurava dobar prikaz rasprostranjenosti koncentracije klorofila *a*, što je jasno vidljivo iz histograma u prozoru *Colour Manipulation*, gdje se pokazuje da vrijednosti piksela nisu optimalno raspoređene unutar zadanog raspona boja. U softveru SNAP, prije primjene sigma-raspona preporučuje se kliknuti na gumb *Distribute Sliders Evenly*  jer ta opcija automatski i ravnomjerno raspoređuje klizalice po histogramu da bi se izbjeglo njihovo slučajno zbijanje i da bi se osigurao pravilno postavljen početni raspon. Nakon toga primjenjuje se 2-sigma ili 3-sigma rastezanje, pri čemu 2-sigma postavlja prikaz na prosjek ± 2 standardne devijacije i time pojačava kontrast izbacivanjem ekstremnih vrijednosti (oko 95 % piksela ostaje vidljivo), dok 3-sigma koristi prosjek ± 3 standardne devijacije, zadržava širi raspon (oko 99,7 % piksela) te daje uravnoteženiji prikaz s manje gubitka detalja. Ravnomjerno



Slika 34. Koncentracija klorofila *a* kao rezultat procesora C2RCC



Slika 35. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2RCC

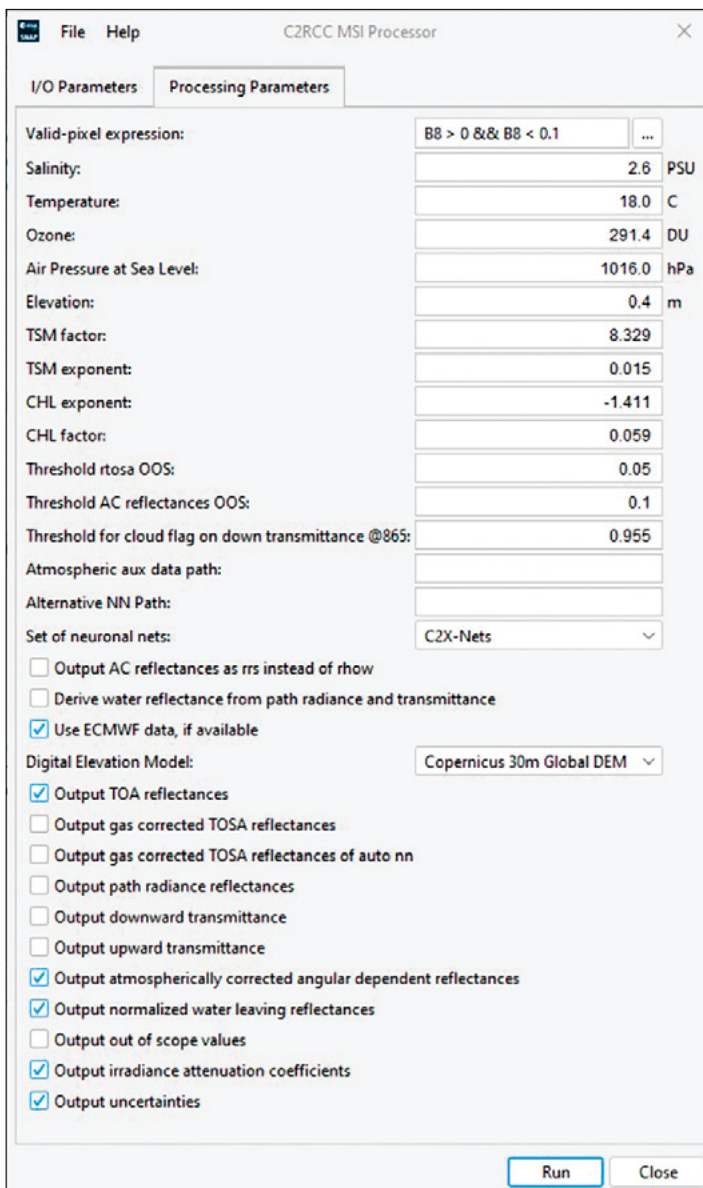
raspoređeni klizači omogućuju da sigma-raspon bude konzistentniji i vizualno predvidljiv, što poboljšava kvalitetu interpretacije slike. Dakle, treba prvo kliknuti na gumb *Distribute Sliders Evenly*, a zatim na gumb *Auto-adjust to 2-sigma (95.45%) of all pixels*.

Rezultat je prikaz sloja **conc_chl** u odgovarajućem rasponu boja prema vrijednosti piksela na području jezera (Slika 34). Na isti način treba stilizirati sloj **conc_tsm**, a rezultat treba izgledati kao na slici 35.

3.5.4. Primjena procesora C2X

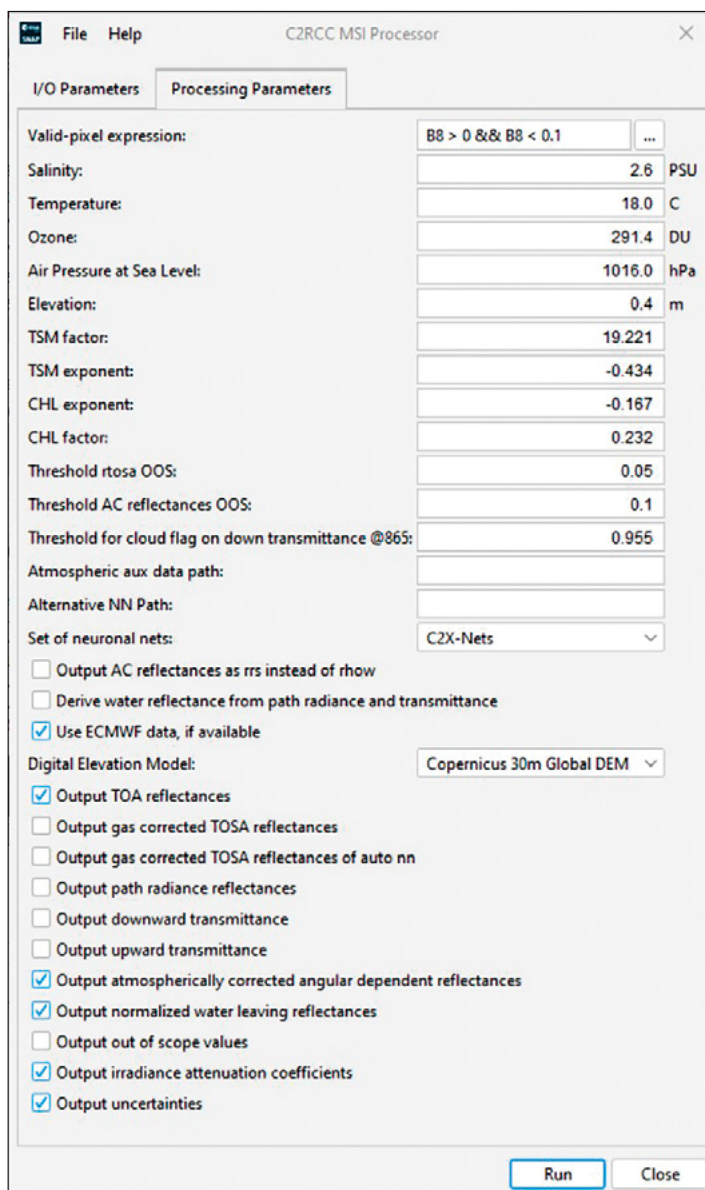
Procesor C2X-Nets (Case 2 Neural Networks) predstavlja napredni algoritamski pristup temeljen na dubokim neuronskim mrežama, razvijen za procjenu biološko-optičkih svojstava voda u optički kompleksnim uvjetima (tzv. Case 2 vode). Za razliku od konvencionalnih metoda koje se oslanjaju na višefazne postupke atmosferske korekcije i naknadnu derivaciju optičkih parametara, C2X-Nets omogućuje izravnu procjenu biofizičkih varijabli iz površinske refleksije. U okviru provedene analize kakvoće vode primijenjen je C2X procesor čiji je tehnički postupak obrade identičan onome korištenom u algoritmu C2RCC, pri čemu se ključna razlika ogleda u izboru neuronske mreže. Naime, pri korištenju C2X

procesora, u prozoru za postavke nužno je odabrati C2X-Nets kao aktivni skup neuronskih mreža. Te mreže posebno su trenirane na proširenim skupovima podataka relevantnim za specifične ekološke i optičke uvjete, što omogućuje



Slika 36. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2X

poboljšanu klasifikaciju i derivaciju biološko-optičkih parametara u složenim hidromorfološkim okruženjima. U odnosu na osnovni C2RCC algoritam, C2X-Nets predstavlja funkcionalnu nadogradnju, obogaćenu dodatnim simulacijama i te-



Slika 37. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2X

renskim podacima, osobito za vode s povišenim koncentracijama suspendiranih materijala i klorofila kakve su karakteristične za mutnije, eutrofične ili obalne sustave (Soriano-González i sur., 2022). Time se omogućuje veća točnost i robusnost u procjeni kakvoće vode u uvjetima gdje tradicionalni algoritmi često gube pouzdanost.

Postupak atmosferske korekcije jednak je onome opisanom za procesor C2RCC. Pritom treba voditi računa da se u prozoru *C2RCC MSI Processor* u kartici *I/O Parameters* kao *MSI L1C product* izabere proizvod koji je rezultat *subseta* iz poglavlja 3.4.3, a pod *Target Product* pa pod *Name* treba unijeti novo ime za spremanje datoteke da se ne bi prebrisala već postojeća datoteka. Osim toga, razlika u kartici *Processing Parameters* samo je odabir skupa neuronskih mreža: pod *Set of neuronal nets* treba odabrati **C2X-Nets**. Svi ostali parametri ostaju kao na slici 36.

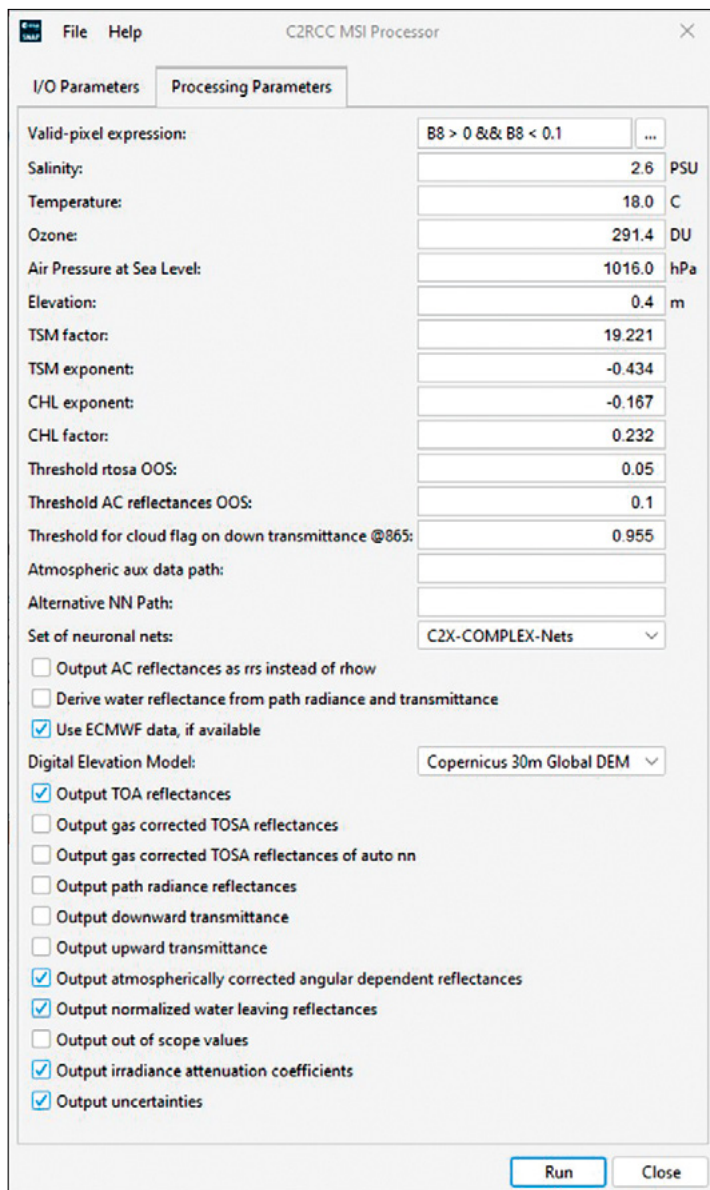
Nakon provedene inicijalne atmosferske korekcije daljnji postupci jednaki su onima opisanima za procesor C2RCC. Po završetku regresijske analize potrebno je unijeti odgovarajuće parametre za vrijednosti CHL eksponenta, CHL faktora, TSM eksponenta i TSM faktora (Slika 37) te ponovno pokrenuti procesor C2X-Nets.

3.5.5. Primjena procesora C2XC

Procesor C2XC-Nets predstavlja najnoviju generaciju neuronskih mreža integriranih u softver SNAP, posebno razvijenih za obradu izrazito kompleksnih vodenih tijela u kojima su prisutne kombinacije različitih optičkih karakteristika. U svrhu omogućavanja usporedbe između različitih pristupa modeliranju biološko-optičkih parametara, C2XC algoritam primijenjen je paralelno s prethodno korištenim procesorima C2RCC i C2X, pri čemu je cijeli postupak obrade izveden identično, osiguravajući metodološku dosljednost i omogućujući pouzdanu usporedbu rezultata. Ključna prednost C2XC algoritma u njegovoj je optimizaciji za rad u složenim vodenim sustavima koji uključuju visoku heterogenost suspendiranih tvari, organskih pigmenata i otopljenog materijala, osobito u jezerima pod utjecajem antropogenih i prirodnih eutrofikacijskih procesa.

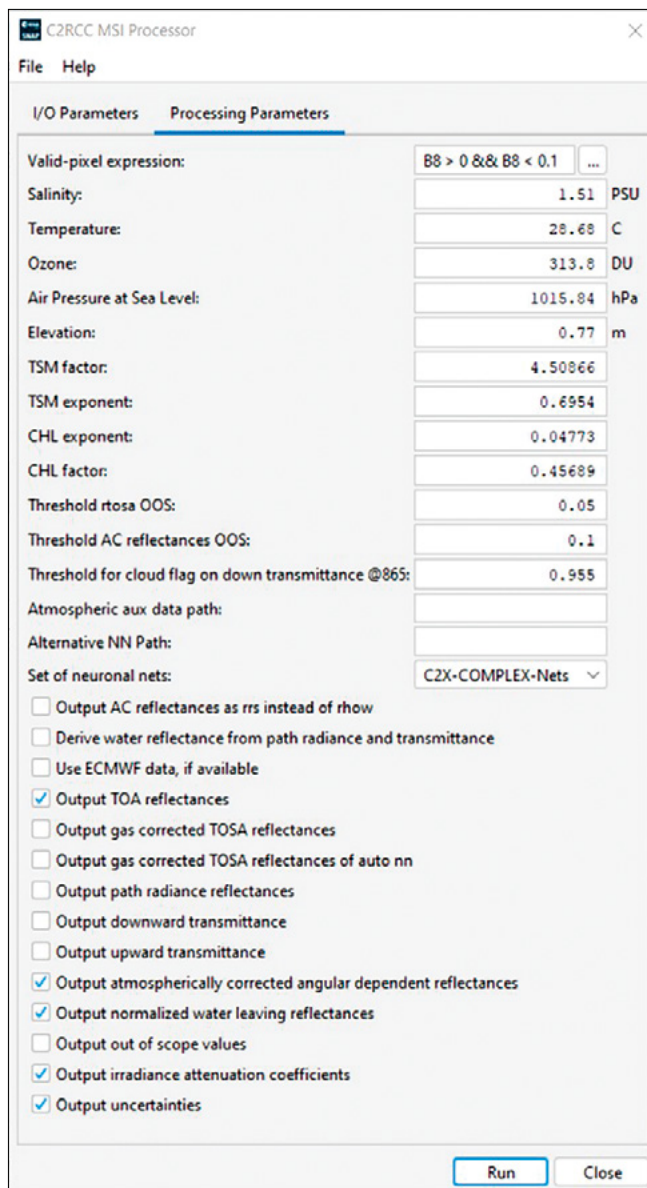
Za razliku od prethodnih modela, C2XC koristi alternativni skup neuronskih mreža koje se oslanjaju na drukčije parametre za modeliranje raspršenja i apsorpcije, s naglaskom na ukupno stražnje raspršenje (total backscattering) kao dominantni mehanizam za opis refleksije u uvjetima visoke optičke složenosti. Time se postiže

bolja prilagodba algoritma vodama s jakom varijabilnošću biološko-optičkih svojstava, kao što su turbidni estuariji, eutrofična jezera i vodena tijela s izraženom prisutnošću cvjetanja algi.



Slika 38. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2XC

Glavna razlika između algoritama C2RCC, C2X i C2XC ogleda se u opsezima unutrašnjih optičkih svojstava na kojima su trenirane njihove neuronske mreže. Dok su C2RCC i C2X trenirani na širim, ali standardiziranim spektrom slučajeva, C2XC je



Slika 39. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2XC

treniran na ekstremnijim i kompleksnijim kombinacijama raspršenja i apsorpcije (Soriano-González i sur., 2022).

Postupak atmosferske korekcije identičan je onome opisanom za procesor C2RCC. Pritom treba voditi računa da se u prozoru *C2RCC MSI Processor* u kartici *I/O Parameters* kao *MSI L1C product* izabere proizvod koji je rezultat *subseta* iz poglavlja 3.4.3, a pod *Target Product* pa pod *Name* treba unijeti novo ime za spremanje datoteke da se ne bi prebrisala već postojeća datoteka. Osim toga, razlika u kartici *Processing Parameters* samo je u odabiru skupa neuronskih mreža: pod *Set of neuronal nets* potrebno je odabrati **C2X-COMPLEX-Nets**. Svi ostali parametri ostaju isti kao na slici 38.

Nakon provedene početne atmosferske korekcije, daljnji postupci odgovaraju onima opisanim za procesor C2RCC. Po završetku regresijske analize potrebno je unijeti odgovarajuće parametre za vrijednosti CHL eksponenta, CHL faktora, TSM eksponenta i TSM faktora (Slika 39).

3.6. Rezultati algoritama C2RCC, C2X i C2XC

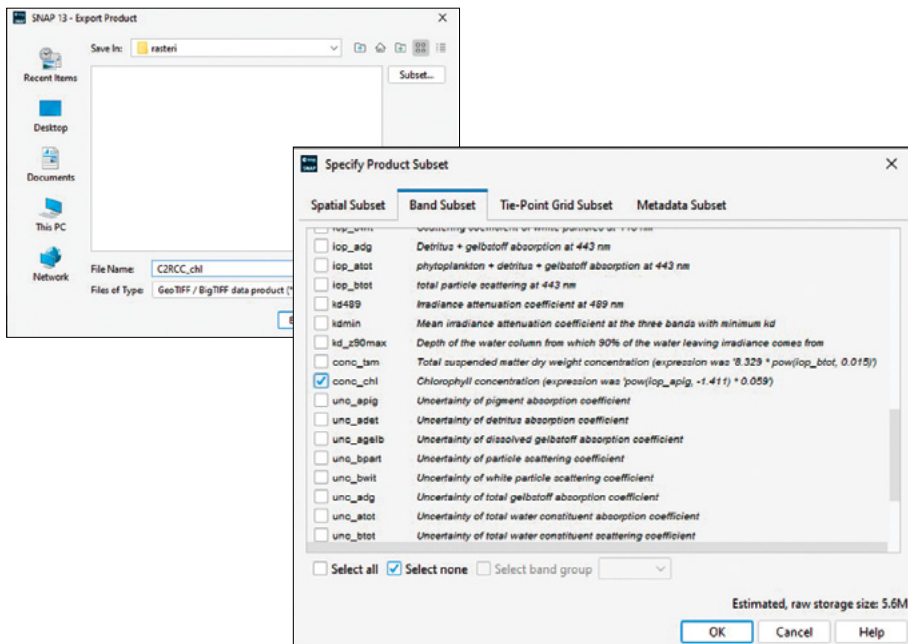
Da bi se procijenila učinkovitost različitih algoritama u procjeni optičkih parametara vode, provedena je usporedna analiza triju modela dostupnih u programskom okruženju SNAP: C2RCC, C2X i C2XC. Analiza je obuhvatila procjenu koncentracije klorofila *a* i TSM-a.

3.6.1. Procesor C2RCC

Nakon obrade podataka s pomoću procesora C2RCC, slojevi **conc_chl** (Slika 34) i **conc_tsm** (Slika 35) prikazuju se kao virtualni slojevi unutar radnog prostora softvera SNAP. Budući da se radi o virtualnim proizvodima, oni nisu fizički pohranjeni na disku sve dok se eksplicitno ne konvertiraju u stvarne rasterske datoteke.

Za konverziju virtualnih slojeva u stvarne potrebno je u prozoru *Product Explorer* desnim klikom odabrati željeni sloj (npr. **conc_chl**) te u izborniku izabrati opciju *Convert Band*. Nakon toga sloj postaje stvarni raster i može se izvoziti ili dalje analizirati.

Za izvoz rezultata treba u prozoru *Product Explorer* označiti proizvod koji se želi izvesti te se koristi opcija *File* → *Export* → *GeoTIFF* (Slika 40). U dijaloškom



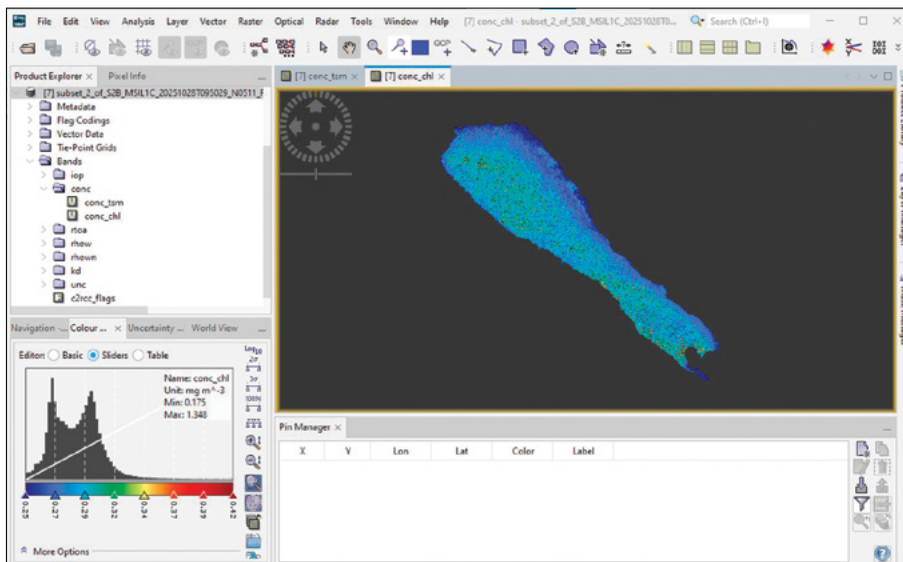
Slika 40. Izvoz slojeva u GeoTIFF

okviru potrebno je odabrati željeni direktorij i naziv datoteke i treba kliknuti na gumb *Subset* pri čemu se otvara novi prozor *Specify Product Subset*. U novootvorenom prozoru treba u kartici *Band Subset* kliknuti na opciju *Select none* te označiti samo sloj **conc_chl**, a zatim se potvrđuje klikom na *OK*. Ako se otvore dva nova prozora koja pitaju za spremanje drugih slojeva ili slično, treba izabrati opciju *No*, odnosno da se spremi samo željeni sloj **conc_chl** bez drugih slojeva. Tako se stvara fizička datoteka koja se može koristiti u drugim GIS ili analitičkim programima.

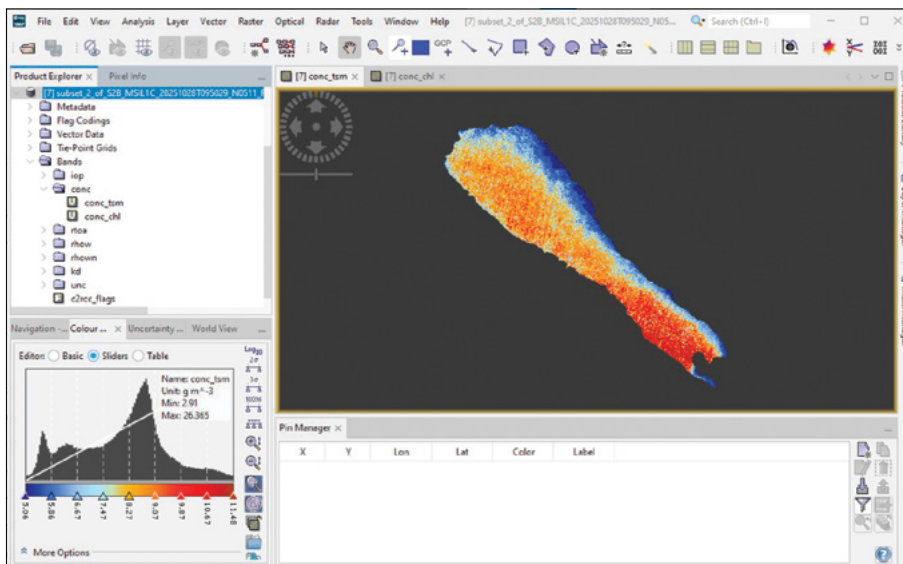
Na isti način treba izvesti sloj **conc_tsm** i spremiti ga u istu mapu na disku.

3.6.2. Procesor C2X

Rezultat rada procesora C2X predstavljaju rasteri koncentracije klorofila *a* (Slika 41) i koncentracije TSM-a (Slika 42). Vizualizaciju je potrebno prilagoditi na način opisan u poglavlju 3.5.3. Za oba sloja treba napraviti konverziju virtualnih slojeva u stvarne i izvesti ih na način opisan u prethodnom poglavlju te ih spremiti u istu mapu.



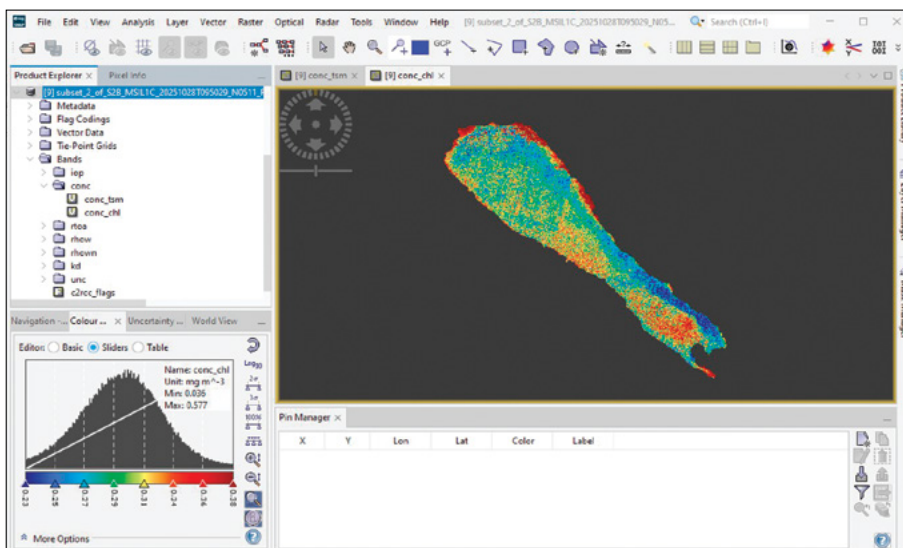
Slika 41. Koncentracija klorofila a kao rezultat procesora C2X



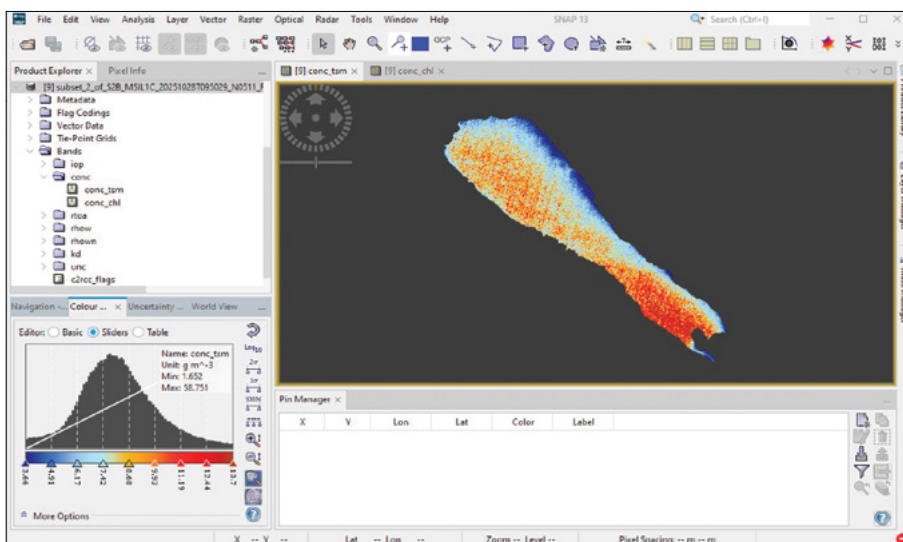
Slika 42. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2X

3.6.3. Procesor C2XC

Rezultat rada procesora C2XC čine rasteri koncentracije klorofila *a* (Slika 43) i koncentracije TSM-a (Slika 44). Vizualizaciju je potrebno prilagoditi prema postupku



Slika 43. Koncentracija klorofila a kao rezultat procesora C2XC



Slika 44. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2XC

opisanom u poglavlju 3.5.3. Za oba sloja treba napraviti konverziju virtualnih slojeva u stvarne i izvesti ih na način opisan u poglavlju 3.6.1. te ih spremiti u istu mapu.

3.7. Usporedba rezultata

U svrhu ocjene točnosti triju korištenih procesora (C2RCC, C2X i C2XC) u ovom priručniku napravljena je linearna regresija za dvije ključne varijable kakvoće vode: koncentraciju klorofila a i TSM. Analiza je obavljena na temelju usporedbe izmjerenih vrijednosti i onih procijenjenih iz satelitskih podataka, a da bi se postigla bolja linearnost i smanjila varijabilnost podataka, korištene su prirodno logaritmirane vrijednosti (\ln). Osim toga, za kvantitativnu procjenu točnosti i pouzdanosti modelskih rezultata korištene su standardne statističke mjere pogreške: srednja apsolutna pogreška (MAE – *Mean Absolute Error*), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE – *Root Mean Square Error*) i standardna devijacija pogreške (SD – *Standard Deviation*). Ti pokazatelji omogućuju objektivnu procjenu razlike između vrijednosti procijenjenih modelom i stvarno izmjerenih vrijednosti.

MAE predstavlja prosječnu apsolutnu razliku između procijenjenih i stvarnih vrijednosti. Računa se kao aritmetička sredina apsolutnih vrijednosti pogrešaka te pokazuje koliko model u prosjeku odstupa od izmjerenih podataka, neovisno o smjeru pogreške (podprocjena ili nadprocjena). MAE se izražava u istim jedinicama kao i promatrana varijabla, a niže vrijednosti ukazuju na veću točnost modela. Korištena formula za izračun MAE jest (Soriano-González i sur., 2022):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \quad (5)$$

gdje je

M_i procijenjena vrijednost iz procesora,

O_i izmjerena vrijednost, a

N broj točaka.

RMSE pokazuje prosječnu veličinu pogreške između modeliranih i izmjerenih vrijednosti, ali uz veću osjetljivost na veće odstupanja jer se pogreške kvadriraju prije izračuna srednje vrijednosti. RMSE se računa kao kvadratni korijen srednje vri-

jednosti kvadriranih pogrešaka i često se koristi kao glavna mjera ukupne točnosti modela. Budući da je osjetljiv na veća odstupanja, prikladan je pokazatelj za procjenu modela u situacijama gdje je ključno precizno opisivanje ekstremnih vrijednosti i varijabilnosti podataka. Niža vrijednost RMSE-a označava veću točnost i bolju usklađenost modela s promatranim vrijednostima. Korištena formula za izračun RMSE jest (Soriano-González i sur., 2022):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)^2}{N}} \quad (6)$$

gdje je

M_i procijenjena vrijednost iz procesora,
 O_i izmjerena vrijednost, a
 N broj točaka.

SD mjeri raspršenost pogrešaka modela oko njihove srednje vrijednosti. Ona pokazuje stabilnost modelskih procjena – manji SD znači da model daje konzistentnije rezultate (pogreške su uže raspodijeljene oko sredine), dok veći SD upućuje na veću varijabilnost i manju stabilnost modela. U kombinaciji s MAE i RMSE, SD pomaže u razumijevanju ne samo veličine pogrešaka nego i njihove homogenosti među uzorcima.

U kontekstu procjene kakvoće vode s pomoću satelitskih algoritama (kao što su C2RCC, C2X i C2XC), te su mjere od presudne važnosti jer omogućuju kvantitativnu validaciju modela i usporedbu njegove učinkovitosti u odnosu na stvarne, terenski izmjerene vrijednosti. Niska vrijednost MAE i RMSE te mali SD ukazuju na visok stupanj pouzdanosti modela i njegovu prikladnost za operativno praćenje parametara kakvoće vode, dok više vrijednosti tih pokazatelja sugeriraju potrebu za dodatnom kalibracijom algoritma u specifičnim optičkim i hidromorfološkim uvjetima promatranog područja.

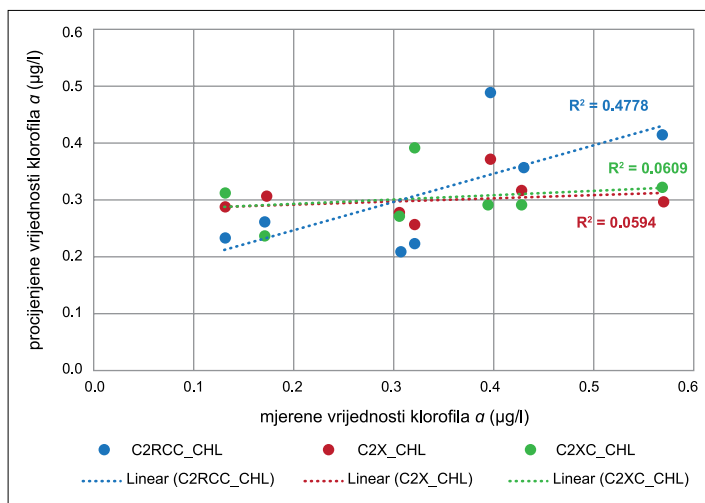
3.7.1. Ocjena točnosti modela

Dobivene vrijednosti statističkih pokazatelja pogreške korištene su za procjenu točnosti i stabilnosti procesora C2RCC, C2X i C2XC u procjeni koncentracije klorofila *a* i TSM-a. Rezultati pokazuju jasnu razliku u kvaliteti modelskih procjena između ta dva parametra (Tablica 8 i Tablica 9).

Tablica 8. Ocjena točnosti modela za klorofil *a*

ID	Chl-a	C2RCC_CHL	C2X_CHL	C2XC_CHL	NDCI
101	0.32	0.23	0.26	0.39	-0.0323
102	0.31	0.21	0.28	0.27	-0.0318
103	0.57	0.41	0.30	0.32	-0.0234
104	0.43	0.36	0.31	0.29	-0.0327
105	0.13	0.23	0.29	0.31	-0.0331
106	0.17	0.26	0.30	0.24	-0.0386
107	0.40	0.49	0.37	0.29	-0.0260
SD		0.10	0.14	0.14	
RMSE		0.10	0.14	0.14	
MAE		0.10	0.11	0.12	
R2		0.48	0.06	0.06	

Analiza dobivenih statističkih pokazatelja za tri korištena procesora pokazuje jasne razlike u njihovoj učinkovitosti pri procjeni koncentracije klorofila *a* u Vranskom jezeru. Najbolje rezultate ostvaruje procesor C2RCC, s vrijednostima pogrešaka RMSE = 0.10, MAE = 0.10 i SD = 0.10, uz koeficijent determinacije $R^2 = 0.48$ (Tablica 8, Slika 45). Takvi rezultati ukazuju na to da algoritam C2RCC daje relativno konzistentne, ali blago pristrane procjene. Takav rezultat može biti posljedica optičkih svojstava vode, utjecaja otopljenih


Slika 45. Linearna regresija mjerene vrijednosti klorofila *a* s procijenjenim vrijednostima klorofila *a* dobivenim procesorima

organskih tvari i niskih koncentracija klorofila *a*, koje smanjuju osjetljivost algoritma u detekciji signala pigmenta iz satelitskih podataka, što je očekivano s obzirom na to da je C2RCC optimiziran za mezotrofne do eutrofne vode, ali se u praksi pokazuje dovoljno stabilnim i u uvjetima niskih koncentracija klorofila *a* kakve su zabilježene u ovom jezeru.

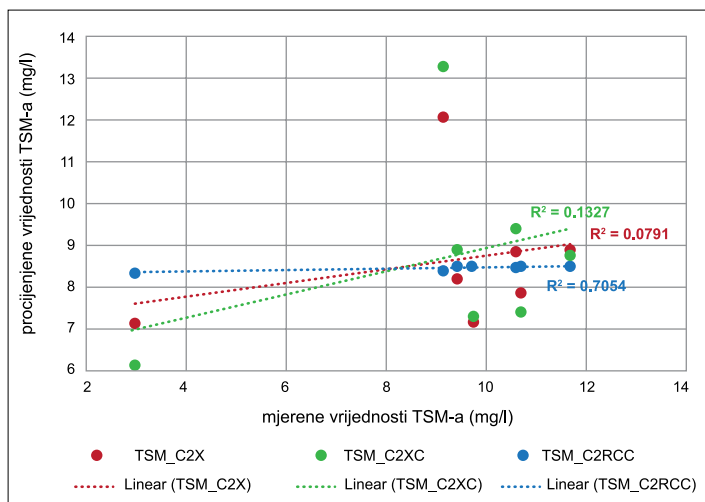
Suprotno tome, procesori C2X i C2XC pokazuju znatno slabiju izvedbu. Oba procesora imaju veće vrijednosti pogrešaka (RMSE = 0.14 µg/l; MAE = 0.11–0.12 µg/l; SD = 0.14 µg/l) te vrlo niske koeficijente determinacije ($R^2 = 0.06$). To ukazuje na to da ni C2X ni C2XC nisu prikladni za modeliranje optički jednostavnih i oligotrofnih vodnih tijela poput Vranskog jezera. Njihove neuronske mreže trenirane su za kompleksnije uvjete, s višim koncentracijama suspendiranih tvari i klorofila, što dovodi do većih odstupanja u područjima niske optičke varijabilnosti.

Sveukupno, rezultati pokazuju da je u analiziranim uvjetima C2RCC najpouzdaniji prediktor koncentracije klorofila *a* među trima testiranim procesorima atmosferske korekcije. Procesori C2X i C2XC ne daju zadovoljavajuću točnost za oligotrofne vode, stoga nisu preporučljivi za primjenu u ovom području.

Tablica 9. Ocjena točnosti modela za TSM

ID	TSM	C2RCC_TSM	C2X_TSM	C2XC_TSM	NDTI
101	3.00	8.37	7.16	6.11	-0.1418
102	9.71	8.57	7.26	7.34	-0.1630
103	11.67	8.55	8.93	8.78	-0.1855
104	10.59	8.52	8.88	9.43	-0.1858
105	10.67	8.57	7.92	7.44	-0.2007
106	9.41	8.58	8.29	8.92	-0.2029
107	9.12	8.45	12.10	13.32	-0.1600
	SD	2.58	2.66	2.73	
	RMSE	2.66	2.71	2.76	
	MAE	2.18	2.56	2.49	
	R2	0.71	0.08	0.13	

Analiza statističkih pokazatelja za TSM potvrđuje jasnu razliku u učinkovitosti između triju primijenjenih procesora. Procesor C2RCC ponovno pokazuje najbolju izvedbu među njima (Tablica 9, Slika 46). Vrijednosti pogrešaka (RMSE = 2.66 mg/L; MAE = 2.18 mg/L; SD = 2.58 mg/L) pokazuju da C2RCC sustavno podcjenjuje TSM u odnosu na izmjerene vrijednosti, no unatoč tome ostvaruje vrlo visoku povezanost



Slika 46. Linearna regresija mjerene vrijednosti TSM-a s procijenjenim vrijednostima TSM-a dobivenih procesorima

s *in situ* podacima ($R^2 = 0.71$). Takav rezultat ukazuje na to da C2RCC dobro opisuje prostornu varijabilnost TSM-a te da se, uz lokalnu kalibraciju, može pouzdano koristiti u jezerskim sustavima s umjerenim koncentracijama suspendiranih tvari.

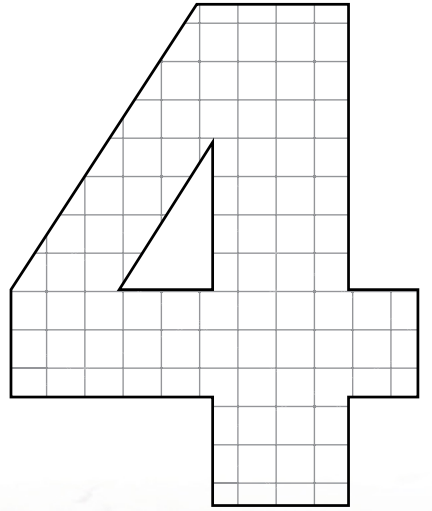
Suprotno tome, procesori C2X i C2XC postižu znatno lošije rezultate. RMSE i MAE vrijednosti za oba procesora veće su nego kod C2RCC, što upućuje na dodatna odstupanja od izmjerenih koncentracija TSM-a. Uz to, vrlo niski koeficijenti determinacije ($R^2 = 0.08$ za C2X i $R^2 = 0.13$ za C2XC) ukazuju na to da ta dva algoritma ne uspijevaju opisati stvarnu varijabilnost TSM-a u Vranskom jezeru. Takvi rezultati očekivani su s obzirom na to da su C2X i C2XC optimizirani za optički kompleksnije, turbidne sustave s višim koncentracijama suspendiranih materijala nego što je slučaj u analiziranom jezeru.

Dodatno je analizirana i pouzdanost spektralnog indeksa NDTI čija je korelacija s rezultatima procesora iznosila: vrijednosti R^2 su 0 za C2X i C2XC te 0.66 za C2RCC, što ukazuje na to da samo C2RCC djelomično zadržava informaciju sadržanu u spektralnog omjeru relevantnom za mutnoću. Ukupno gledajući, rezultati pokazuju da je C2RCC najučinkovitiji procesor za procjenu TSM-a u Vranskom jezeru. Ti rezultati potvrđuju da algoritam C2RCC pouzdano procjenjuje količinu suspendiranih čestica u vodi što je u skladu s činjenicom da je algoritam razvijen primarno za optičke parametre povezane s raspršenjem svjetlosti, kakvi dominiraju u slučajevima visoke zamućenosti. Procesori C2X i C2XC, iako pogodni za optički kompleksnije vode, ne postižu zadovoljavajuću točnost u uvjetima umjerenih niskih koncentracija suspendiranih tvari.

LITERATURA

- BATINA, A., & ŠILJEG, A. (2025). Enhancing water quality monitoring in a coastal shallow lake using GIS and multi-criteria decision analysis. *Environmental and Sustainability Indicators*, 28, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100881>
- BATINA, A., ŠILJEG, A., & PEDIĆ, G. (2025). *Salinity dynamics in Vrana Lake, Croatia: Seasonal variations and spatial distribution*. 2nd International Scientific Symposium – Interdisciplinary Approach to the Scientific Research of the Adriatic Sea (InspireAdriatic 2025).
- BROCKMANN, C., DOERFFER, R., PETERS, M., KERSTIN, S., EMBACHER, S., & RUESCAS, A. (2016). *Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters*. 740, 54.
- ESA. (n.d.). *C2RCC Processor Description*. ESA. Retrieved 19 November 2025, from <https://step.esa.int/main/wp-content/help/?version=11.0.0&helpid=c2rccProcessorDesc>
- Royal Belgian Institute for Space Aeronomy. (n.d.). *What is the Dobson Unit (DU)?* <https://sacs.aeronomie.be/info/dobson.php>
- SCHILLER, H., & DOERFFER, R. (1999). Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), 1735–1746. <https://doi.org/10.1080/014311699212443>
- ŠILJEG, A., (2013). *Digitalni model reljefa u analizi geomorfometrijskih parametara – primjer PP Vransko jezero* [Doctoral Thesis]. University of Zadar.
- SORIANO-GONZÁLEZ, J., URREGO, E. P., SÒRIA-PERPINYÀ, X., ANGELATS, E., ALCARAZ, C., DELEGIDO, J., RUÍZ-VERDÚ, A., TENJO, C., VICENTE, E., & MORENO, J. (2022). Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*, 14(5), 1124. <https://doi.org/10.3390/rs14051124>
- SÒRIA-PERPINYÀ, X., DELEGIDO, J., URREGO, E. P., RUÍZ-VERDÚ, A., SORIA, J. M., VICENTE, E., & MORENO, J. (2022). Assessment of Sentinel-2-MSI Atmospheric Correction Processors and In Situ Spectrometry Waters Quality Algorithms. *Remote Sensing*, 14(19), 4794. <https://doi.org/10.3390/rs14194794>
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Method 160.2: Total Suspended Solids (TSS) (Gravimetric, Dried at 103–105 °C)* (No. EPA Method 160.2). United States Environmental Protection Agency.

- USLU, A., DUGAN, S. T., EL HMAIDI, A., & MUHAMMETOGLU, A. (2024). Comparative evaluation of spatiotemporal variations of surface water quality using water quality indices and GIS. *Earth Science Informatics*, 17(5), 4197–4212. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01389-1>
- VUKOVIĆ, N., ALEGRO, A., KOLETIĆ, N., RIMAC, A., & ŠEGOTA, V. (2020). *Analiza makrofita Vranskog jezera od 2010. Do 2019. Godine u okviru projekta CHANGE WE CARE.*



PROCJENA KAKVOĆE JEZERSKE VODE S POMOĆU INDEKSA KAKVOĆE VODE

Pogoršanje stanja površinskih voda postalo je značajan globalni izazov, ponajviše zbog porasta onečišćenja i utjecaja klimatskih promjena. Voda predstavlja ključni element okoliša, no kakvoća i površinskih i podzemnih voda već se dulje pogoršava zbog prirodnih procesa, ali i intenzivnih ljudskih aktivnosti (Uddin i sur., 2021; Wu i sur., 2017). Kakvoća vode rezultat je kompleksnih interakcija fizičkih, kemijskih i bioloških parametara koji podliježu prostorno-vremenskim varijacijama, što vodena tijela čini izrazito dinamičnim sustavima. Budući da nijedan pojedinačni parametar ne može u potpunosti opisati stanje vode, nužno je istovremeno pratiti više fizičkih, kemijskih i bioloških parametara da bi se dobila cjelovita slika njezine kakvoće (Brown i sur., 1970; Fortes i sur., 2023). Tradicionalne metode praćenja kakvoće vode odnose se na terenska i laboratorijska mjerenja fizičkih, kemijskih i bioloških parametara. Međutim, učinkovito upravljanje vodnim resursima zahtijeva obradu opsežnih skupova podataka o kakvoći vode, što može biti zahtjevno za analizu i interpretaciju. Stoga, da bi se olakšala evaluacija, razvijeni su različiti alati za procjenu kakvoće vode među kojima se posebno ističe model indeksa kakvoće vode (engl. *Water Quality Index* – WQI). Ti modeli koriste metodu objedinjavanja podataka da bi pojednostavili i saželi vremenski i prostorno varijabilne podatke u jedinstvenu numeričku vrijednost, tj. indeks koji prikazuje opće stanje kakvoće određenog vodnog tijela. Zbog svoje jednostavnosti i razumljivosti, WQI modeli često se koriste u ekološkom modeliranju za procjenu kakvoće jezerske vode (Atiz i Durduran, 2025; Uddin i sur., 2021; Vasistha i Ganguly, 2020; Wu i sur., 2018). U kontekstu ekološkog modeliranja, WQI omogućuje kvantitativnu procjenu prostorno-vremenskih promjena kakvoće vode te procjenu utjecaja prirodnih i antropogenih čimbenika (Atiz i Durduran, 2025). Naime,

veliki broj mjernih točaka unutar jezerskog sustava dovodi do stvaranja kompleksnih baza podataka čija je analiza zahtjevna i dugotrajna (Gradilla-Hernández i sur., 2020; Vasistha i Ganguly, 2020; Wu i sur., 2021). S obzirom na složenost podataka, WQI se pokazao korisnim alatom jer omogućuje sažimanje velikog broja parametara u jedinstvenu, lako razumljivu vrijednost koja olakšava interpretaciju i usporedbu podataka kroz prostor i vrijeme (Atiz i Durduran, 2025).

4.1. Definicija i važnost indeksa kakvoće vode

Indeks kakvoće vode predstavlja numerički pokazatelj koji sintetizira podatke o više parametara kakvoće vode u jednu jedinstvenu vrijednost (Tyagi i sur., 2020). Poznati su i kao kompozitni indeksi koji omogućuju kvantitativnu procjenu stanja vode, pri čemu su njihove vrijednosti najčešće standardizirane unutar raspona od 0 do 100, gdje više vrijednosti označavaju bolju kakvoću (Chidiac i sur., 2023; Ram i sur., 2021). Cilj je generiranja indeksa pojednostaviti kompleksne informacije i olakšati procjenu stanja vodnog tijela. WQI ne zamjenjuje detaljnu analizu pojedinačnih parametara, ali omogućuje brzu i intuitivnu procjenu opće kakvoće vode. Koncept indeksa kakvoće vode razvio je Horton 1965. godine u SAD-u koristeći deset ključnih parametara za procjenu kakvoće vode pri čemu je svakom parametru određena težinska vrijednost (ponder), što je imalo značajan utjecaj na konačni rezultat (Tyagi i sur., 2020).

Koncept indeksa kakvoće vode sastoji se od četiri osnovne komponente. Prvi korak odnosi se na odabir relevantnih parametara kakvoće vode. Drugi korak obuhvaća proces pretvaranja vrijednosti prikupljenih parametara u jednostavne, bezdimenzijske podindekse. Nakon toga određuju se ponderi za svaki parametar kakvoće vode. Na kraju se izračunava konačna jedinstvena vrijednost indeksa kakvoće vode, primjenom funkcije agregacije koja uključuje sve podindekse i njihove ponderirane vrijednosti (Chidiac i sur., 2023; Uddin i sur., 2021).

4.2. Vrste indeksa kakvoće vode

Vrste indeksa kakvoće vode razlikuju se prema svrsi, metodologiji izračuna i parametrima koji se uključuju. Mogu se podijeliti u četiri osnovne skupine: opći, specifični, statistički i indeksi planiranja/donošenja odluka (Uslu i sur., 2024). Opći indek-

si kakvoće vode koriste se za ocjenu ukupne kakvoće vode, bez obzira na njezinu konkretnu namjenu, dok su specifični indeksi razvijeni za određene svrhe, poput procjene zdravlja vodenih ekosustava. Među najpoznatijim su općim indeksima NSF-WQI (*National Sanitation Foundation Water Quality Index*), CCME-WQI (*Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index*), WQI Oregona i drugi, koji kombiniraju različite fizičko-kemijske parametre u jedinstvenu ocjenu. Nadalje, indeks toksičnosti za vodene organizme primjer je specifičnih indeksa za procjenu zdravlja vodenih ekosustava. Statistički indeksi primjenjuju metode poput faktor-ske i glavne komponentske analize da bi se objektivno utvrdili ključni parametri za ocjenu kakvoće vode. U novije vrijeme sve se češće koriste pristupi temeljeni na umjetnoj inteligenciji, često u kombinaciji sa spektralnim indeksima. Također, razvijeni su i indeksi koji služe planiranju i donošenju odluka, uzimajući u obzir širi kontekst, poput ekoregionalnih karakteristika, navodnjavanja, pitke vode i kontrole difuznog onečišćenja (Uslu i sur., 2024).

Iako ovi indeksi omogućuju preglednu i sažetu procjenu kakvoće vode, imaju određena ograničenja. Među najznačajnijima su potencijalni gubitak informacija zbog agregacije podataka te subjektivnost u određivanju pondera pojedinih parametara. Osim toga, ne postoji univerzalno prihvaćen indeks koji se može primijeniti u različitim okolišnim i hidrološkim uvjetima što dodatno otežava usporedivost rezultata između različitih ekosustava (Fortes i sur., 2023).

4.3. Daljinska istraživanja i spektralni indeksi kakvoće vode

Razvoj višestrukih izvora promatranja i napredak tehnologije daljinskih istraživanja omogućili su brzo i precizno praćenje vodenog ekosustava. Od 70-ih godina 20. stoljeća satelitska tehnologija daljinskih istraživanja značajno je napredovala, stoga integracija indeksa kakvoće vode s daljinskim istraživanjem i GIS-om poboljšava modeliranje jezerskog ekosustava (Mogane i sur., 2023; Uslu i sur., 2024; Zhang i sur., 2021). Daljinska istraživanja, posebno putem satelitskih senzora, sve su korisniji alat u praćenju kakvoće vode. U kombinaciji s *in situ* mjerenjima omogućuju učinkovitije, prostorno šire i vremenski učestalije praćenje stanja jezerskih vodenih tijela. Nadalje, spektralni indeksi koriste se za izdvajanje vode iz ostalih površina te za procjenu fizičkih, kemijskih i bioloških parametara kakvoće vode (Najafzadeh i Basirian, 2023). Oni se temelje na različitim reflektivnim svojstvima

vode. Primjerice NDWI indeks (engl. *Normalized Difference Water Index*) omogućuje detekciju površinskih voda jer voda snažno apsorbira blisko infracrveno zračenje (NIR), dok kopno i vegetacija reflektiraju te valne duljine. S druge strane, spektralni indeks MCI (engl. *Maximum Chlorophyll Index*) koristan je i vrijedan alat za praćenje površinskih cvjetanja algi. Prednost MCI-a je u tome što nije pod utjecajem faktora poput CDOM-a, suspendiranih sedimenata i dubine vode koji mogu utjecati na refleksiju vode. MCI vrijednosti pomažu u detektiranju lokacija s višim razinama klorofila *a*. Prema tome, različiti spektralni indeksi, kao što su NDWI i MCI, omogućuju učinkovitu detekciju površinskih voda te identifikaciju i praćenje cvjetanja algi putem reflektivnih svojstava vode i sadržaja klorofila *a*. U tom kontekstu, dugoročna analiza promjena kakvoće vode ključna je u razumijevanju dinamike jezerskog ekosustava. Brojna istraživanja potvrdila su učinkovitost kombinacije spektralnih indeksa i razvoja algoritama za detekciju vodenih površina te kvantifikaciju parametara kakvoće vode (Deoli i sur., 2021; Mishra i Mishra, 2012; Mogane i sur., 2023; Xu, 2006). Primjena modificiranog NDWI-a (MNDWI) istaknula se u analizi plitkih jezera zbog pouzdanosti u klasifikaciji vodenih piksela. Nadalje, normalizirani diferencijalni indeks klorofila *a* (NDCI), kako su istaknuli Mishra i Mishra (2012), pokazao je visoku učinkovitost u procjeni koncentracije klorofila *a* u optički složenim, eutrofnim i zamućenim vodama gdje konvencionalni indeksi često pokazuju ograničenja.

U analizi kakvoće površinskih voda s pomoću daljinske detekcije sve češće se koriste spektralni indeksi koji omogućuju kvantitativno i prostorno-vremensko praćenje ključnih parametara vodenih tijela. Među najrelevantnijima za procjenu bioloških karakteristika vodenih površina izdvajaju se NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*) i NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*). U okviru ovog priručnika, indeksi NDCI i NDTI predstavljaju ključne vrijednosti za provjeru modeliranja parametara kakvoće površinske vode putem satelitskih snimki Sentinel-2. Njihova primjena omogućuje kvantitativno praćenje koncentracije klorofila *a* i TSM-a što je iznimno važno za razumijevanje ekoloških promjena i upravljanje vodenim resursima (Atiz i Durduran, 2025).

Primjenom metoda i formula iz ovog priručnika korisnici mogu samostalno izračunati indekse NDCI i NDTI čime se omogućuje provjera modela i praćenje promjena u parametrima kakvoće vode na temelju satelitskih snimki.

NDCI je spektralni indeks namijenjen procjeni koncentracije klorofila *a*, što ga čini korisnim alatom za praćenje eutrofikacije, cvjetanja algi i općeg biološkog sta-

nja vodenih ekosustava. Temelji se na razlici refleksije u crvenom (665 nm) i *red-edge* (705 – 708 nm) dijelu spektra, koji su osjetljivi na prisutnost fitoplanktona. Za satelitske snimke Sentinel-2 računa se prema sljedećoj formuli (Mishra i Mishra, 2012a):

$$NDCI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}, \quad (7)$$

gdje je

B5 (705 nm) – *red-edge* kanal, a

B4 (665 nm) – crveni kanal.

NDTI se koristi za procjenu TSM-a. Računa se na temelju kombinacije crvenog i zelenog kanala. Za satelitske podatke Sentinel-2 računa se prema sljedećoj formuli (Lacaux i sur., 2007):

$$NDTI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}, \quad (8)$$

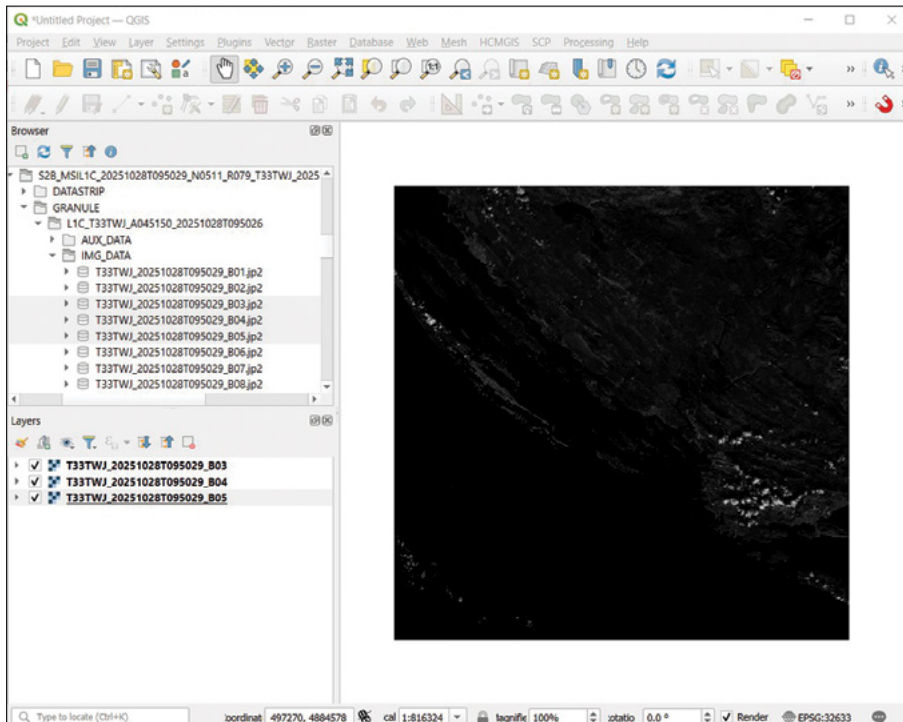
gdje je

B4 (665 nm) – crveni kanal, a

B3 (560 nm) – zeleni kanal.

4.4. Računanje indeksa u softveru QGIS

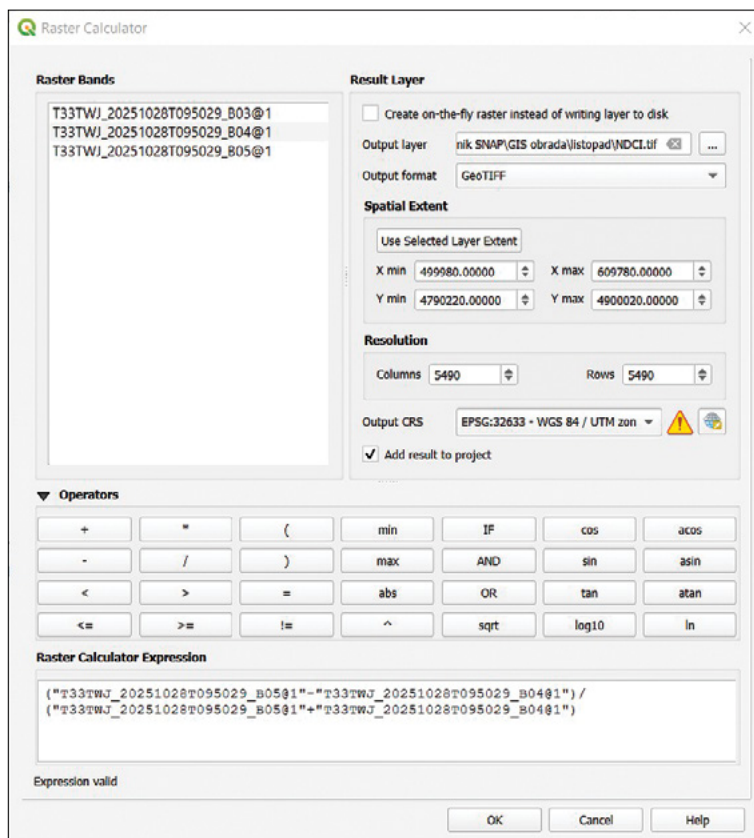
U ovom priručniku indeksi NDCI i NDTI izračunati su s pomoću softvera QGIS 3.44, jednog od najpopularnijih besplatnih GIS alata. Prvo je potrebno u softver QGIS učitati relevantne satelitske snimke, odnosno pojedinačne rasterske slojeve (kanale) koji odgovaraju spektralnim područjima potrebnim za izračun indeksa. Satelitske snimke za pojedinačni kanal dodaju se s mrežnog diska gdje su spremljene satelitske snimke preuzete u poglavlju 3.2.2. U novootvoreni program QGIS treba dodati kanale B3, B4 i B5 iz mape S2B_MSIL1C_20251028T095029_N0511_R079_T33TJWJ_20251028T103216.SAFE → GRANULE → L1C_T33TJWJ_A045150_20251028T095026 à IMG_DATA (Slika 47).



Slika 47. Dodavanje satelitskih snimki u softver QGIS

Potrebno je provjeriti da svi slojevi imaju istu projekciju, rezoluciju i prostorni obuhvat. Za izračun indeksa koristi se alat *Raster Calculator*, kojem se pristupa putem izbornika *Raster* → *Raster Calculator*.

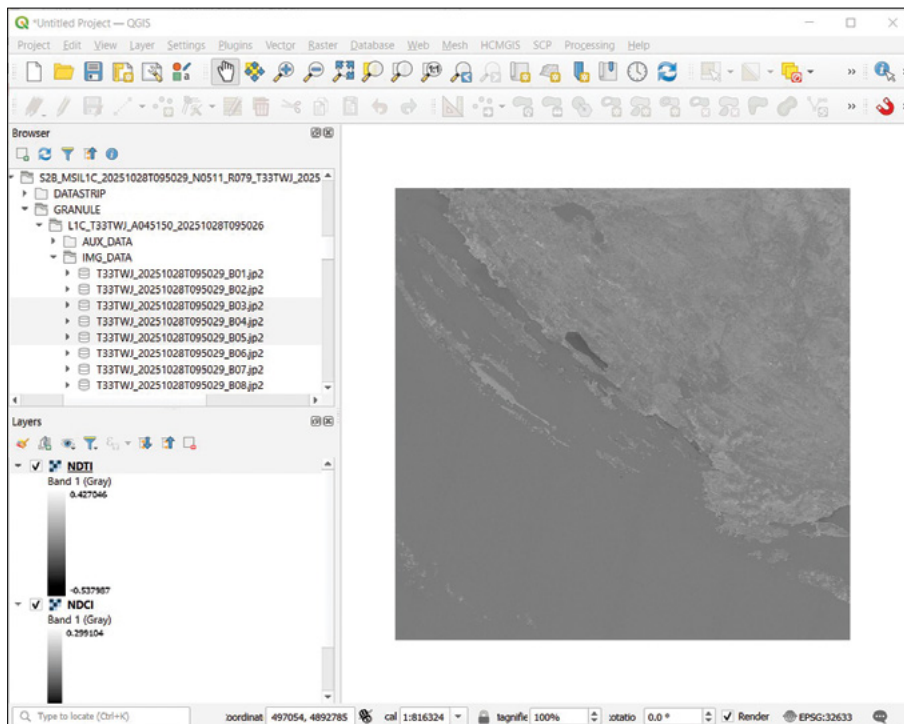
Nakon što se otvori prozor kalkulatora, u polje za unos formule potrebno je upisati matematički izraz koji definira željeni indeks, primjerice za NDCI indeks: $(\text{"T33TWTJ_20251028T095029_B05@1"} - \text{"T33TWTJ_20251028T095029_B04@1"}) / (\text{"T33TWTJ_20251028T095029_B05@1"} + \text{"T33TWTJ_20251028T095029_B04@1"})$ (Slika 48). Ispod polja s formulom nalazi se sekcija *Output Layer*, gdje je potrebno odabrati mapu u koju će se spremi rezultat te unijeti naziv izlazne datoteke, primjerice **NDCI.tif**. U istom prozoru nalazi se i opcija *Output Format*, u kojoj se odabire format izlazne datoteke – najčešće se koristi GeoTIFF. Nakon unosa svih potrebnih podataka, potrebno je kliknuti na *OK*, čime se pokreće izračun i automatski sprema rezultat u odabrani direktorij (Slika 48).



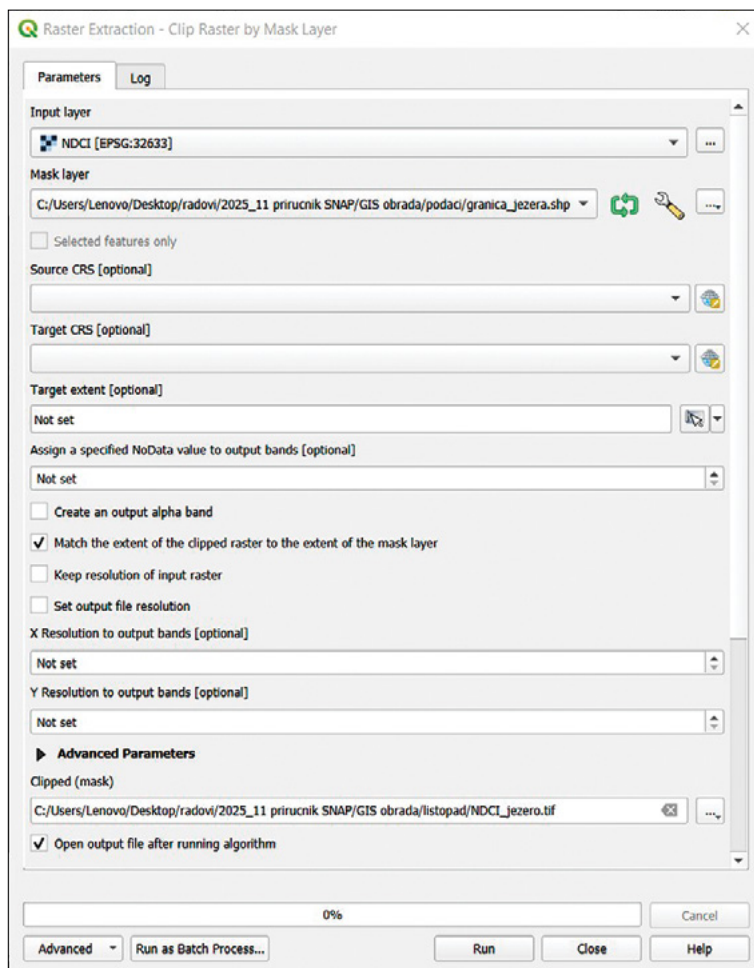
Slika 48. Izračun indeksa NDCI

Koristeći *Raster Calculator*, treba na isti način izračunati indeks NDTI prema formuli (8). Rezultat provedenih analiza dva su rastera za cijelo područje satelitske snimke (Slika 49). Za daljnju analizu potrebno je izrezati samo područje od interesa, odnosno područje Vranskog jezera. To se radi s pomoću naredbe *Raster* → *Extraction* → *Clip Raster by Mask Layer*. U novootvorenom prozoru *Raster Extraction – Clip Raster by Mask Layer* treba kao *Input layer* odabrati **NDCI.tif**, kao *Mask layer* odabrati sloj **granica_jezera.shp** (ranije korišten u analizi u poglavlju 3.5.3), označiti opciju *Match the extent of the clipped raster to the extent of the mask layer* te sloj spremi u mapu po izboru pod imenom **NDCI_jezero.tif** (Slika 50).

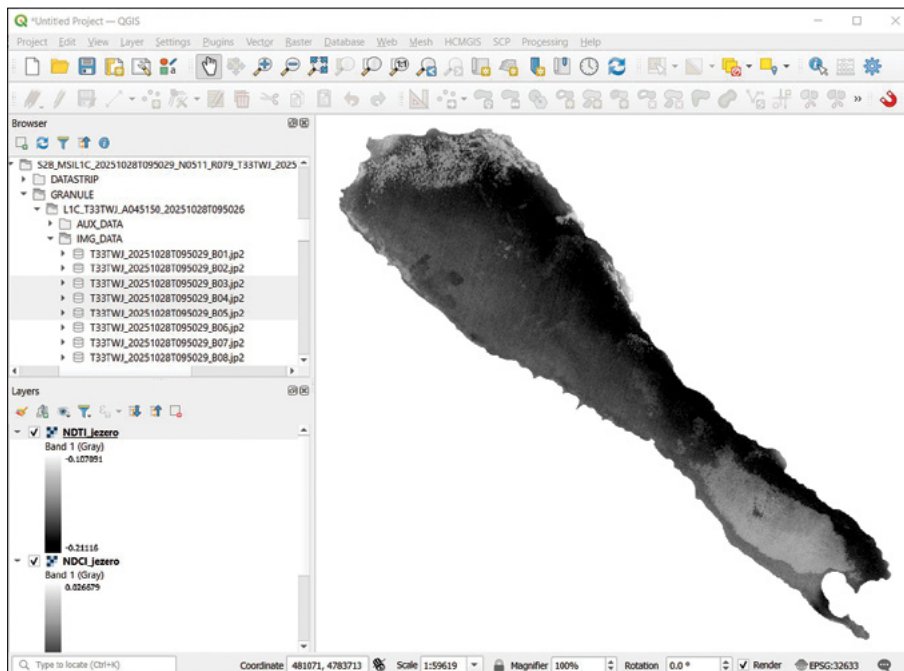
Na isti način treba izrezati područje sloja **NDTI.tif** (Slika 51).



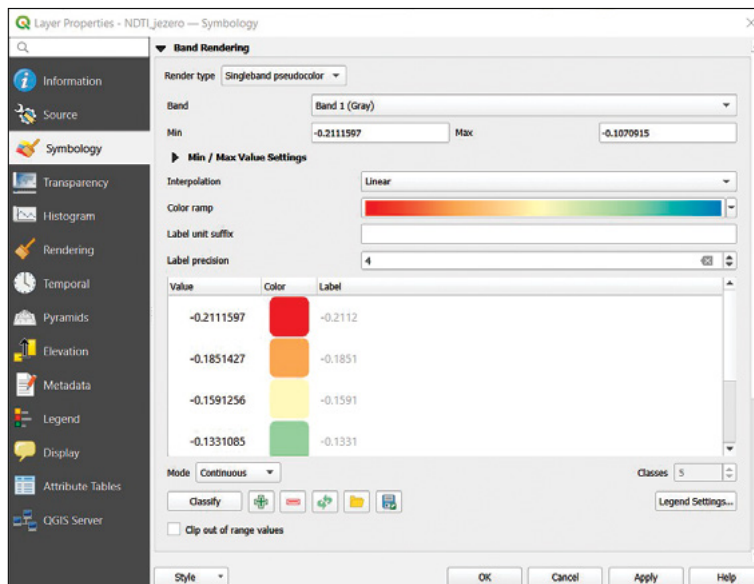
Slika 49. Vizualizacija spektralnih indeksa kakvoće vode



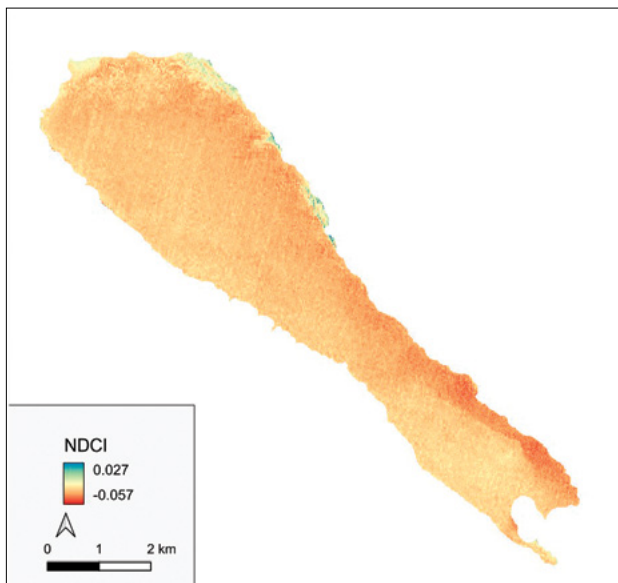
Slika 50. Rezanje rasterskog sloja na područje od interesa



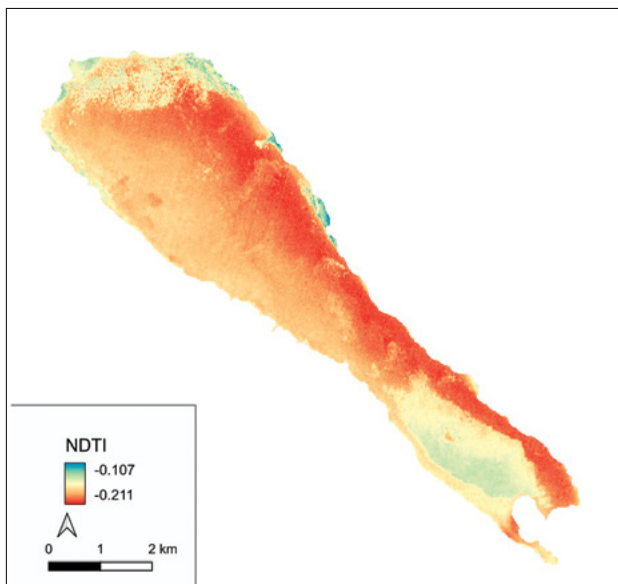
Slika 51. Vizualizacija sloja NDTI



Slika 52. Prilagođavanje simbologije sloja



Slika 53. Rezultat indeksa NDCI



Slika 54. Rezultat indeksa NDTI

Simbologiju slojeva treba prilagoditi da bolje prikazuju raspon vrijednosti tako da se klikne desni klik na sloj, odabere opcija *Properties* i otvori kartica *Symbology*. U prozoru *Layer Properties – NDTI_jezero – Symbology* treba pod *Raster type* izabrati **Singleband pseudocolor**, pod *Color ramp* izabrati **Spectral** te provjeriti da se klasifikacija radi u **5 klasa** koristeći opciju *Continuous* te kliknuti *OK* (Slika 52). Vizualizacija slojeva treba biti prilagođena rasponu boja (Slika 53, Slika 54).

4.5. Interpretacija rezultata provedenih indeksa

Na temelju dobivenih raspona vrijednosti NDCI i NDTI te prikazanih karata (Slika 53, Slika 54) moguće je dati cjelovitu i konzistentnu interpretaciju optičkih karakteristika površinskog sloja vode Vranskog jezera u analiziranom razdoblju.

NDCI pokazuje vrlo uske i izrazito niske vrijednosti koje se kreću od -0.0567 do 0.0267. Takav numerički raspon ukazuje na stanje jezera s minimalnom prisutnošću fitoplanktona što potvrđuje i prostorna distribucija prikazana na karti. Najveći dio jezera prikazan je toplim nijansama (narančasto – žuto) koje odgovaraju negativnim vrijednostima indeksa, karakterističnima za oligotrofične ili blago mezotrofne sustave. Pozitivnije vrijednosti NDCI-ja javljaju se tek lokalno, i to uz sjevernu obalu i u nekoliko manjih rubnih zona što može ukazivati na blago povećanu koncentraciju klorofila *a* na tih nekoliko mikrolokacija, ali i dalje unutar vrlo niskog ekološkog intenziteta. U cijelosti gledano, NDCI potvrđuje da na dan mjerenja nije bilo prisutno značajnije nakupljanje algi, niti je bilo znakova početka fitoplanktonskih procvata, a prostorne razlike ostaju minimalne.

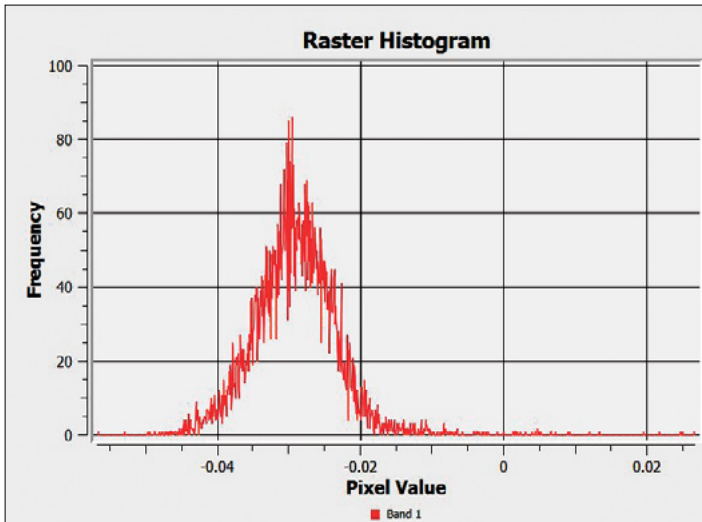
NDTI pokazuje nešto širi raspon, ali također s uskim i strogo negativnim vrijednostima, od -0.211 do -0.107. Budući da su negativne NDTI vrijednosti povezane s niskom razinom suspendiranih tvari, takvi rezultati upućuju na homogeno optičko stanje jezera s tek blagim prostornim varijacijama. Karta NDTI-ja pokazuje da se nešto niže vrijednosti (intenzivnije crvene i narančaste nijanse) pojavljuju duž središnjeg i jugoistočnog dijela jezera, dok su jug i pojedini dijelovi sjeverne obale prikazani svjetlijim nijansama koje odgovaraju relativno višim (manje negativnim) vrijednostima indeksa. Takva distribucija može biti rezultat plitkih rubnih područja, lokalnih doprinosa sedimenta iz podvodnih struja ili razlika u batimetriji, no raspodjela ipak ostaje ujednačena i ne upućuje na izražene transporte sedimenta ili poremećaje u vodenom stupcu.

Zajednička interpretacija obaju indeksa potvrđuje sliku optički jednostavnog sustava s vrlo niskim koncentracijama i klorofila *a* i TSM-a. NDCI i NDTI pritom djeluju komplementarno: NDCI naglašava stabilno oligotrofan karakter jezera, dok NDTI ukazuje na relativno malu količinu i ograničenu prostornu dinamiku suspendiranih čestica. Prostorna homogenost na kartama obaju indeksa posebno pridonosi pouzdanosti zaključka s obzirom na to da bi veće heterogenosti bile vidljive kao nagli prijelazi u spektralnim vrijednostima, što ovdje nije slučaj. Rezultati obaju indeksa također dobro koreliraju s vrlo niskim *in situ* vrijednostima klorofila *a* i relativno niskim koncentracijama suspendiranih tvari čime potvrđuju da su satelitski izvedeni optički signali reprezentativni za stvarne uvjete u jezeru.

Histogram indeksa NDCI prikazuje raspodjelu vrijednosti piksela unutar jezerske površine te pruža dodatni uvid u optičke karakteristike vode (Slika 55). Na temelju prikazanog histograma jasno se uočava izrazito uska i jednostrana distribucija vrijednosti, što je u skladu s vrlo ograničenim rasponom NDCI-ja u rasteru (od približno -0.0567 do 0.0267). Većina vrijednosti koncentrirana je u negativnom dijelu spektra, s izraženim vrhom između -0.03 i -0.02. Takav oblik distribucije potvrđuje da dominiraju pikseli s izrazito niskim signalom apsorpcije u crvenom i *red-edge*, što je tipično za vodena tijela s minimalnom koncentracijom fitoplanktona.

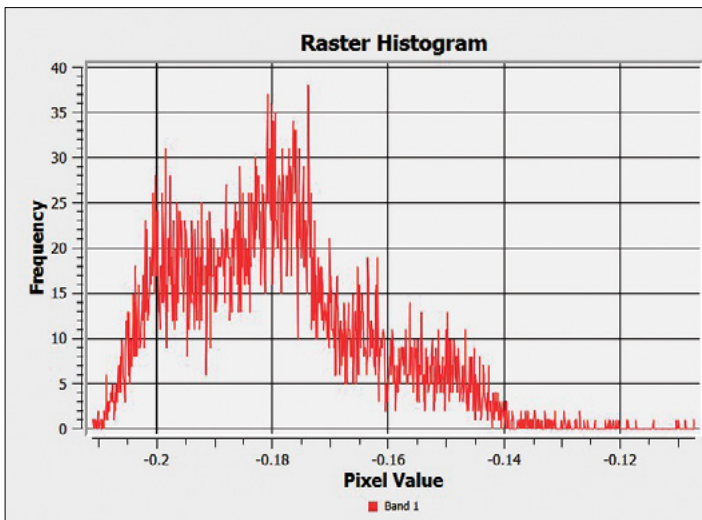
Histogram dodatno naglašava činjenicu da je optičko stanje jezera u analiziranom razdoblju bilo vrlo homogeno. Frekvencije u pozitivnom dijelu skale NDCI-ja pojavljuju se tek sporadično i u vrlo malom broju, što upućuje na to da eventualne zone blagog povećanja koncentracije klorofila *a* imaju ograničen prostorni opseg i ne utječu značajno na ukupnu distribuciju. Nagli pad frekvencija prema nultoj i pozitivnoj vrijednosti dodatno potvrđuje odsutnost izrazitijih algalnih nakupina ili lokalnih epizoda procvata.

Ukupni oblik histograma karakterističan je za sustave u kojima postoji dominantan optički minimum, dok su odstupanja vezana za rubne dijelove jezera ili pojedinačne piksele s različitim osvjetljenjem, batimetrijom ili lokalnim prirastom biomase. Takva raspodjela potpuno je usklađena s kartografskim prikazom NDCI-ja, gdje je vizualno potvrđena prostorna homogenost i vrlo niska ukupna varijabilnost indeksa. Drugim riječima, histogram NDCI rastera kvantitativno potvrđuje da se Vransko jezero tijekom promatranog razdoblja nalazilo u stanju izrazito niske fitoplanktonske aktivnosti, bez ikakvih indikacija povećane produkcije ili početka cvjetanja algi.



Slika 55. Histogram NDCI indeksa

U usporedbi s NDCI-jem, vrijednosti NDTI-ja karakteristično se kreću u strogo negativnom rasponu (od približno -0.211 do -0.107), što je u potpunosti vidljivo i u obliku histograma (Slika 56). Raspodjela je izrazito asimetrična, s jasno izraženim vrhom frekvencija u blizini vrijednosti oko -0.185 do -0.175, nakon čega slijedi postupni pad prema manje negativnim vrijednostima, sve do gornje granice



Slika 56. Histogram indeksa NDTI

raspona. Takav oblik raspodjele odražava vrlo niske koncentracije TSM-a u jezeru, što je tipično za optički jednostavne sustave. Dominacija negativnih vrijednosti NDTI-ja posljedica je slabog refleksijskog signala u zelenom i crvenom području spektra, što upućuje na minimalan udio čestica u vodenom stupcu. Velik broj piksela grupira se oko glavnog vrha što ukazuje na visoku prostornu homogenost, dok postojanje izduženog repa prema manje negativnim vrijednostima odražava ograničene, lokalizirane varijacije najvjerojatnije povezane s plitkim rubnim dijelovima, mikrosedimentacijskim zonama ili malim izmjenama u prozirnosti vode. Takva raspodjela vizualno i numerički potvrđuje da u analiziranom razdoblju nije bilo značajnih poremećaja u dinamici suspendiranih tvari, poput unosa sedimenta, resuspenzije ili intenzivnog vjetrom uzrokovanog zamućenja.

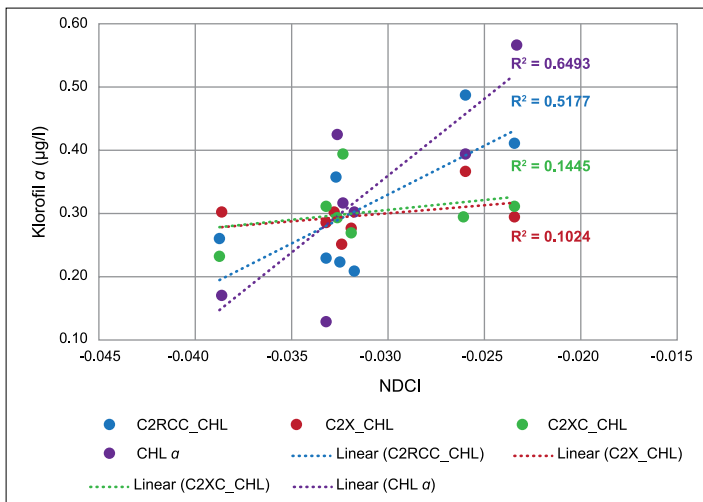
Histogram stoga daje kvantitativnu potvrdu interpretacije dobivene iz kartografskog prikaza NDTI-ja: Vransko jezero u trenutku snimanja pokazuje stabilan, ujednačen i optički vrlo čist sustav s minimalnom količinom suspendiranih čestica i bez znakova povećane trofije ili poremećaja u vodenom stupcu.

4.6. Usporedba rezultata između satelitskih indeksa i terenskih mjerenja

4.6.1. Povezanost indeksa NDCI i koncentracije klorofila *a*

Analiza odnosa između indeksa NDCI i koncentracije klorofila *a* pokazuje da, unatoč uskom rasponu vrijednosti indeksa (od -0.0567 do 0.0267), postoji jasna diferencijacija u stupnju korelacije između *in situ* mjerenja i procjena dobivenih različitim procesorima atmosferske korekcije. Najveću povezanost s NDCI indeksom pokazuju *in situ* izmjerene koncentracije klorofila *a*, uz koeficijent determinacije $R^2 = 0.6493$ (Slika 57), što je očekivano s obzirom na to da je NDCI integralno povezan s apsorpcijom klorofila u kanalu *red-edge*. Time se potvrđuje da ovaj indeks, čak i u izrazito oligotrofnoj okolini poput Vranskog jezera, adekvatno registrira fine prostorne gradijente u koncentraciji pigmenta.

Rezultati procesora C2RCC također pokazuju umjereno snažnu povezanost s NDCI indeksom ($R^2 = 0.5177$) što ukazuje na uspješnost atmosferske korekcije i biološko-optičkog modeliranja pri relativno niskim koncentracijama klorofila. S druge strane, procesori C2X i C2XC pokazuju značajno slabije povezanosti ($R^2 = 0.1024$



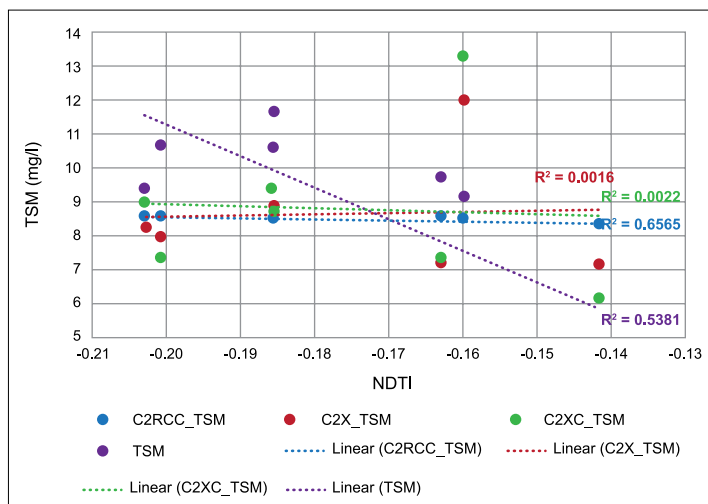
Slika 57. Linearna regresija indeksa NDCI s procijenjenim vrijednostima klorofila a dobivenih procesorima i s mjerenim vrijednostima klorofila a

i $R^2 = 0.1445$), što je u skladu s njihovom optimizacijom za optički kompleksnije vode, odnosno za uvjete s višim koncentracijama klorofila a i suspendiranih tvari. U kontekstu Vranskog jezera, koje je stabilno oligotrofno, takvi modeli ne iskazuju prednost nad standardnim C2RCC algoritmom. Ukupna analiza potvrđuje da NDCI vrlo dobro „odražava“ stvarni biološki signal, dok su satelitski modeli različito učinkoviti ovisno o svojoj treniranoj domeni primjene.

4.6.2. Povezanost indeksa NDTI i koncentracije TSM-a

U slučaju indeksa NDTI, čiji se raspon vrijednosti kreće između -0.211 i -0.107, vidljiv je znatno slabiji odnos između indeksa i satelitski procijenjenih koncentracija TSM-a, dok je odnos *in situ* izmjenjenim vrijednostima znatno jači. Izmjerene koncentracije TSM-a pokazuju koeficijent determinacije $R^2 = 0.5381$, što upućuje na to da NDTI, unatoč uskom rasponu i negativnim vrijednostima, uspijeva bilježiti realne varijacije mutnoće i suspendiranog materijala u vodenom stupcu (Slika 58). Ovaj je nalaz očekivan jer je mutnoća u Vranskom jezeru niska, stabilna i prostorno homogena, što ograničava dinamički raspon spektralnog odziva.

Najbolju povezanost među satelitskim modelima ostvaruje C2RCC procesor, uz $R^2 = 0.6565$, što potvrđuje njegovu sposobnost preciznog modeliranja optičkih svojstava i pri niskim koncentracijama suspendiranih tvari. Usporedno, C2X i



Slika 58. Linearna regresija indeksa NDTI s procijenjenim vrijednostima TSM-a dobivenih procesorima i s mjerenim vrijednostima TSM-a

C2XC pokazuju praktički zanemarivu korelaciju s NDTI indeksom ($R^2 = 0.0016$ i $R^2 = 0.0022$), što ukazuje na to da njihova optimizacija za kompleksnije i mutnije vode dovodi do gubitka osjetljivosti u oligotrofnom sustavu s vrlo niskom koncentracijom suspendiranih tvari. Činjenica da satelitske procjene tih algoritama ostaju gotovo konstantne bez obzira na promjene NDTI vrijednosti, dodatno potvrđuje njihovu nedovoljnu prilagođenost za uvjete u kakvima su dobiveni podatci.

4.7. Smjernice za daljnji rad

Istraživanje prikazano u ovom priručniku temelji se na analizi satelitskih podataka za jedan mjesec. U daljnjem radu preporučuje se proširenje analize na dulje periode koji bi obuhvatili više mjeseci, a po mogućnosti i višegodišnje razdoblje. Takav pristup omogućio bi analizu sezonske i međugodišnje varijabilnosti parametara kakvoće vode, pouzdanije uočavanje trendova te bolju procjenu dugoročnih promjena u stanju jezerskog ekosustava.

Nadalje, preporučuje se proširenje i sustavnija primjena *in situ* mjerenja u svrhu robusnije validacije satelitskih procjena dobivenih algoritmom C2RCC u softveru SNAP. Povećanjem broja mjerenja u različitim hidrometeorološkim uvjetima omogućila bi se detaljnija procjena točnosti i ograničenja modela.

Kao važan smjer daljnjeg rada ističe se i usporedna analiza rezultata dobivenih algoritmom C2RCC s rezultatima spektralnih indeksa kakvoće vode izračunanih u softveru QGIS. Usporedbom parametara procijenjenih fizičko-optičkim modelima i jednostavnijim indeksnim pristupima moguće je dodatno vrednovati pouzdanost dobivenih rezultata, istaknuti prednosti i ograničenja pojedinih metoda te unaprijediti interpretaciju prostornih i vremenskih obrazaca kakvoće vode.

Dodatni potencijal za unapređenje prikazanog pristupa odnosi se na automatizaciju postupaka preuzimanja satelitskih snimki i njihove obrade u softveru SNAP. Razvoj automatiziranih radnih tokova omogućio bi učinkovitiju obradu većih količina podataka, osobito u višemjesečnim i višegodišnjim analizama, smanjio bi mogućnost ljudske pogreške te olakšao operativnu primjenu satelitskog praćenja kakvoće voda u istraživačke i upravljačke svrhe.

LITERATURA

- ATIZ, O. F., & DURDURAN, S. (2025). Assessing long-term hydrological dynamics and water quality using Google Earth Engine: A case study of Ilgın Lake (1985–2024). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W13-2025, 33–39. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W13-2025-33-2025>
- BROWN, R. M., McCLELLAND, N. I., DEININGER, R. A., & TOZER, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works*, 117(10).
- CHIDIAC, S., EL NAJJAR, P., OUAINI, N., EL RAYESS, Y., & EL AZZI, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349–395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- DEOLI, V., KUMAR, D., KUMAR, M., KURIQI, A., & ELBELTAGI, A. (2021). Water spread mapping of multiple lakes using remote sensing and satellite data. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2213. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08597-9>
- FORTES, A. C. C., BARROCAS, P. R. G., & KLIGERMAN, D. C. (2023). Water quality indices: Construction, potential, and limitations. *Ecological Indicators*, 157, 111187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111187>
- GRADILLA-HERNÁNDEZ, M. S., DE ANDA, J., GARCIA-GONZALEZ, A., MONTES, C. Y., BARRIOS-PIÑA, H., RUIZ-PALOMINO, P., & DÍAZ-VÁZQUEZ, D. (2020). Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7>
- LACAUX, J. P., TOURRE, Y. M., VIGNOLLES, C., NDIONE, J. A., & LAFAYE, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- MISHRA, S., & MISHRA, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- MOGANE, L. K., MASEBE, T., MSAGATI, T. A. M., & NCUBE, E. (2023). A comprehensive review of water quality indices for lotic and lentic ecosystems. *Environmen-*

- tal Monitoring and Assessment*, 195(8), 926. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11512-2>
- NAJAFZADEH, M., & BASIRIAN, S. (2023). Evaluation of River Water Quality Index Using Remote Sensing and Artificial Intelligence Models. *Remote Sensing*, 15(9), 2359. <https://doi.org/10.3390/rs15092359>
- RAM, A., TIWARI, S. K., PANDEY, H. K., CHAURASIA, A. K., SINGH, S., & SINGH, Y. V. (2021). Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. *Applied Water Science*, 11(2), 46. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01376-7>
- TYAGI, S., SHARMA, B., SINGH, P., & DOBHAL, R. (2020). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- UDDIN, MD. G., NASH, S., & OLBERT, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- USLU, A., DUGAN, S. T., EL HMAIDI, A., & MUHAMMETOGLU, A. (2024). Comparative evaluation of spatiotemporal variations of surface water quality using water quality indices and GIS. *Earth Science Informatics*, 17(5), 4197–4212. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01389-1>
- VASISTHA, P., & GANGULY, R. (2020). Water quality assessment of natural lakes and its importance: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 32, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.092>
- WU, Z., LAI, X., & LI, K. (2021). Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu Basin (China) using water quality index. *Ecological Indicators*, 121, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107021>
- WU, Z., WANG, X., CHEN, Y., CAI, Y., & DENG, J. (2018). Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of The Total Environment*, 612, 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293>
- WU, Z., ZHANG, D., CAI, Y., WANG, X., ZHANG, L., & CHEN, Y. (2017). Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Scientific Reports*, 7(1), 17999. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18285-y>
- XU, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

ZHANG, F., CHAN, N. W., LIU, C., WANG, X., SHI, J., KUNG, H.-T., LI, X., GUO, T., WANG, W., & CAO, N. (2021). Water Quality Index (WQI) as a Potential Proxy for Remote Sensing Evaluation of Water Quality in Arid Areas. *Water*, 13(22), 3250. <https://doi.org/10.3390/w13223250>

KAZALO POJMOVA

Atmosferska korekcija	58
C2RCC-Nets	59
C2XC-Nets	60, 83
C2X-Nets	59, 60
Copernicus	36
Daljinska istraživanja	31
Elektromagnetsko zračenje	31, 32
GNSS	31
<i>In situ</i> mjerenje sondom	19
Indeks kakvoće vode	100
Kakvoća vode	11, 12
Klorofil <i>a</i>	15
Mutnoća	14
NDCI	102, 103
NDTI	102, 103
Otopljeni kisik	14
Parametri kakvoće vode	12
pH vrijednost	14
QGIS	103
Salinitet	14
Sentinel-2 MSI	33
SNAP	37
Stupanj trofije	16
Svjetska zdravstvena organizacija	11
Temperatura vode	13
TSM	15
TSS	15
Umjetna inteligencija	35
Višeparametarska sonda EXO2s	20, 21
Višespektralni senzori	33, 35
Vransko jezero	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Višeparametarska sonda EXO2s (Xylem, 2020)	20
Slika 2. Princip daljinskih istraživanja	32
Slika 3. Dijagram metodologije	44
Slika 4. Područje istraživanja	45
Slika 5. Kreiranje korisničkog računa	48
Slika 6. Prijava u Copernicus Browser	48
Slika 7. Pretraga satelitskih snimki prema vremenu i području istraživanja	49
Slika 8. Popis dostupnih snimki prema zadanim parametrima	50
Slika 9. Softver SNAP 13.0.0	51
Slika 10. Sučelje softvera SNAP 13.0.0	52
Slika 11. Učitavanje preuzete snimke u softver SNAP	53
Slika 12. Pregled satelitske snimke	54
Slika 13. Prikaz snimke u <i>natural colour</i>	54
Slika 14. Parametri kod usklađivanja prostorne rezolucije kanala	55
Slika 15. Prozor <i>Layer Properties – Information</i> u softveru QGIS	56
Slika 16. Definiranje prostornog podskupa prema geografskim koordinatama	57
Slika 17. Prikaz snimke koja je rezultat prostornog podskupa	57
Slika 18. Procesor C2RCC	60
Slika 19. Opcije za C2RCC I/O Parameters	61
Slika 20. Copernicus Browser – koncentracija ozona	63
Slika 21. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2RCC	65
Slika 22. Rezultati obrade podataka s pomoću procesora C2RCC	66
Slika 23. Provjera koordinatnog sustava projekta	68
Slika 24. Primjer formata datoteke s pinovima	69
Slika 25. Očitavanje vrijednosti piksela	70
Slika 26. Provođenje regresije za klorofil <i>a</i>	72
Slika 27. Rezultat regresije za klorofil <i>a</i>	73
Slika 28. Rezultat regresije za TSM	74
Slika 29. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2RCC	75
Slika 30. Maskiranje rastera na područje jezera	76
Slika 31. Prikaz maskiranog sloja <i>conc_chl</i>	77
Slika 32. Učitavanje palete boja	78
Slika 33. Prikaz sloja <i>conc_chl</i> s predefiniranom skalom boja	78
Slika 34. Koncentracija klorofila <i>a</i> kao rezultat procesora C2RCC	79
Slika 35. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2RCC	80

Slika 36. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2X	81
Slika 37. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2X	82
Slika 38. Parametri za prvo pokretanje algoritma C2XC	84
Slika 39. Parametri za drugo pokretanje algoritma C2XC	85
Slika 40. Izvoz slojeva u GeoTIFF	87
Slika 41. Koncentracija klorofila <i>a</i> kao rezultat procesora C2X	88
Slika 42. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2X	88
Slika 43. Koncentracija klorofila <i>a</i> kao rezultat procesora C2XC	89
Slika 44. Koncentracija TSM-a kao rezultat procesora C2XC	89
Slika 45. Linearna regresija mjerene vrijednosti klorofila <i>a</i> s procijenjenim vrijednostima klorofila <i>a</i> dobivenih procesorima	92
Slika 46. Linearna regresija mjerene vrijednosti TSM-a s procijenjenim vrijednostima TSM-a dobivenih procesorima	94
Slika 47. Dodavanje satelitskih snimki u softver QGIS	104
Slika 48. Izračun indeksa NDCI	105
Slika 49. Vizualizacija spektralnih indeksa kakvoće vode	106
Slika 50. Rezanje rasterskog sloja na područje od interesa	107
Slika 51. Vizualizacija sloja NDTI	108
Slika 52. Prilagođavanje simbologije sloja	108
Slika 53. Rezultat indeksa NDCI	109
Slika 54. Rezultat indeksa NDTI	109
Slika 55. Histogram NDCI indeksa	112
Slika 56. Histogram indeksa NDTI	112
Slika 57. Linearna regresija indeksa NDCI s procijenjenim vrijednostima klorofila <i>a</i> dobivenih procesorima i s mjerenim vrijednostima klorofila <i>a</i>	114
Slika 58. Linearna regresija indeksa NDTI s procijenjenim vrijednostima TSM-a dobivenih procesorima i s mjerenim vrijednostima TSM-a	115

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke specifikacije višeparametarske sonde EXO2s (Xylem, 2020)	22
Tablica 2. Tehničke specifikacije senzora EXO (Xylem, 2020)	22
Tablica 3. Očitane vrijednosti rastera iop_apig	71
Tablica 4. Očitane vrijednosti rastera iop_btot	71
Tablica 5. Usporedba prirodnih logaritama vrijednosti dobivenih algoritmom C2RCC i izmjerenih vrijednosti klorofila <i>a</i>	72
Tablica 6. Usporedba prirodnih logaritama vrijednosti dobivenih algoritmom C2RCC i izmjerenih vrijednosti TSM-a	74
Tablica 7. Vrijednosti koeficijenata CHL faktora, CHL eksponenta, TSM faktora i TSM eksponenta	74
Tablica 8. Ocjena točnosti modela za klorofil <i>a</i>	92
Tablica 9. Ocjena točnosti modela za TSM	93