

Analiza raspodjele saliniteta u Prokljanskom jezeru

Rumenović, Ružica

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:642444>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-07**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Ružica Rumenović

Split, 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Ružica Rumenović

Analiza raspodjele saliniteta u Prokljanskom jezeru

Diplomski rad

Split, 2023.

Zahvala

*Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Roku Andričeviću te
komentorici doc.dr.sc. Moreni Galešić Divić na strpljenju,
stručnoj pomoći i suradnji tokom izrade diplomskog rada.
Zahvaljujem obitelji, prijateljicama i kolegama na iskaznoj podršci
tokom godina studiranja te mom najvećem osloncu Antoniu.*

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

| | |
|--|---------|
| SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE | |
| Primljeno: 15. 09. 2023. | Prilozi |
| Klasifikacijska oznaka: 602-01/23-18/0002 | |
| Uredžbeni broj: 2181-208-02-06-23-39 | |

STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Ružica Rumenović

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083219793 (4536)

KATEDRA: Katedra za privrednu hidrotehniku

PREDMET: Integralno upravljanje vodnim resursima

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza raspodjele saliniteta u Prokljanskom jezeru

Opis zadatka:

Zadatak ovog diplomskog rada je izrada sveobuhvatne analize ekosustava Prokljanskog jezera u Hrvatskoj, s naglaskom na razumijevanje utjecaja varijabilnosti protoka rijeke Krke na raspodjelu saliniteta. Analiza uključuje obradu podataka s terenskih mjerenja vertikalnih profila slanosti i temperature na jezeru Prokljan provedenih u 2022. i 2023. godini, popratno analitičko modeliranje udjela bočate vode u zoni interesa, te izradu numeričkog modela jezera.

U skladu s navedenim rad uključuje:

- Analizu rezultata terenskih mjerenja vertikalnih profila slanosti i temperature.
- Analizu podataka o protocima s službene monitoring točke 7095 Skradinski buk.
- Analitičko modeliranje udjela bočate vode u interesnoj zoni Prokljanskog jezera.
- Izradu numeričkog modela hidrodinamike za jezero Prokljan korištenjem programskog paketa Open Flows Flood.
- Kvalitativnu usporedbu rezultata mjerenja s rezultatima numeričkog modela.
- Sveobuhvatne zaključke uz predviđanje smjernica za buduća istraživanja.

U Splitu, 15.04.2023.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr.sc. Roko Andričević

Komentor:

Doc. dr. sc. Morena Galešić Divić

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Analiza raspodjele saliniteta u Prokljanskom jezeru

Sažetak:

U ovom radu, proučavana je dinamika ekosustava Prokljanskog jezera u Hrvatskoj s posebnim naglaskom na utjecaj varijabilnosti protoka vode rijeke Krke na distribuciju slane vode. Provedena analiza obuhvaća prikupljanje i obradu podataka dobivenih mjerenjima s terenskih kampanja u 2022. i 2023. godini, gdje su prikupljeni podaci koji pokazuju izraženu vertikalnu stratifikaciju jezera Prokljan. Poseban fokus je na klinu soli te je utvrđena korelacija između klinova soli i protoka rijeke, pružajući dublje razumijevanje dinamike protoka i estuarijskog ponašanja. Analiza podataka, kako onih dobivenih mjerenjem in situ tako i onih dobivenih numeričkim modelom, daje važne informacije o obalnim i estuarijskim ekosustavima, te pruža smjernice za održive prakse upravljanja. U konačnici je napravljena kvalitativna usporedba rezultata modela s provedenim terenskim mjerenjima.

Ključne riječi:

jezero Prokljan, estuarij, solni klin, numerički model, protok, mjerenje, analiza

The analysis of salinity distribution in Prokljan lake

Abstract:

In this paper, the dynamics of the ecosystem of Lake Prokljan in Croatia was studied, with special emphasis on the influence of River Krka's flow variability on the distribution of salt water. The analysis carried out includes the collection and processing of data obtained from measurements from field campaigns in 2022. and 2023. year, where data were collected showing pronounced vertical stratification of Lake Prokljan. A special focus is on the salt wedge, and a correlation between the salt wedge and river flow is established, providing a deeper understanding of flow dynamics and estuarine behavior. Analysis of data, both from in situ measurements and from numerical models, provides important information about coastal and estuarine ecosystems, and provides guidance for sustainable management practices. In the end, a qualitative comparison of the model results with field measurements.

Keywords:

Prokljan lake, estuary, salt wedge, numerical model, flux, measurement, analysis

SADRŽAJ

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | UVOD..... | 1 |
| 1.1 | Osnovne značajke predmetnog područja rijeka Krka – Skradinski buk – Prokljansko jezero | 1 |
| 1.2 | Utjecaj saliniteta na promatrano područje..... | 3 |
| 2 | KONCEPT DIPLOMSKOG RADA | 4 |
| 2.1 | Motivacija..... | 4 |
| 2.2 | Ciljevi rada..... | 4 |
| 3 | METODOLOGIJA | 5 |
| 3.1 | Metodologija rada..... | 5 |
| 3.2 | Prikupljanje podataka | 7 |
| 3.2.1 | Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)..... | 7 |
| 3.2.2 | Podaci o morskim mijenama | 9 |
| 3.2.3 | Podaci o vjetru i temperaturi | 12 |
| 3.2.4 | Podaci o salinitetu | 13 |
| 3.3 | Analiza podataka | 14 |
| 3.3.1 | Q-H krivulja | 14 |
| 3.4 | 3D Numerički model jezera Prokljan..... | 16 |
| 3.4.1 | Ulazni podaci za pokretanje simulacije..... | 18 |
| 3.4.1.1 | Generiranje Digitalnog elevacijskog modela i diskretizacijske mreže | 18 |
| 3.4.1.2 | Moduli za kreiranje modela..... | 20 |
| 3.4.1.3 | Turbulencija..... | 22 |
| 4 | REZULTATI I USPOREDBA..... | 23 |
| 4.1 | Rezultati mjerenja..... | 23 |
| 4.2 | Rezultati analize | 24 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.1 | Analiza vremenskih serija protoka..... | 24 |
| 4.2.1.1 | Hidrogram..... | 24 |
| 4.2.1.2 | Krivulje trajanja..... | 26 |
| 4.2.1.3 | Funkcije gustoće vjerojatnosti..... | 27 |
| 4.2.2 | Index udjela bočate vode (UBV)..... | 30 |
| 4.3 | Rezultati hidrodinamičkog 3D modela..... | 37 |
| 4.3.1 | Polje brzina..... | 37 |
| 4.3.2 | Polje slanosti..... | 45 |
| 4.3.3 | Usporedba rezultata mjerenja, analize i numeričkog modela..... | 53 |
| 5 | ZAKLJUČAK I BUDUĆE SMJERNICE..... | 56 |
| 6. | LITERATURA..... | 57 |

Tablica grafičkih priloga

| | |
|---|----|
| Slika 1. Rijeka Krka - Skradinski Buk - Prokljansko jezero (preuzeto sa stranica Hrvatskog hidrografskog instituta - Split) | 2 |
| Slika 2. Vizualni vodič kroz strukturirane komponente i značajke metodologije koja je primijenjena u radu..... | 5 |
| Slika 3. Područje proučavanja: transekt uz obalu na zoni ispuštanja rijeke-jezera [43] | 6 |
| Slika 4. Skradinski Buk [10] | 8 |
| Slika 5. Skradinski Buk gornji, 7095 [10]..... | 8 |
| Slika 6. Skradinski Buk gornji, 7095 [10]..... | 9 |
| Slika 7. CTD/DO sonda za vertikalno profiliranje parametara: tlak, salinitet, temperatura i otopljeni kisik [42] | 13 |
| Slika 8. Element konačnog volumena MOHID modela (preuzeto iz dokumentacije MOHID-a [13])..... | 17 |
| Slika 9. Prikaz DEM i diskretizacijske mreže- jezero Prokljan | 19 |
| Slika 10. Moduli simulacije za estuarij Openflows FLOOD | 20 |
| Slika 11. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 37 |
| Slika 12. Polje brzina - profil – početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine..... | 37 |
| Slika 13. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 38 |
| Slika 14. Polje brzina - profil – 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine..... | 38 |
| Slika 15. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 39 |
| Slika 16. Polje brzina - profil – 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine..... | 39 |
| Slika 17. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 40 |
| Slika 18. Polje brzina - profil – kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. godine..... | 40 |
| Slika 19. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 41 |
| Slika 20. Polje brzina - profil – početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine..... | 41 |
| Slika 21. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije na lokaciji L3, 12. prosinca 2022. godine | 42 |
| Slika 22. Polje brzina - profil - 4h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine..... | 42 |
| Slika 23. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 43 |
| Slika 24. Polje brzina - profil - 7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine..... | 43 |
| Slika 25. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije - 12. prosinca 2022. godine | 44 |
| Slika 26. Polje brzina – profil – kraj simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 44 |
| Slika 27. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 45 |
| Slika 28. Polje slanosti – profil – početak simulacije. 25. kolovoza 2022. godine..... | 45 |
| Slika 29. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine | 46 |
| Slika 30. Polje slanosti – profil – 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine | 46 |
| Slika 31. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine | 47 |
| Slika 32. Polje slanosti – profil – 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine..... | 47 |
| Slika 33. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. | |

| | |
|--|----|
| godine | 48 |
| Slika 34. Polje slanosti – profil – kraj simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine | 48 |
| Slika 35. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije - 12. prosinca 2022. godine | 49 |
| Slika 36. Polje slanosti – profil – početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 49 |
| Slika 37. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije - 12. prosinca 2022. godine | 50 |
| Slika 38. Polje slanosti – profil – 4h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022.godine | 50 |
| Slika 39. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju -7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 51 |
| Slika 40. Polje slanosti – profil –7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022.godine | 51 |
| Slika 41. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 52 |
| Slika 42. Polje slanosti – profil – kraj simulacije, 12. prosinca 2022. godine | 52 |
| | |
| Grafikon 1. Morske mijene mjesec kolovoz [9]..... | 10 |
| Grafikon 2. Dinamika morskih mijena kroz tri odabrana dana za mjesec kolovoz [9]..... | 10 |
| Grafikon 3. Morske mijene mjesec prosinac [9] | 11 |
| Grafikon 4. Dinamika morskih mijena kroz tri odabrana dana za mjesec prosinac [9] | 11 |
| Grafikon 5. Brzina i smjer vjetra na lokaciji Kaštela na dan 25.kolovoza 2022.godine [41] | 12 |
| Grafikon 6. Brzina i smjer vjetra na lokaciji Kaštela na dan 12.12.2022. [41]..... | 13 |
| Grafikon 7. Q-H krivulja | 15 |
| Grafikon 8. Ukupni hidrogram [43] | 25 |
| Grafikon 9. Hidrogram koji prikazuje relevantni vremenski okvir i označene datume terenskih kampanja mjerenja [43]..... | 25 |
| Grafikon 10. Krivulje trajanja 2012. - 2022. god..... | 26 |
| Grafikon 11. Log- normalna razdioba (godine 2012. i 2021.) | 27 |
| Grafikon 12. Log- normalna – Kolmogorov- Smirnov test | 28 |
| Grafikon 13. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje od lipnja do rujna 2022.)[43]..... | 32 |
| Grafikon 14. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje od listopada 2022. do ožujka 2023.) [43] | 33 |
| Grafikon 15. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje travanj i srpanj 2023.) [43]..... | 34 |
| Grafikon 16. Regresijski modeli za procjenu frakcije slane vode na različitim razinama saliniteta kao funkcija protoka rijeke [43] | 35 |
| Grafikon 17. Procjena udjela bočate vode za sve dostupne podatke o protoku rijeke [43] | 35 |
| Grafikon 18. Salinitet u površinskom sloju, numerički model $k=11$, 25. kolovoz 2022. godine | 53 |
| Grafikon 19. Vertikalna stratifikacija u interesnim lokacijama, 25. kolovoza 2022. godine..... | 54 |
| Grafikon 20. Salinitet u površinskom sloju, $k=11$, 12. prosinca 2022. godine..... | 54 |
| Grafikon 21. Vertikalna stratifikacija u interesnim lokacijama, 12. prosinca 2022. godine..... | 55 |

1 UVOD

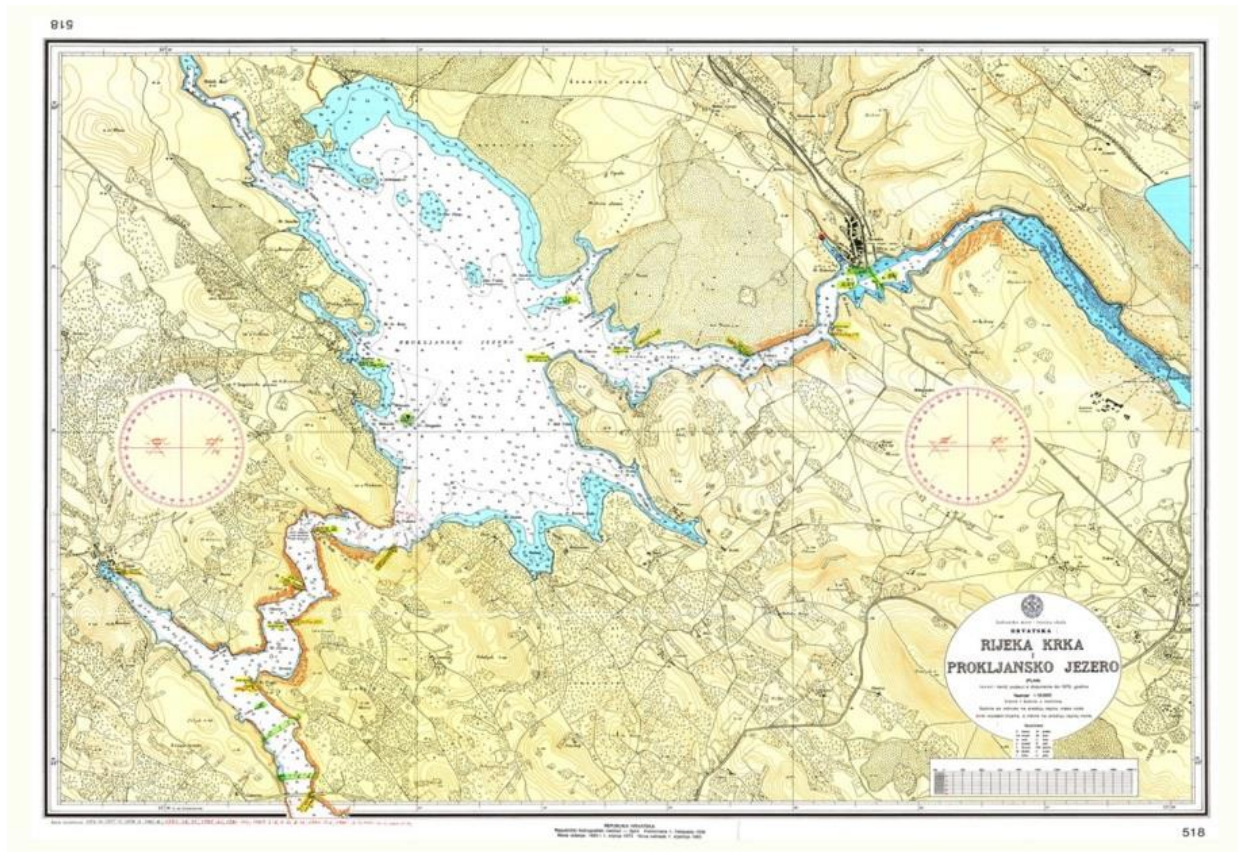
1.1 Osnovne značajke predmetnog područja rijeka Krka – Skradinski buk – Prokljansko jezero

Rijeka Krka je krška rijeka smještena u južnom dijelu Hrvatske, unutar Šibensko-kninske županije. Izvor rijeke je blizu Knina, dok njen tok završava kod Šibenika, protežući se sve do Skradinskog buka. Krka je poznata po svojih sedam slapova stvorenih od sedre, koji su od velikog značaja za biologiju, ekologiju i ekonomiju regije i šire. Rijeka ima mnoge prirodne značajke poput slapova, brzace i kanjona. Njena klima varira duž toka, s kontinentalnom klimom blizu izvora koja postupno prelazi u mediteransku klimu prema ušću. Rijeka Krka teče kroz korito dužine 72,5 km i nikada ne presušuje, iako je njen tok ponekad i do 100 m iznad razine podzemnih voda. Estuarij Krke, mjesto gdje se rijeka susreće s morem, ima slojeve slane i slatke vode čija debljina varira ovisno o nizu faktora, uključujući protok rijeke, oborine, plimu i vjetar. Većinu vremena estuarij je stratificiran, dok se miješanje slojeva rijetko događa i povezano je s protokom rijeke. Estuarij je djelomično zatvoreno obalno tijelo bočate vode u koje se ulijeva jedna ili više rijeka ili potoka, slobodno povezano s otvorenim morem. Estuariji su potopljena riječna ušća ljevkastog oblika. Izraz „estuarij“ potječe od latinske riječi „aestuarium“ što u prijevodu znači plima [2]. Najčešće se formiraju na mjestima gdje su velike razlike između plime i oseke, no ne znači nužno da se estuariji javljaju samo u područjima pod utjecajem morskih oscilacija. Zbog smanjenja brzine riječnog toka dolazi do granulometrijskog razdvajanja sedimenta. Prilikom zapunjavanja sitnozrnati sediment se pronosi dalje u ušću dok se krupnozrnati taloži u blizini. Estuariji su dobro zaštićeni od utjecaja vjetra i valova, a kad je dubina dovoljno velika mogu se prenamijeniti u luke koje se koriste za prihvat brodova.

Ovo područje predstavlja prijelaznu zonu između riječnih i morskih okoliša, služeći kao ekoton. Kao takav, estuarij je ključna točka susreta između slatke i slane vode, čineći ga biološki bogatim i dinamičnim ekosustavom [26].

U Hrvatskoj dominiraju estuariji koji su oblikovani u krškim područjima, uglavnom nastali u vapnenačkim formacijama. Zbog jasno definiranih slojeva mora, miješanje riječne i morske vode je ograničeno. Zbog toga riječna voda, koja je lakša, ostaje na površini, dok se teža morska voda zadržava bliže dnu [40]. Na mjestu gdje se ti slojevi susreću i gdje postoji brza promjena u salinitetu s dubinom, formira se haloklina [42]. Prokljansko jezero nalazi se u donjem toku rijeke Krke koje zauzima površinu od 11,1 četvornih kilometara. Jezero nije potpuno izolirano, povezano je s morem kroz uski kanal koji vodi prema šibenskoj luci. Jezero se nalazi 0,5 metara

iznad morske razine i njegova najveća dubina doseže 25 metara. Iako je povezano s otvorenim morem, njegov salinitet nije visok: dok je voda u dubljim slojevima slana, bliže površini je slatka. Dok je sjeverni dio jezera prilično plitak s dubinama oko 4 metra, južni dio je značajno dublji, dosežući između 20 i 25 metara.



Slika 1. Rijeka Krka - Skradinski Buk - Prokljansko jezero (preuzeto sa stranica Hrvatskog hidrografskog instituta - Split)

1.2 Utjecaj saliniteta na promatrano područje

Slanost vode ključna je karakteristika koja značajno oblikuje ekosustav bilo kojeg vodenog okoliša, posebno u prijelaznim područjima poput estuarija. Na ekosustav može se utjecati na različite načine, određujući vrste koje će naseljavati određeno područje. Dok su neki organizmi prilagođeni životu u oštro slanim uvjetima mora, drugi preferiraju slatkovodna staništa. Međutim, postoji i skupina organizama koja je specifično prilagođena fluktuacijama slanosti i može preživjeti u estuarskim ili brakičnim uvjetima.

Promjene u slanosti, bilo da su nagle ili postupne, mogu imati direktne fiziološke posljedice na vodene organizme. Osim što utječe na biološku raznolikost i distribuciju organizama, slanost također igra ulogu u kemijskim karakteristikama vode. Na primjer, može utjecati na topljivost kisika u vodi ili na kemijsku ravnotežu, što može imati daljnje posljedice na život u vodi. Ovo je posebno važno u kontekstu sedimentacije, jer promjene u slanosti mogu promijeniti kako se čestice talože ili suspendiraju, što može utjecati na procese poput erozije.

Niske brzine protoka i niska izmjena vode u regiji solne klinove estuarija mogu dovesti do hipoksije, kako je zabilježeno na Prokljanskom jezeru 1988. godine (Legović, Petricioli i Žutić, 1991).

S gospodarske strane, slanost može imati značajne posljedice na aktivnosti poput ribolova i akvakulture. Na primjer, promjena slanosti može negativno utjecati na određene populacije riba, što može imati ekonomske posljedice za lokalne zajednice koje ovise o ribarstvu.

U konačnici, razumijevanje i praćenje slanosti ključno je za očuvanje i upravljanje ekosustavima, posebno u osjetljivim područjima poput estuarija gdje se slana i slatka voda susreću i miješaju.

2 KONCEPT DIPLOMSKOG RADA

2.1 Motivacija

Kako bi promicala gospodarsku i socijalnu koheziju, stabilnost članica i infrastrukturni razvoj znanstvenih istraživanja, Europska unija provodi podršku svojim članicama kroz financiranja kompetitivnih projekata. Primjer takvog projekta je COMON - Monitoring obalnog područja koristeći višeskalne metode (Eng. Coastal zone **monitoring** using multi-scaling methods) koji ima za cilj razvoj inovativnog koncepta integracije različitih modela [44]. Glavna motivacija projekta je implementacija inovativnih tehnologija za kontinuirano praćenje ekosustava priobalnih voda Jadranskog mora, s posebnim fokusom na hrvatski dio obale koji ima svoje jedinstvene izazove zbog svoje duge obalne linije i broja otoka. Kroz istraživanja koja uključuju mjerenja, analiziranja i modele može se stvoriti šira slika koja će biti ključna za predviđanje budućih utjecaja i održivo planiranje, posebno u kontekstu turističkog razvoja. Nastavno na prethodno navedeno estuarij rijeke Krke privukao je značajnu istraživačku pažnju zbog svoje ekološke, ekonomske i hidrološke važnosti.

U sklopu projekta COMON, istraživački tim s Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, vršili su terenska mjerenja, obrade i analize podataka s Prokljanskog jezera što predstavlja podlogu za izradu ovog diplomskog rada. Slanost predstavlja izrazito bitan parameter u jednom složenom ekosustavu kao što je Prokljansko jezero, prema tome, sveobuhvatna analiza varijacija iste na razini jedne godine se nameće kao ključna motivacija izrade ovog diplomskog rada.

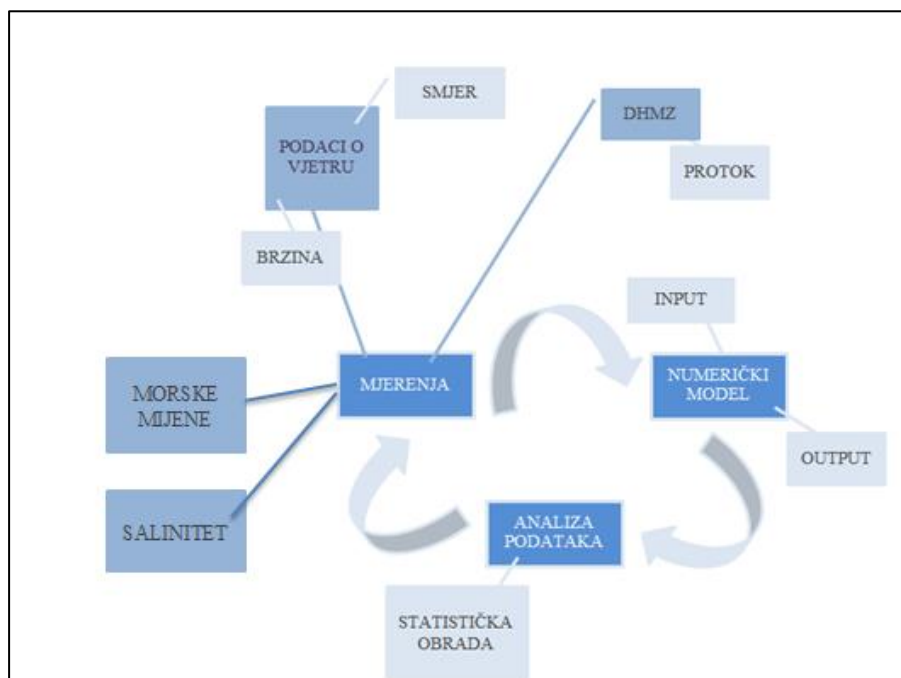
2.2 Ciljevi rada

Cilj rada je analizirati ponašanje saliniteta u određenom području koristeći terenska mjerenja, mjerenja sa službenih stranica i online izvora, analizu podataka i numerički model u programskom paketu Openflows FLOOD, gdje će se koristiti numerički model Mohid Water. Osim toga, statistički će se obraditi podaci protoka. Na temelju vrijednosti dobivenih terenskim mjerenjima detaljnije će se objasniti novo predloženi index udjela bočate vode (UBV), koji nudi brz alat za procjenu distribucije saliniteta. Također će se objasniti korelacije između UBV-a i protoka rijeke, te će se ukazati na složenu tematiku između dinamike protoka i estuarijskog ponašanja. Analitikom varijabli koje utječu na dinamiku vodnog sustava prikazati će se ponašanje vertikalne stratifikacije te time distribucija slane vode kroz vertikalne profile tokom različitih godišnjih doba. Zaključno, izvršiti će se kvalitativna usporedba rezultata mjerenja s rezultatima numeričkog modela što će omogućiti sveobuhvatne zaključke uz predviđanje smjernica za buduća istraživanja.

3 METODOLOGIJA

3.1 Metodologija rada

U svakom projektu ili istraživanju, ključna komponenta koja osigurava pouzdanost i točnost rezultata jest metodologija. Riječ je o skupu principa, alata, praksi i postupaka koji se koriste kako bi se postigao određeni cilj ili riješio određeni problem. Metodologija ne samo da određuje kako će se podaci prikupljati, već i pruža teoretski okvir za njihovu interpretaciju, osigurava etičke standarde i odabire odgovarajuće alate i opremu za analizu. U okviru ovog projekta, pristup metodologiji obuhvaća tri osnovne komponente: mjerenje, analizu i numeričko modeliranje.

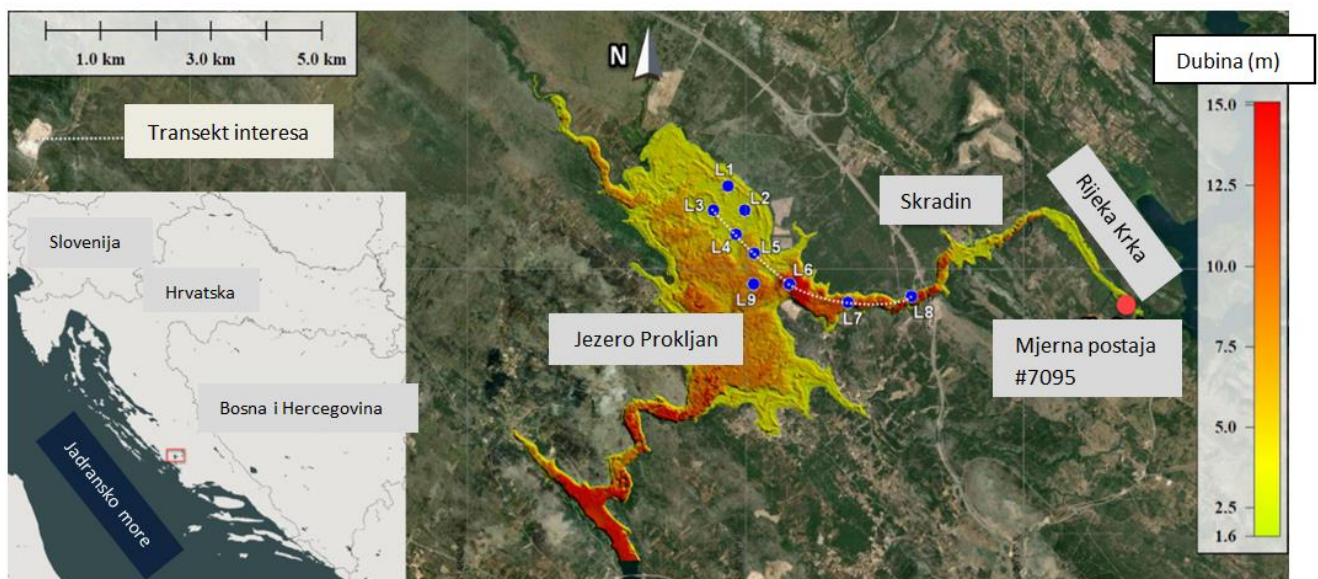


Slika 2. Vizualni vodič kroz strukturirane komponente i značajke metodologije koja je primijenjena u radu

- Prikupljanje podataka: Podaci su prikupljeni kroz kombinaciju terenskih kampanja, službeno dostavljenih podataka iz Državnog Hidrometeorološkog Zavoda (DHMZ) [10] te online izvora, uključujući Weather Underground [41] i Asterion [9]. Alati i oprema koji se koriste za mjerenja pažljivo su odabrani kako bi se osigurala maksimalna preciznost i pouzdanost dobivenih podataka. Podaci koji su izmjereni te u slijedećim poglavljima opisani su varijable koje su u postupku kalibriranja modela učitane u program.

- Analiza: Nakon prikupljanja, podaci su podvrgnuti temeljitom postupku obrade kako bi se eliminirale pogreške ili nedostaci. Statističke metode korištene su za interpretaciju i analizu podataka. Posebna pažnja posvećena je vremenskim periodima za koje su podaci bili nedostupni, koristeći korelacijske metode ili srednje vrijednosti kako bi se osigurala konzistentnost analize.
- Numerički model: Na temelju prikupljenih i analiziranih podataka, razvijen je numerički model koji simulira promatrane prirodne pojave. Model je testiran i kalibriran kako bi se osigurala njegova točnost. Kroz ovaj model, moguće je predvidjeti buduće trendove i donijeti informirane odluke temeljene na simuliranim rezultatima.

Prikaz područja na kojem se temelje mjerenje, analiza i numerički model u ovom radu. Sva daljnja istraživanja i simulacije temeljit će se na ovoj odabranoj lokaciji.



Slika 3. Područje proučavanja: transekt uz obalu na zoni ispuštanja rijeke-jezera [43]

3.2 Prikupljanje podataka

3.2.1 Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

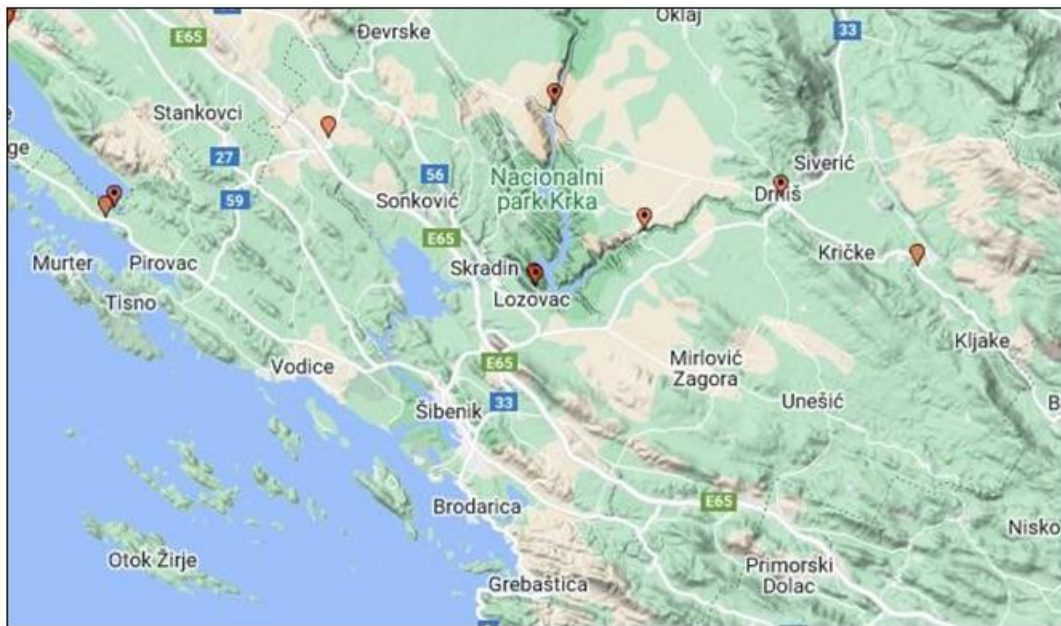
U skladu sa službeno poslanim upitom, podaci o protoku dostavljeni su od strane **Državnog hidrometeorološkog zavoda** (u daljnjem tekstu DHMZ).[10] Obzirom na dostupnost podataka te utjecaj protoka na vertikalnu stratifikaciju, provedena je statistička obrada vremenskih serija protoka.

U ovom radu će se provesti analiza podataka o protoku Skradinskog buka gornjeg, s ciljem razumijevanja ponašanja vodotoka Krke i njenog utjecaja na jezero Prokljan. Podaci koji su prikupljeni obuhvaćaju razdoblje od 2012. do 2022. godine, s tim da su protoci za godine 2017. i 2022. generirane iz regresijske funkcije protoka koja je određena na temelju dostupnih godina.

Protok predstavlja volumen vode koja protječe promatranim presjekom u jedinici vremena. Protok se iskazuje u kubnim metrima u sekundi (m^3/s) ili u litrama u sekundi (l/s). DHMZ mjeri protok kao izvedenu veličinu koju određuje posredno – mjerenjem brzine strujanja vode i površine promatranog presjeka. Za mjerenje brzine strujanja vode koriste se različite vrste instrumenata kao što su klasična hidrometrijska krila, ultrazvučni i elektromagnetskih uređaji. Površina promatranog profila određuje se geodetskim i batimetrijskim snimanjem konfiguracije terena. Dostavljeni podaci su srednji dnevni protoci.

Kota nule vodotoka na predmetnoj mjernoj postaji iznosi 45,400 (m.n.m.), dok je udaljenost od ušća 7 (km). Topografska površina sliva je 2103,00 (km^2) [10].

Na Slikama 4. i 5 su prikazana područja Skradinskog buka i Krke, te je na jednoj od njih jasno označena mjernostanica.



Slika 4. Skradinski Buk [10]



Slika 5. Skradinski Buk gornji, 7095 [10]

Ime i šifra postaje je Skradinski Buk gornji, 7095. Tip postaje automatski dojavljuje rezultate mjerenja. Vodotok, sliv i porječje Krke pripada Jadranskom slivu, sliv pripada porječju južnog Jadrana. Početak rada postaje započet je datuma 01.siječnja.1905. godine.



Slika 6. Skradinski Buk gornji, postaja 7095 [10]

3.2.2 Podaci o morskim mijenama

Jadransko more karakterizira relativno mala amplituda plime i oseke u usporedbi s mnogim drugim svjetskim morima. U prosjeku, razlika između visoke i niske vode obično se kreće između 20 i 60 cm, iako se to može promijeniti ovisno o specifičnoj lokaciji i meteorološkim uvjetima.

Na Jadranu prevladavaju poludnevne plime, što znači da se u jednom danu javljaju dvije visoke vode i dvije niske vode.

Jadransko more je seizmički aktivno područje. Zbog toga, osim redovitih plima i oseka, povremeno se mogu pojaviti i iznenadne promjene razine mora uslijed seizmičke aktivnosti. Ovo nije klasična plima i oseka, ali je važno spomenuti jer može utjecati na promjene razine mora.

Jaki vjetrovi, poput juga, mogu uzrokovati privremene i lokalizirane promjene razine mora. Na primjer, jako jugo može uzrokovati privremeno povećanje razine mora na nekim dijelovima obale.

Iako plima i oseka nisu toliko izražene na Jadranu, postoji mnogo istraživanja o ovom fenomenu, osobito u kontekstu klimatskih promjena i potencijalnog utjecaja na razinu mora u budućnosti.

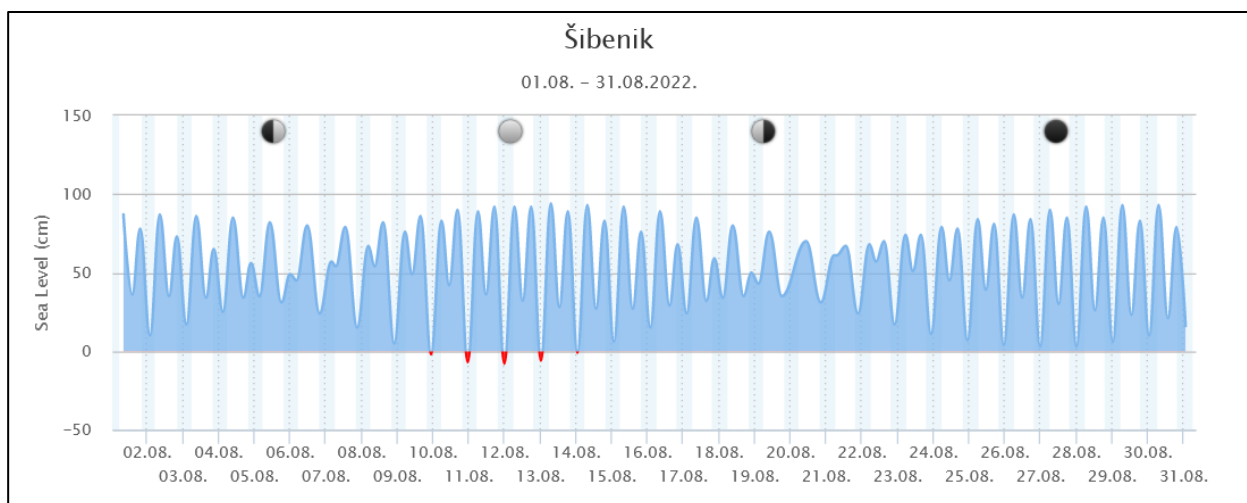
Iako plime i oseke nisu izražene kao u nekim drugim dijelovima svijeta, pomorci i ribari na

Jadranu svakako moraju uzeti u obzir ove promjene, posebno u plićim područjima ili tijekom ulaska i izlaska iz luka.

Uz sve to, važno je napomenuti da plima i oseka igraju ulogu u ekosustavima obalnih područja Jadranskog mora, utječući na biološku raznolikost i dinamiku obalnih staništa.

Uređaj koji mjeri morske mijene blizu interesne lokacije nalazi u kanalu sv. Ante. Mareograf u realnom vremenu prati mijene plime i oseke.

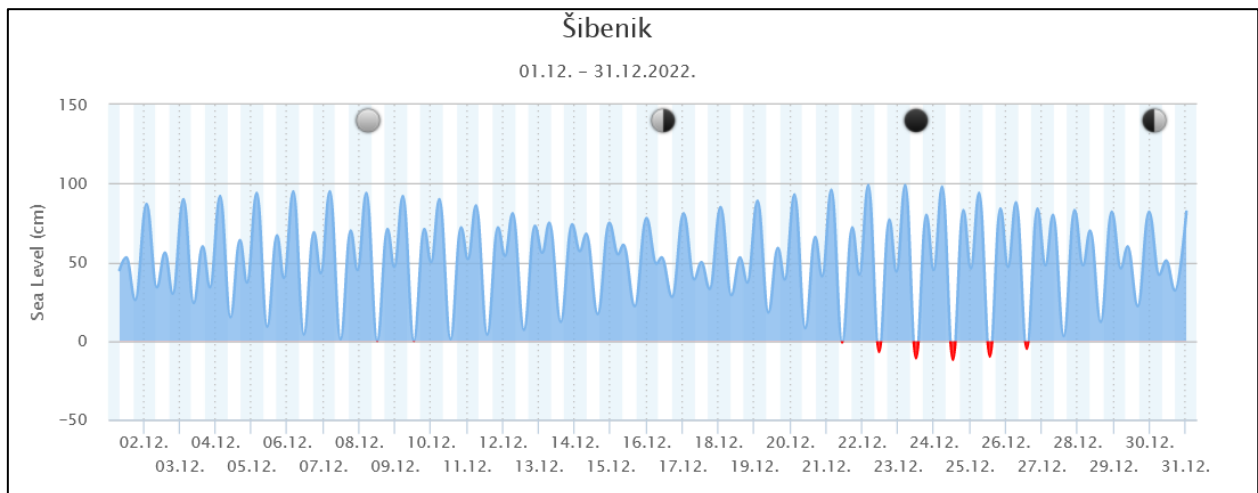
Podaci su preuzeti sa službene stranice pod nazivom Asterion [9] prikazane su morske mijene za karakterističnu lokaciju i vrijeme.



Grafikon 1. Morske mijene mjesec kolovoz [9]

| | | | |
|-------------|-------|----|---|
| 23.08.2022. | 05:03 | 74 | ↑ |
| | 10:05 | 51 | ↓ |
| | 15:30 | 74 | ↑ |
| | 22:17 | 11 | ↓ |
| 24.08.2022. | 05:19 | 79 | ↑ |
| | 10:35 | 45 | ↓ |
| | 16:06 | 78 | ↑ |
| | 22:43 | 7 | ↓ |
| 25.08.2022. | 05:35 | 84 | ↑ |
| | 11:02 | 39 | ↓ |
| | 16:36 | 81 | ↑ |
| | 23:08 | 4 | ↓ |

Grafikon 2. Dinamika morskih mijena kroz tri odabrana dana za mjesec kolovoz [9]



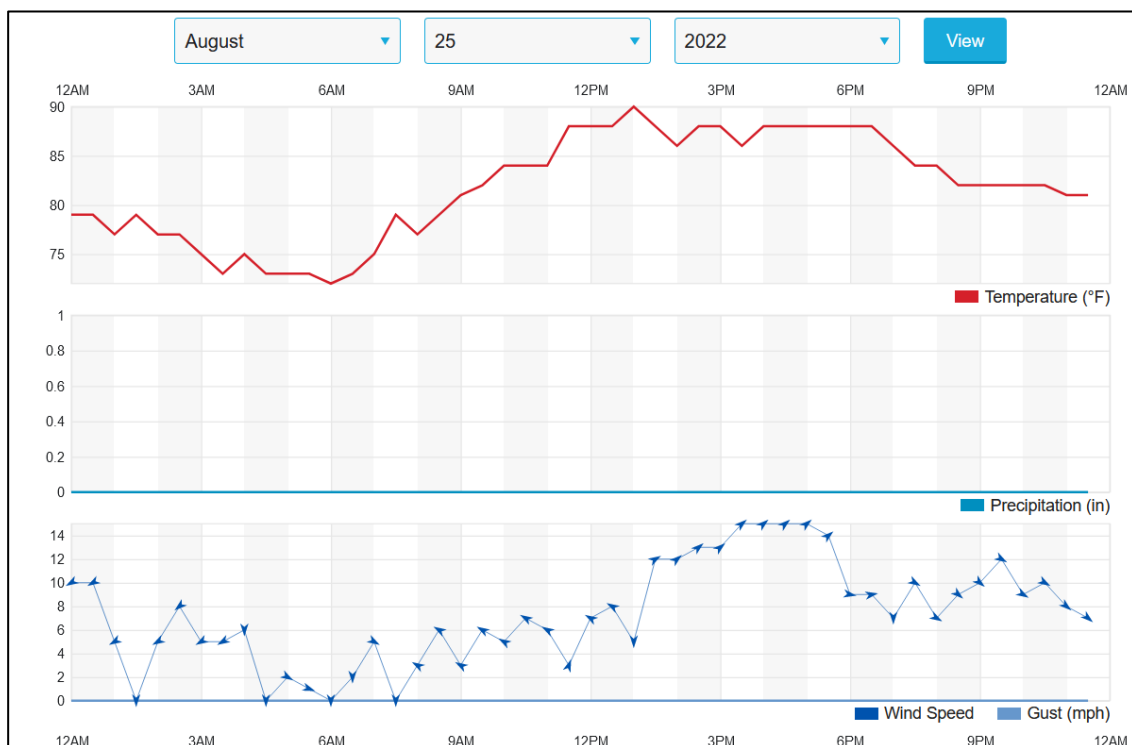
Grafikon 3. Morske mijene mjesec prosinac [9]

| | | | |
|-------------|-------|----|---|
| 10.12.2022. | 04:30 | 90 | ↑ |
| | 11:53 | 1 | ↓ |
| | 18:54 | 72 | ↑ |
| | 23:34 | 52 | ↓ |
| 11.12.2022. | 04:57 | 86 | ↑ |
| | 12:25 | 4 | ↓ |
| | 19:32 | 72 | ↑ |
| 12.12.2022. | 00:17 | 54 | ↓ |
| | 05:26 | 81 | ↑ |
| | 12:57 | 7 | ↓ |
| | 20:14 | 73 | ↑ |

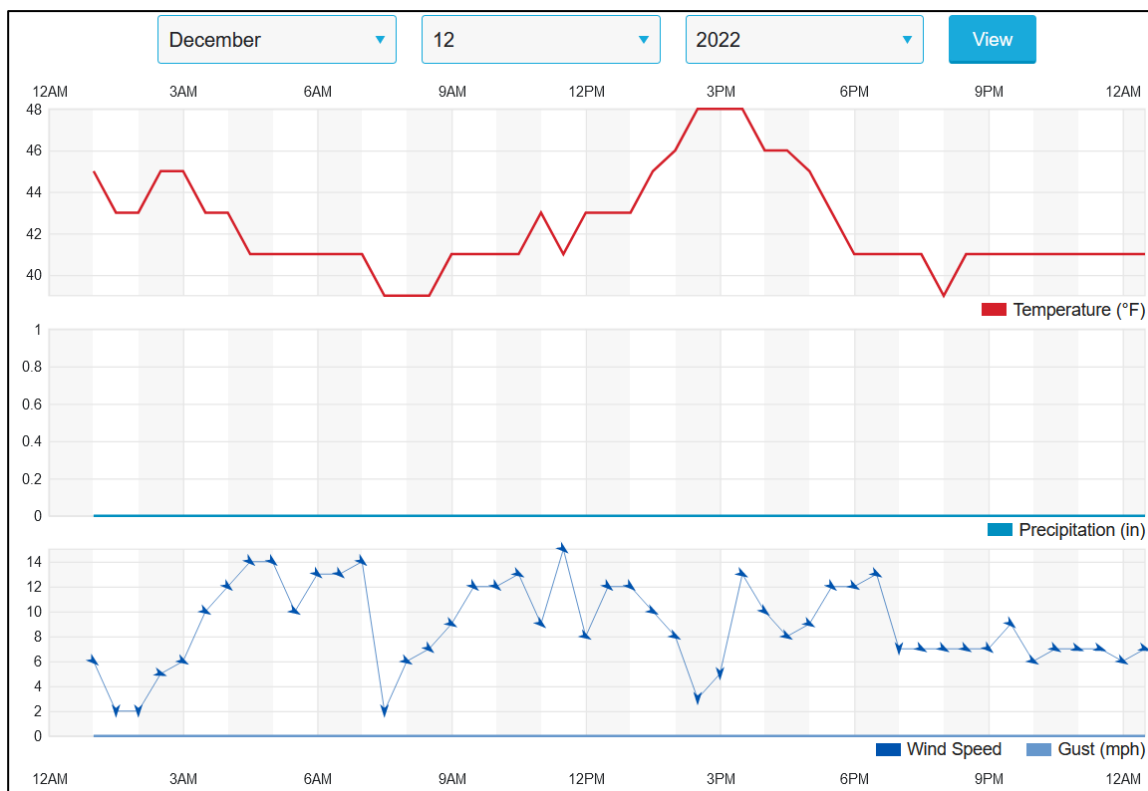
Grafikon 4. Dinamika morskih mijena kroz tri odabrana dana za mjesec prosinac [9]

3.2.3 Podaci o vjetru i temperaturi

Za potrebe analize i modeliranja uzeti su podaci s najbliže dostupne lokacije. Za simulaciju učitani su podaci s mjerne postaje u Kaštelima. Obzirom da su jedini dostupni podaci s postaje koja nije direktno mjerena s mjesta interesa nego s obližnje postaje prethodno su definirana eventualna odstupanja. Prema priloženim grafovima može se zaključiti kako je vjetar bio umjeren te je najveća brzina vjetra dosegila 14 (mph) ili 6,26 (m/s). Najveća temperatura zraka za vrijeme ljetnog perioda zabilježena je 90 °F to jest 32.2 °C, dok u zimu (mjesec prosinac) 48 °F to jest 8,8 °C. Temperatura u mjesecu kolovoz na lokaciji gdje je predviđeno uzorkovanje izmjerena je prosječna temperatura bočate vode 23 °C, dok je u mjesecu prosinac 8°C. Temperatura može imati značajan utjecaj na količinu soli koja se može otopiti u vodi. Tipično, jezera i estuariji imaju različite temperature u različitim slojevima vodenog stupca, s toplijom vodom na površini i hladnijom vodom na dubljim razinama. Temperatura vode u estuariju također može utjecati na miješanje slane i slatke vode. Na primjer, kada je ulaz slatke vode u estuarij hladan, može formirati sloj na toplijoj slanoj vodi koja leži ispod, što može spriječiti miješanje dviju vodenih masa. To može dovesti do razvoja slanog klina u dubljem sloju estuarija, s višim salinitetom i svježijim površinskim slojem. Općenito, temperatura jezera i estuarija može imati značajan utjecaj na topljivost i miješanje soli, što u konačnici može utjecati na salinitet vode.



Grafikon 5. Brzina i smjer vjetra na lokaciji Kaštela na dan 25. kolovoza 2022. godine [41]



Grafikon 6. Brzina i smjer vjetra na lokaciji Kaštela na dan 12. prosinca 2022. godine [41]

3.2.4 Podaci o salinitetu

U ovom radu, utjecaj varijabilnih vrijednosti protoka rijeke Krke na procijenjenu distribuciju slane vode procjenjuje se pomoću vertikalnih profila iz nekoliko terenskih kampanja koje pokrivaju sva godišnja doba od ljeta 2022. do proljeća 2023.



Slika 7. CTD/DO sonda za vertikalno profiliranje parametara: tlak, salinitet, temperatura i otopljeni kisik [42]

U svakoj terenskoj kampanji provedena je in-situ analiza nekoliko fizikalno-kemijskih karakteristika vode, poput tlaka, temperature, saliniteta i razine otopljenog kisika. Ta mjerenja su provedena na prethodno određenim mjestima, prikazanim na slici 4, koristeći CTD/DO sondu za vertikalnu analizu vodnog stupca. Mjerenje je provedeno tako da se čamcem prilazilo odabranoj lokaciji, koristeći GPS navigaciju (model uređaja garmin 42dv). Nakon pristajanja, čamac je sidren kako bi se osigurala stabilnost tijekom mjerenja. Dubina vode određena je pomoću GPS/sonar uređaja. Sonda je zatim pažljivo spuštена prema dnu, osiguravajući stabilnost kako bi se minimizirale oscilacije vode. Poseban naglasak stavljen je na mjerenje u gornja 2 metra vodnog sloja, gdje se očekivao snažan utjecaj toka rijeke Krke. Cilj ovih mjerenja bio je skupljanje obilja podataka s te dubine kako bi se detaljno proučili uvjeti u površinskom dijelu Prokljanskog jezera. [42]

3.3 Analiza podataka

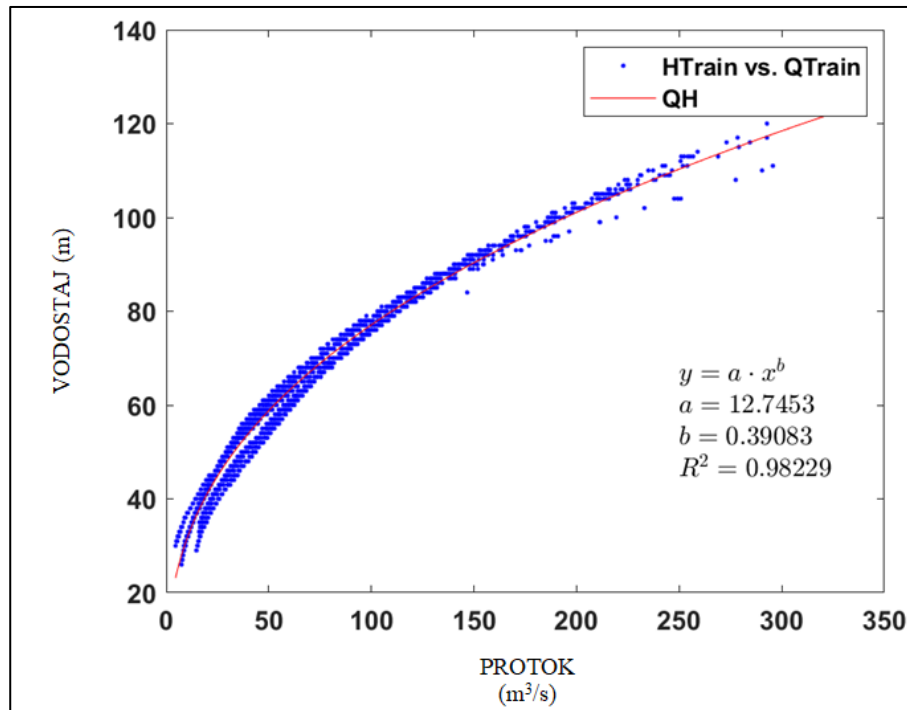
Za analizu je prikupljeno devet vremenskih serija za razdoblje od 2012. do 2021. godine, što ukupno čini 3288 podataka. Međutim, u dostavljenim podacima nije uključena 2017. godina. Također, godine 2012., 2016. i 2020. bile su prijestupne godine s 366 dnevnih podataka, ali su izostavljeni prijestupni dani 29.02. radi jednostavnije obrade podataka. Važno je napomenuti da nedostatak nekih podataka može utjecati na analizu, međutim, za ovu vrstu analize nedostatak tih podataka neće značajno utjecati na rezultate. Iako podaci za 2017. godinu nedostaju, koristila se regresija protoka-vodostaja kako bi se rekonstruirala nedostajuća godina, uz dodavanje podataka o protoku za 2022. i 2023. godinu.

3.3.1 Q-H krivulja

Ako se pretpostavi da je odnos između protoka i visine vodostaja najbolje opisan potencijalnom funkcijom, funkcija regresije može se koristiti za procjenu parametara a i b . Kada se dobiju procjene za ove parametre, dobivenu funkciju može se koristiti za predviđanje protoka na temelju visine vodostaja (ili obrnuto).

Važno je naglasiti da odabir odgovarajućeg regresijskog modela ovisi o prirodi podataka i domenskom znanju stručnjaka. Uvijek je preporučljivo vizualizirati podatke i provjeriti kvalitetu prilagodbe regresijskog modela.

U ovom slučaju, na temelju podataka o protoku i vodostaju od 2012. godine do 2022. godine, s izuzetkom 2017. godine, kreirana je regresijska funkcija. Koristeći ovu regresijsku funkciju, određen je protok za 2017. godinu.



Grafikon 7. Q-H krivulja

3.4 3D Numerički model jezera Prokljan

Openflows FLOOD je programski paket koji ima tri glavna različita alata: MOHID water, MOHID land i Urban floods [3]. Ovi se alati temelje na istom okviru i stoga mogu biti spojeni i korišteni za proučavanje ciklusa vode u integriranom pristupu.

U svrhu usporedbe rezultata iz analitičke metodologije razvijene u ovom radu, mjerenja brzine, saliniteta i numeričko modeliranje, korišten je MOHID water model koji simulira hidrodinamiku, kvalitetu vode u rijekama, jezerima, estuarijima i obalnim regijama. Dizajniran je za simulaciju transporta vode, sedimenta i hranjivih tvari u prirodnim vodnim sustavima. Uzima u obzir čimbenike poput valova, plime i oseke, vjetra i temperature kako bi simulirala složene interakcije između vode i okoliša. MOHID Water sustav za modeliranje sastoji se od 60 modula organiziranih u hijerarhijskoj modularnoj strukturi koja ima oko 300 000 redaka izvornog koda. MOHID Water je modularni sustav modeliranja vode s konačnim volumenima napisan u ANSI FORTRAN 95 koristeći filozofiju objektno-orijentiranog programiranja, integrirajući različite numeričke modele i podržavajući grafička korisnička sučelja koja upravljaju svim prethodnim i naknadnim operacijama. [1]

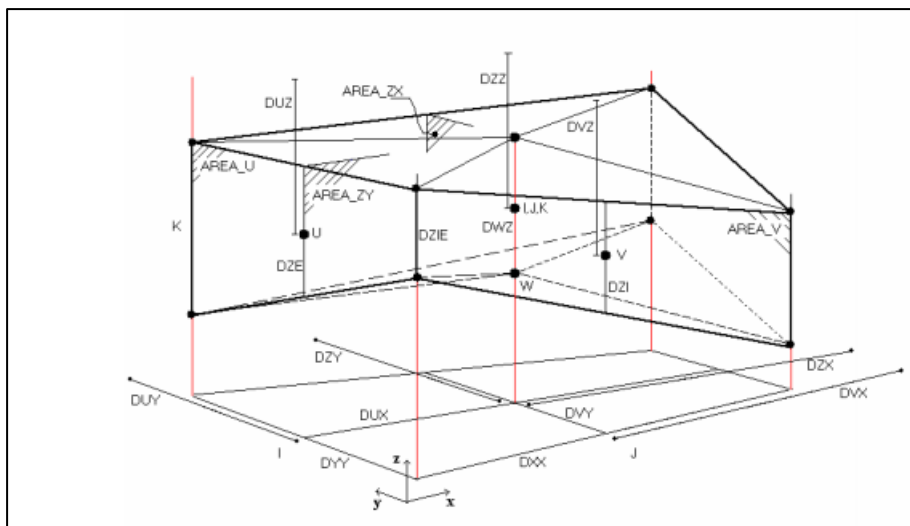
MOHID Water je model za površinske vode [4] (ocean, priobalna područja, rezervoari). Rješava trodimenzionalne hidrodinamičke jedinice koristeći metodu konačnog volumena [15] na strukturiranoj mreži za diskretizaciju jednadžbi. U ovom pristupu, diskretni oblik upravljajućih jednadžbi se makroskopski primjenjuje na kontrolni volumen ćelije. Opći zakon očuvanja za skalar U , sa izvorima Q u kontrolnom volumenu Ω , tada se piše kao:

$$\partial_t \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega$$

gdje su F tokovi skalara kroz površinu S koja ugrađuje volumen. Nakon diskretizacije ovog izraza u kontrolnom volumenu ćelije Ω_j gdje je U_j definiran, dobije se:

$$\partial_t (U_j \Omega_j) + \sum_{granica} \vec{F} \cdot \vec{S} = Q_j \Omega_j$$

Na ovakav način postupak rješavanja jednadžbi neovisan je o geometriji elementa. [13]



Slika 8. Element konačnog volumena MOHID modela (preuzeto iz dokumentacije MOHID-a [13])

Trodimenzionalni (3D) hidrodinamički modeli obično rješavaju Navier-Stokesove jednačbe, koje upravljaju gibanjem fluidnih tvari. Te se jednačbe mogu pojednostaviti na temelju određenih pretpostavki, poput Boussinesqove aproksimacije i pretpostavke o hidrostatskom tlaku, koje se često koriste u modelima oceanske i estuarijske cirkulacije poput MOHID water 3D.

3D hidrodinamičke jednačbe:

Jednačba kontinuiteta (Očuvanje mase)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Gdje je:

- ρ gustoća tekućine.
- t vrijeme.
- \mathbf{u} vektorska brzina.

Jednačbe gibanja (Navier-Stokesove jednačbe)

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

Gdje je:

- P tlak.
- \mathbf{g} gravitacijsko ubrzanje.

- **T** tenzijski tenzor (koji uključuje viskozne učinke).

Očuvanje soli i temperature:

Za sol (ili bilo koji skalar, S):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla S = \nabla \cdot (K \nabla S)$$

Gdje je K koeficijent difuzije.

Slične jednadžbe mogu se napisati za temperaturu, hranjive tvari i druge skalarno-kvantitativne veličine.

Jednadžba stanja:

Gustoća ρ , obično se izražava kao funkcija temperature, saliniteta i tlaka:

$$\rho = \rho(T, S, P)$$

Ovaj odnos je bitan za tokove pogonjene uzgonom, koji su česti u oceanskim i estuarskim sustavima. To su osnovne jednadžbe za 3D hidrodinamički model. U praksi se primjenjuju razne aproksimacije i granični uvjeti, a jednadžbe se diskretiziraju za numeričko rješavanje.

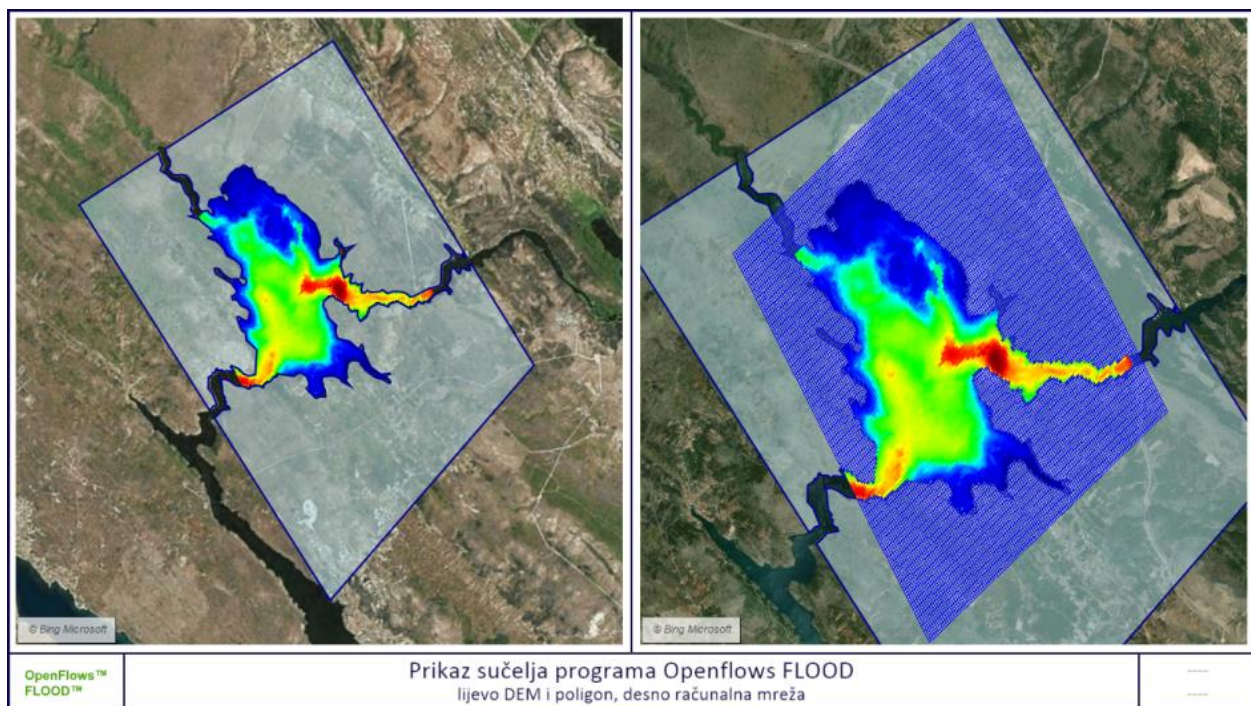
3.4.1 Ulazni podaci za pokretanje simulacije

Jedan od primarnih ciljeva ovog modela je analiza saliniteta vode u kontekstu protoka rijeke Krke. Da bi se razumjelo kako protok utječe na slanost, važno je prvo precizno odrediti vrijednosti protoka. Putem terenskih mjerenja provedenih u deset različitih kampanja, identificirani su datumi s najmanjim i najvećim protokom za relevantno razdoblje. Na temelju tih mjerenja, odabrana su dva specifična datuma za simulaciju, tipični ljetni dan s očekivanom stratifikacijom vertikalnog stupca i zimski kad je ujedno detektiran maksimalni protok i očekivano mješanje slojeva. 25. kolovoza 2022. godine i 12. prosinca 2022. godine.

3.4.1.1 Generiranje Digitalnog elevacijskog modela i diskretizacijske mreže

Prvi korak kod postavljanja modela je generiranje podloge. Digitalni elevacijski model (DEM) je 3D prikaz terena. Ulazni podaci za DEM mogu se prikupljati klasičnim geodetskim mjerenjima ili pomoću metoda daljinskog istraživanja, kao što su LiDAR i fotogrametrija bilo terestrički ili iz zraka. Nakon prikupljanja podaci se obrađuju u Geografskom informacijskom sustavu (GIS) softveru, gdje se snimljena podloga čisti, georeferencira i interpolira. Rezultirajući raster sadrži

vrijednosti visine za svaku ćeliju. Kako bi se podloga mogla iskoristiti za potrebe modeliranja potrebno je odrediti i rubne uvjete, dakle poligon koji točno određuje obalnu liniju. Kada su definirana podloga i obalna linija generira se mreža koja diskretizira podlogu. Kreiranjem diskretizacijske mreže dobije se mreža konačnih volumena. Dimenzije konačnog elementa za model jezera Prokljan su $DX = 55$ (m), $DY = 55$ (m) treća dimezija tj. DZ se kreira u modulima za simulaciju te se zadaje u slojevima. Prvi sloj je površinski sloj ($k=11$), gdje je $DZ=1$ (m), svaki sljedeći sloj do dna ($k=10$ do $k=1$) je definiran $DZ= 2$ (m).



Slika 9. Prikaz DEM i diskretizacijske mreže- jezero Prokljan

Nakon uspješne izrade prostorne diskretizacijske mreže, sljedeći ključni korak je konfiguracija modula za simulaciju. Prvo što je potrebno je detaljna analiza područja koje je predmet modeliranja, što uključuje definiranje i postavljanje relevantnih varijabli.

Za potrebe ove simulacije, protok je pretpostavljen kao konstantan. Ova pretpostavka je prihvatljiva uzimajući u obzir da se u razdoblju od 24 sata (koje je odabrano za rezultate simulacije) protok rijetko mijenja drastično.

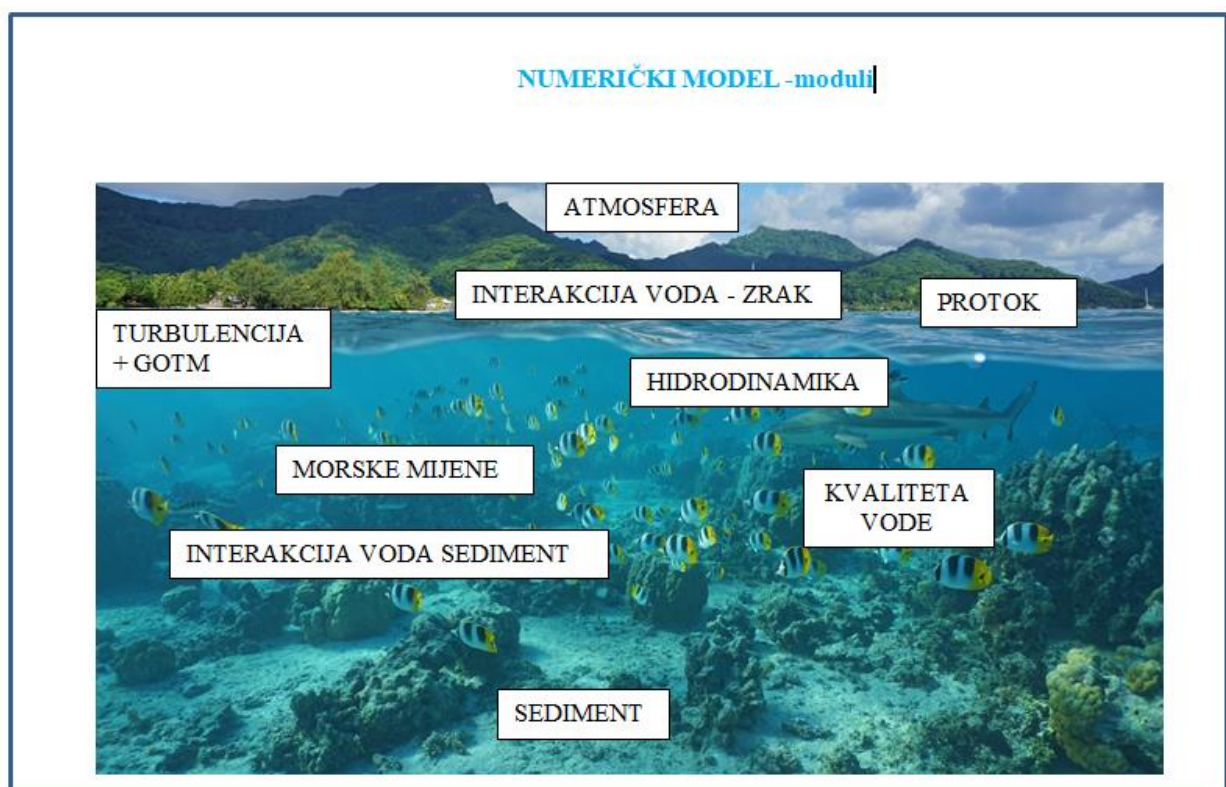
Samu simulaciju planira se provesti tijekom tri dana, s dodatna dva dana na početku kako bi se model stabilizirao prije početka glavnog razdoblja simulacije.

Sljedeći korak obuhvaća definiranje vremenskih serija na točkama gdje su provedena terenska mjerenja, kako bi se osigurala točnost i realnost modela. Također je važno uzeti u obzir i utjecaj

vjetra na modelirano područje. Za to je postavljen poseban modul koji uzima u obzir

varijabilnost vjetra kroz vremenske serije. Također jedan od ulaznih podataka su informacije o plimi i oseci koje su se primijenile pomoću konačnog rješenja elemenata (FES) [16] a u ovom slučaju korišten je FES2014 koji je već implementiran u MOHID korisničkom sučelju kao alat za predprocesiranje. Obzirom da domena jezera Prokljana spada u domene modela koji se nalazi daleko od dubokih područja, referentna točka definirana je izvan šibenskog zaljeva.

3.4.1.2 Moduli za kreiranje modela



Slika 10. Moduli simulacije za estuarij Openflows FLOOD

- Hidrodinamika – osnovni potrebni modul koji rješava jednadžbe kontinuiteta i momenta za elevaciju površine i 3D polje brzine za nestlačiva strujanja, u ortogonalnim horizontalnim koordinatama i generički okomite koordinate, uz pretpostavku hidrostatske ravnoteže i Boussinesqove aproksimacije
- Geometry- definira slojeve u modelu (koristi sigma i kartezijsku domenu)
- WaterProperties – odgovoran za izračunavanje svojstava vodnog stupca, uključujući temperaturu, salinitet, kohezivne sedimente, fitoplankton, hranjive tvari, zagađivače itd., ovisno o drugim uključenim postavkama unutar modula – advekcija i difuzija (definira odnose i

ponašanje advekcijskog i difuzijskog transportnog procesa) i WaterQuality)

- Turbulencija, GOTM – izračunava turbulentni prijenos mase, topline i količine gibanja.[14]
- InterfaceWaterAir – definira uvjete na granici voda-zrak prema implementiranju strujanja zrak-voda (mogu se odrediti meteorološkim modelirati ili izračunati pomoću temperature zraka, vlage, brzine vjetra, oblaka pokrov, a sunčevo zračenje i koeficijente daje korisnik)
- InterfaceSedimentWater – definira uvjete na granici dna i vode izračunavanjem flukseva, ali je također vlasnik varijabli stanja koje imaju neznatna pokretljivost (filtarske hranilice, mikrofitobentos, razlagači itd.)
 - Atmosphere- modul u kojem definiramo vjetar te ostale varijable kao što je temperatura zraka
 - Discharges – definira protok po vertikalnim slojevima
 - Tide – definira parametre mijena plime i oseke
 - Model- definira trajanje simulacije

Kreiranjem trodimenzionalnog modela u programu, nije dovoljno samo definirati horizontalne dimenzije (kao što su DX i DY); također je potrebno konstruirati vertikalnu dimenziju, ili treću dimenziju. Da bi se postigla ova vertikalna dimenzija, koristi se modul pod nazivom "Geometry". Unutar ovog modula, korisnik može definirati različite slojeve koji predstavljaju različite dubine u modeliranom tijelu vode.

Kreiranjem 3D modela važnost vertikalne turbulencije ne može se zanemariti. Vertikalna turbulencija ima ključnu ulogu u miješanju i cirkulaciji vode, posebno u složenim vodenim sustavima. Upravo zbog toga, za precizne 3D aplikacije, nužno je koristiti odgovarajući tretman vertikalne turbulencije. U ovom kontekstu, preporučuje se aktiviranje modula "GOTM" unutar simulacije. Ovaj modul pruža napredne algoritme i funkcije za modeliranje turbulencije, osiguravajući da simulacija precizno predstavlja stvarne procese koji se događaju unutar vodenog tijela. Također, važno je napomenuti da će vertikalna rezolucija simulacije imati izravan utjecaj na točnost i detalje rezultata.

3.4.1.3 Turbulencija

Modeliranje turbulencije, advekcije i disperzije u fluidima često se temelji na Reynolds osrednjenim Navier-Stokesovim (RANS) jednažbama. Ove jednažbe opisuju očuvanje mase, količine gibanja i energije uzimajući u obzir učinke turbulencije [46].

Jednostavno rečeno, za skalar (kao što je slanost, temperatura ili koncentracija onečišćivača), jednažba transporta može se napisati kao:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\phi) = \nabla \cdot (D\nabla\phi) + S$$

Gdje:

- ϕ je skalar koji treba promatrati (npr. salinitet, temperatura).
- t je vrijeme.
- \mathbf{U} je vektorsko polje brzine fluida.
- D je koeficijent disperzije, koji se može podijeliti na molekularnu i turbulentnu disperziju.
- S predstavlja izvore ili ponore za skalar ϕ .

Lijeva strana jednažbe predstavlja promjenu skalarne veličine s vremenom i njezinu advekciju s protokom. Desna strana predstavlja difuziju ili disperziju skalarne veličine i sve izvore ili ponore.

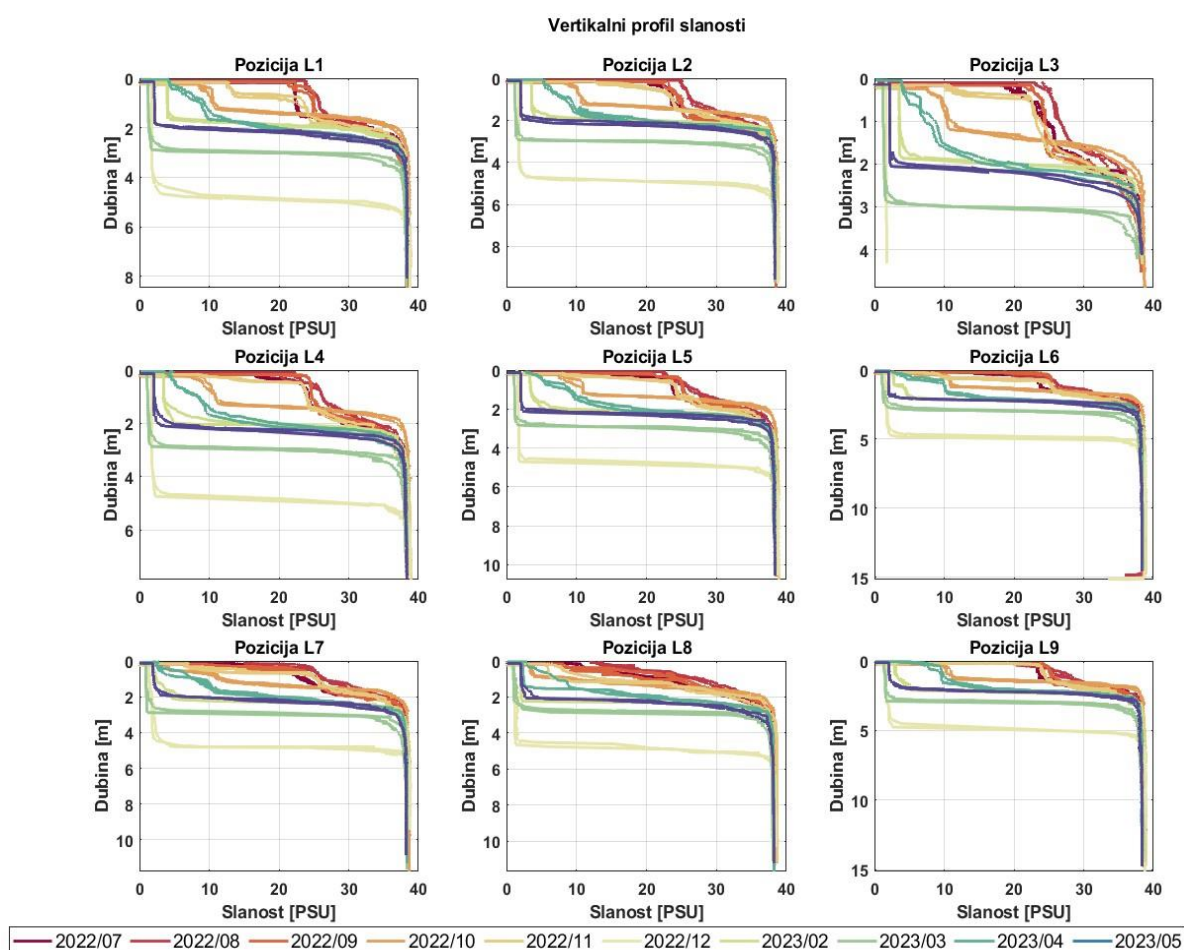
Ova jednažba je generalizacija i pojednostavljena verzija složenijeg skupa jednažbi koje se koriste u modelima kao što je MOHID Water. Stvarne jednažbe koje opisuju turbulenciju, advekciju i disperziju mnogo su složenije i često uključuju dodatne članove, posebno kada se koriste modeli turbulencije kao što su $k-\epsilon$ ili $k-\Omega$.

4 REZULTATI I USPOREDBA

4.1 Rezultati mjerenja

Tijekom terenskih kampanja, posebna pažnja posvećena je mjerenju i interpretaciji saliniteta. Grafikon 13. prikazuje vertikalni profili saliniteta za devet odabranih lokacija.

Godina od interesa, 2022., može se smatrati manje obilatom u pogledu protoka u usporedbi s ukupnim sažetkom i preostalim godinama, što može biti značajno za potencijalno povećanje saliniteta.



Grafikon 13. Profili saliniteta iz deset mjernih kampanja (pozicije označene na Slici 3.) [43].

Ti profili jasno ukazuju na visoko stratificirani karakter estuarija rijeke Krke i Prokljanskog jezera, što je u skladu s nalazima iz prethodnih studija [27]. Estuarij redovito izražava vertikalnu stratifikaciju, s jasno vidljivom haloklinom koja pokazuje oštar gradijent saliniteta, tipično na dubinama između 1,5 i 3,5 metra. Iako položaj i karakteristike halokline variraju ovisno o

lokaciji i vremenu, poseban naglasak u ovom radu stavljen je na utjecaj protoka rijeke Krke, koji ima presudan utjecaj na položaj halokline [42]. U toplijim mjesecima, kada su protoci rijeke manji, haloklina se obično nalazi na dubinama od 1,5 do 2,5 metra. S druge strane, tijekom zimskih i proljetnih mjeseci haloklina može zaroniti do dubina od 3,5 metra, s posebno dubokim položajem zabilježenim u prosincu 2022. Vrijedno je istaknuti da je mjerenje iz prosinca 2022., koje je bilo u vrijeme maksimalnog protoka rijeke, pokazalo najdublje mjerenje halokline. Ovaj fenomen bio je najizraženiji na lokaciji L3, gdje je haloklina potpuno nestala, što ukazuje na znatno ispiranje slatke vode i pomicanje slane morske vode.

Godina od interesa, 2022., može se smatrati manje obilatom u pogledu protoka u usporedbi s ukupnim sažetkom i preostalim godinama, što može biti značajno za potencijalno povećanje saliniteta.

4.2 Rezultati analize

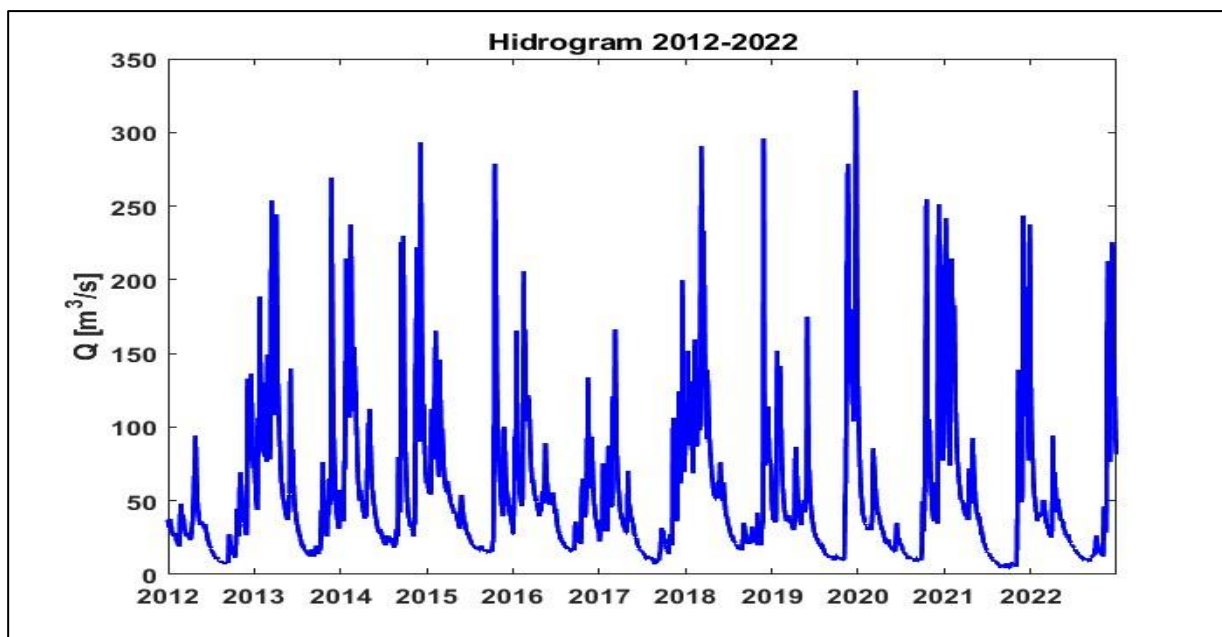
4.2.1 Analiza vremenskih serija protoka

Podaci su obrađeni korištenjem programske alatke Matlab. Svi grafovi su izrađeni u istom programu. Matlab pruža širok spektar mogućnosti za statističku analizu. Svi grafovi prikazuju jasne i precizne rezultate dobivene analizom podataka te omogućuju lakše razumijevanje rezultata.

4.2.1.1 Hidrogram

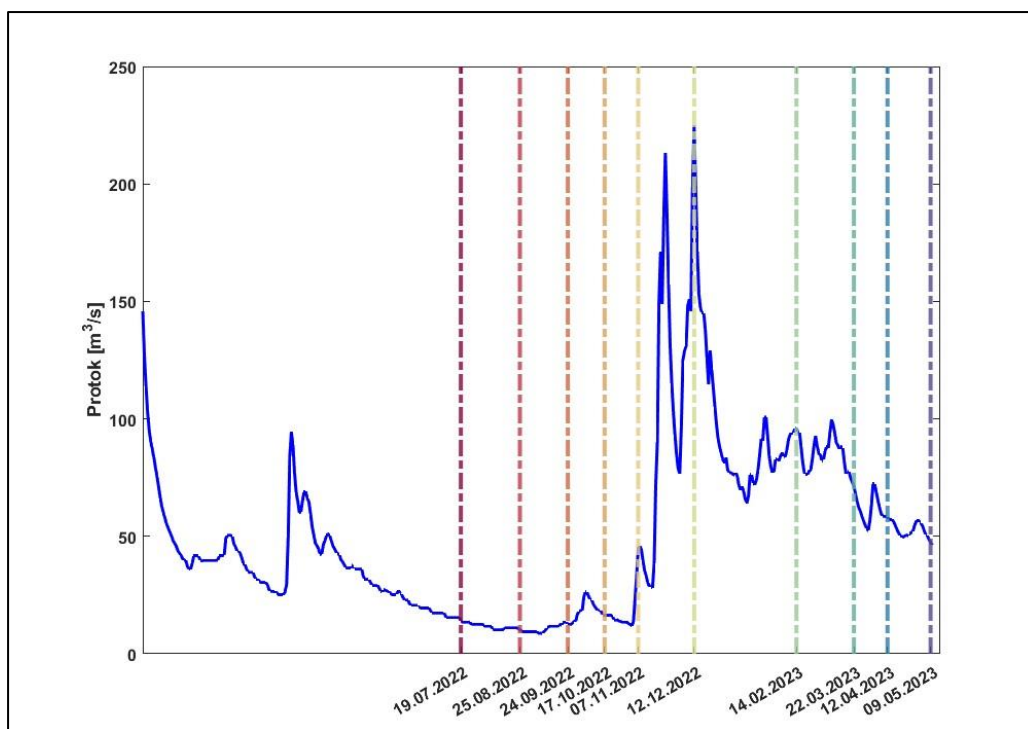
Ukupni hidrogram prikazuje promjene protoka tijekom promatranog razdoblja. Također, uočavaju se oscilacije između najmanjeg i najvećeg protoka, što je u skladu s prirodnim varijacijama u protoku vode u vodotoku Krke. Stoga je praćenje oscilacija u protoku vode ključno za razumijevanje dinamike vodotoka Krke te za provođenje mjera zaštite i očuvanja ovog vrijednog prirodnog resursa

Nadalje, primjećuje se da u svakoj godini postoji razdoblje naglog porasta protoka, što upućuje na povezanost između količine oborina i protoka vode u vodotoku. Ovo je važno za razumijevanje hidrološkog sustava i njegovog utjecaja na okoliš te može poslužiti kao osnova za daljnju analizu hidroloških parametara i procesa.



Grafikon 8. Ukupni hidrogram [43]

Za potrebe mjerenja, analize i numeričkog modeliranja, uzete su ekstremne vrijednosti protoka. Dana 25. kolovoza 2022. zabilježen je najmanji protok tijekom cijele godine, dok je 12. prosinca 2022. zabilježen najveći protok za 2022. godinu. Uzimajući to u obzir, podaci vezani za vjetar, morske mijene i druge varijable prezentirani su upravo za ova dva karakteristična dana.

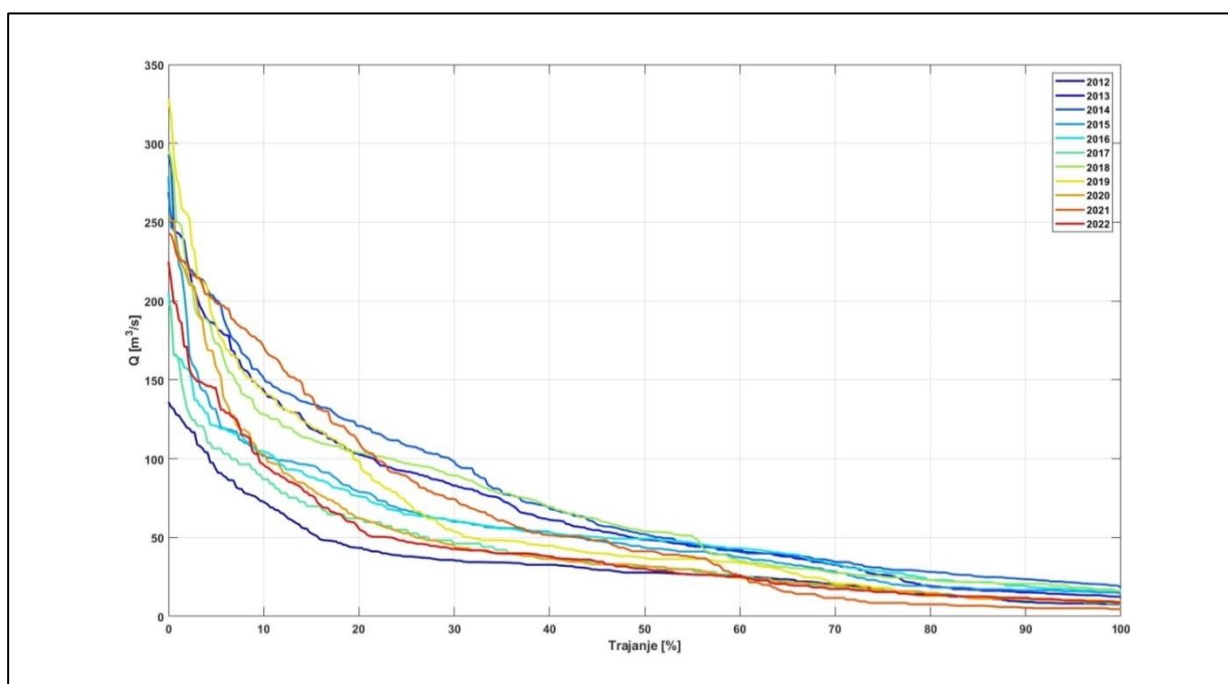


Grafikon 9. Hidrogram koji prikazuje relevantni vremenski okvir i označene datume terenskih kampanja mjerenja [43]

4.2.1.2 Krivulje trajanja

Krivulje prikazuju vrijednosti protoka, koje se mogu koristiti za utvrđivanje trendova, identifikaciju vrhunaca i padova, usporedbu različitih sustava ili procesa, otkrivanje anomalija i analizu razina protoka.

Krivulja trajanja je važan alat za analizu hidroloških podataka, jer omogućava uvid u raspodjelu protoka tijekom određenog vremenskog perioda. Identifikacija vrhunaca i padova u krivulji trajanja je bitna jer to ukazuje na važne promjene u hidrološkom sustavu, kao što su ekstremne poplave ili suše, koje mogu imati značajan utjecaj na okoliš, ekonomiju i društvo. Krivulje trajanja mogu pomoći pri optimizaciji performansi, rješavanju problema i boljem razumijevanju dinamike protoka tijekom vremena.



Grafikon 10. Krivulje trajanja 2012. - 2022. god.

U primjeru 2021. godine, vrhunci i padovi na krivulji trajanja ukazuju značajne promjene u protoku tijekom godine. Visoki protok od 330 m³/s u vlažnom dijelu godine može ukazivati na obilne kiše i poplave, dok nizak protok ispod 20 m³/s u sušnom dijelu godine ukazuje na dugotrajnu sušu. Periodične pojave gdje je veliki raspon protoka 10 posto vremena, a mali raspon protoka u 90 posto vremena, ukazuje na varijabilnost protoka tijekom godine. Ova analiza može pomoći u razumijevanju utjecaja klimatskih promjena na hidrološki sustav, te u planiranju

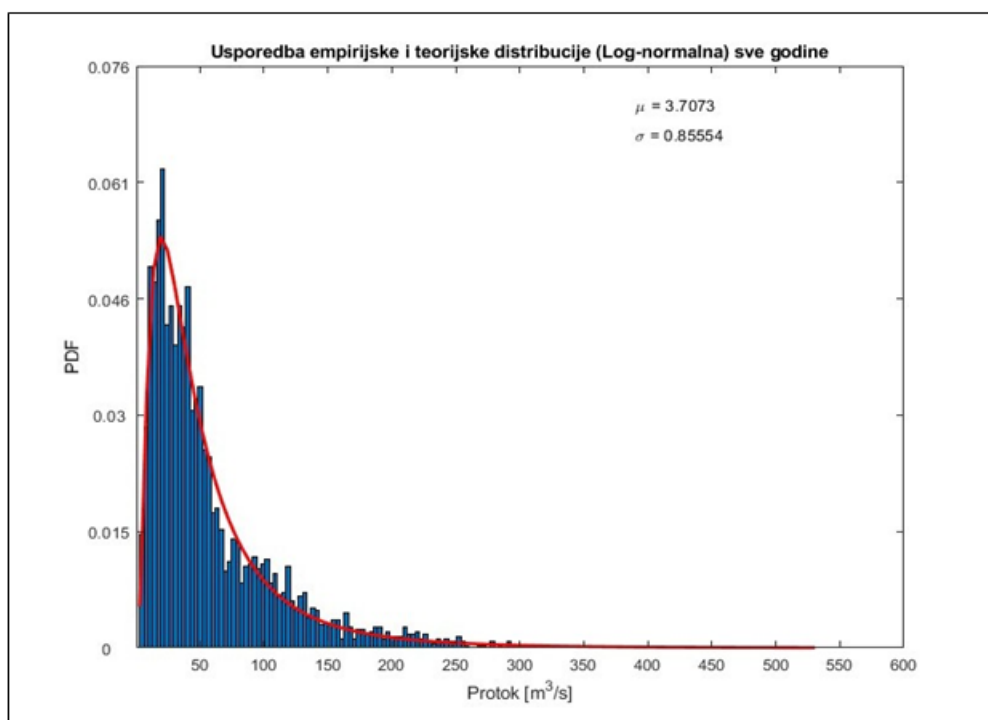
adekvatnih mjera za zaštitu okoliša i smanjenje rizika od ekstremnih vremenskih uvjeta.

4.2.1.3 Funkcije gustoće vjerojatnosti

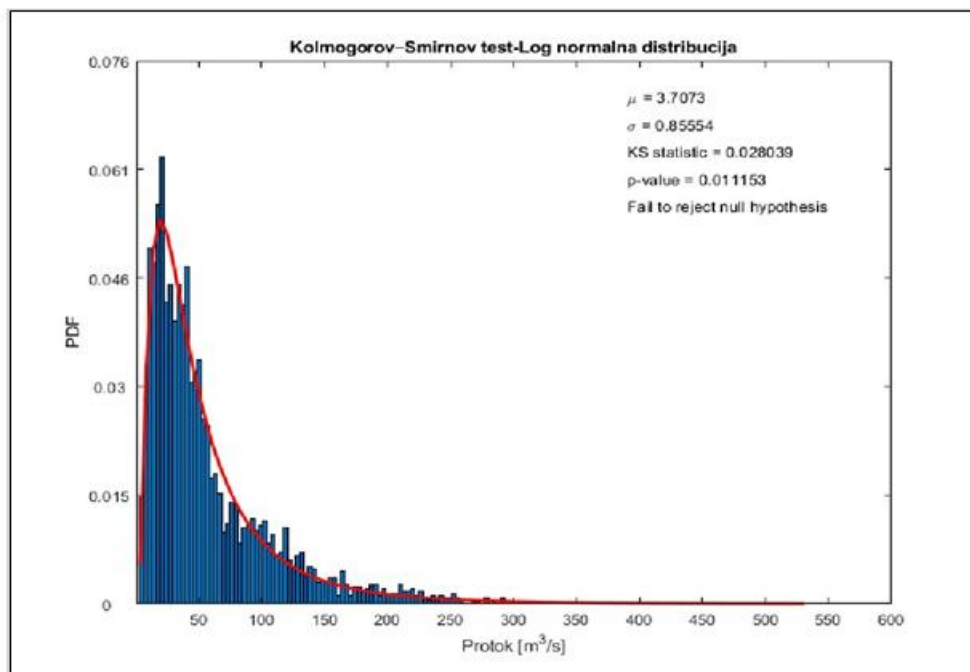
Log-normalna distribucija je kontinuirana distribucija koja se koristi za modeliranje slučajnih varijabli koje su pozitivne i asimetrične. Često se koristi u prirodnim znanostima posebno u vodnim resursima, kada podaci ne mogu fizikalno imati negativnu vrijednost. Parametri distribucije su srednja vrijednost (μ) i standardna devijacija (σ) logaritma podataka.

$$f_{LN}(x / \mu_{\ln x}, \sigma_{\ln x}^2) = \frac{1}{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} e^{-[\ln(x) - \mu_{\ln x}]^2 / 2\sigma_{\ln x}^2}, \quad x > 0$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti (PDF) log-normalne distribucije korištena je za prilagođavanje empirijski prikupljenih podataka koji slijede log-normalnu razdiobu.



Grafikon 11. Log- normalna razdioba (godine 2012. i 2021.)



Grafikon 12. Log- normalna – Kolmogorov- Smirnov test

"Fail to reject null hypothesis" je izraz koji se koristi u statističkoj analizi kada se nakon testiranja ne može odbaciti nulta hipoteza. Nulta hipoteza obično tvrdi da ne postoji statistički značajna razlika ili odnos između varijabli koje se testiraju. Kada statistička analiza ne uspije odbaciti nultu hipotezu, to ne znači da je

nulta hipoteza potvrđena ili istinita. Umjesto toga, to znači da nemamo dovoljno dokaza da bismo je odbacili. Ovo može biti posljedica malog uzorka podataka, nedostatka preciznosti u mjerenju ili nedostatka varijabilnosti u podacima. Ako se ne može odbaciti nulta hipoteza, to ne znači da je istinita ili da treba prihvatiti. Umjesto toga, to znači da nije bilo dovoljno dokaza da se odbaci. U takvim situacijama može biti korisno provesti dodatna istraživanja kako bi se povećala pouzdanost rezultata. [44]

U testiranju hipoteza, nulta hipoteza (H_0) je hipoteza da ne postoji značajna razlika između promatranih podataka i očekivanja temeljenih na slučajnosti ili nasumičnoj varijaciji. Alternativna hipoteza (H_1) je suprotna nultoj hipotezi i to je ono što istraživač pokušava dokazati.

"Reject null hypothesis" je izraz koji se koristi u statistici što znači da je odbačena nulta hipoteza. Nulta hipoteza se obično postavlja kao tvrdnja da ne postoji nikakva razlika između dviju grupa

ili da ne postoji nikakva veza između dvije varijable.

Primjerice, ako se analizira protok Skradinskog buka u različitim godinama i postavi nulta hipoteza da nema razlike u prosječnom protoku između 2012. i 2021. godine, a nakon provođenja testa hipoteza odbijena, tada se može zaključiti da postoji statistički značajna razlika u prosječnom protoku između tih godina.

U kontekstu Hrvatske, jedan primjer bi moglo biti istraživanje koje uspoređuje prosječne plaće muškaraca i žena. Nulta hipoteza bi bila da nema razlike u prosječnoj plaći između spolova, a ako se nakon statističke analize otkrije da je razlika statistički značajna i odbaci se nulta hipoteza, tada bi se moglo zaključiti da postoje razlike u prosječnoj plaći između muškaraca i žena u Hrvatskoj.

Kad se provodi test hipoteze, postoje dvije moguće ishode: odbaciti nultu hipotezu ili ne odbaciti nultu hipotezu.

Odbacivanje nulte hipoteze znači da su promatrani podaci značajno različiti od očekivanja temeljenih na slučajnosti ili nasumičnoj varijaciji. Drugim riječima, postoje dovoljni dokazi za podršku alternativnoj hipotezi.

Neuspjeh u odbacivanju nulte hipoteze znači da nema dovoljno dokaza za podršku alternativnoj hipotezi, a promatrani podaci nisu značajno različiti od očekivanja temeljenih na slučajnosti ili nasumičnoj varijaciji. Međutim, to ne znači nužno da je nulta hipoteza istinita, jer mogu postojati drugi faktori koji bi mogli utjecati na ishod.

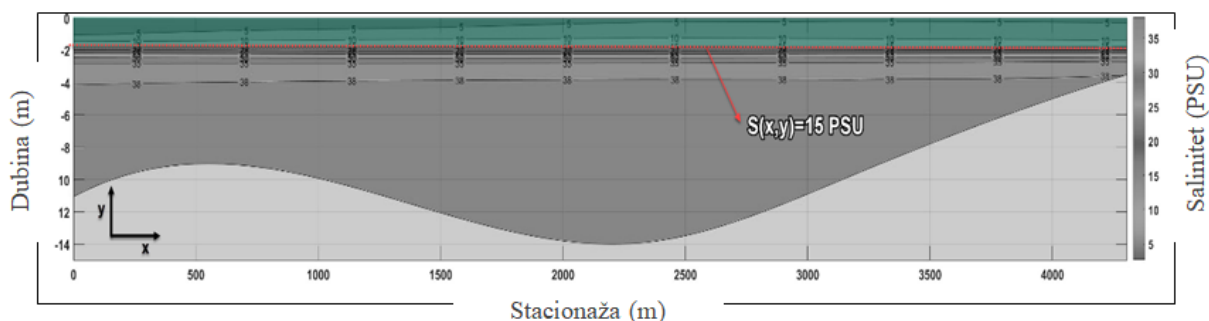
Važno je napomenuti da testiranje hipoteze ne može dokazati da je alternativna hipoteza istinita, već samo može pružiti dokaze koji je podržavaju. Stoga, oba ishoda testa hipoteze (odbacivanje ili neuspjeh u odbacivanju nulte hipoteze) mogu biti korisna, ovisno o istraživačkom pitanju i kontekstu.

P-vrijednost (engl. p-value) je statistička mjera koja se koristi u hipoteznom testiranju za utvrđivanje je li rezultat testa slučajan ili stvaran. P-vrijednost se izračunava kao vjerojatnost dobivanja rezultata testa jednakog ili ekstremnijeg od onog koji je zapravo dobiven, pod pretpostavkom da je nulta hipoteza točna.

Level signifikantnosti je razina na kojoj se odlučuje o odbacivanju ili ne odbacivanju nulte hipoteze u hipotезnom testiranju. Obično se koristi razina od 0.05, što znači da se nulta hipoteza odbacuje ako je vjerojatnost da bi se takav ili ekstremniji rezultat dogodio slučajno manja od 5%. Alfa (α) predstavlja vjerojatnost pogrešnog odbacivanja nulte hipoteze kada je ona zapravo točna. Obično se koristi razina od 0.05, što znači da postoji 5% vjerojatnosti da se nulta hipoteza odbaci iako je zapravo točna. Alfa se koristi za određivanje levela signifikantnosti u hipotезnom testiranju.

4.2.2 Index udjela bočate vode (UBV)

Indeks udjela bočate vode je alat koji je razvijen kako bi se definirala distribucija različitih razina saliniteta unutar vodenog stupa. Ovaj indeks je od posebnog interesa u kontekstu estuarija, gdje prisutnost halokline dijeli vodeni stupac na različite slojeve s različitim hidrološkim, kemijskim i biološkim karakteristikama. Umjesto da se vodeni stupac rigidno segmentira na čvrste slojeve, uključujući haloklinu kao specifičnu granicu, indeks udjela bočate vode koristi inovativni pristup. Ovaj pristup se konkretno fokusira na identifikaciju reprezentativne razine saliniteta za slanu vodu i izračunava odgovarajući omjer unutar definiranog transekta.



Grafikon 14. Koncept frakcije bočate vode na uzorku 2D transekta [43]

Tijekom kampanje, u skladu s ranijim otkrićima, uočeno je da haloklina segmentira vodeni stupac KRE-a na zone s različitim hidrološkim, kemijskim i biološkim svojstvima [30]. Takvo zapažanje potaknulo je razvoj indeksa udjela bočate vode, s namjerom definiranja distribucije varijacija saliniteta. Umjesto tradicionalnog segmentiranja vodenog stupa na jasno definirane slojeve, s haloklinom kao izraženom granicom, donesen je zaključak o potrebi za inovativnim pristupom. Posebno, identifikacirale su se reprezentativne razine saliniteta za morsku vodu i određivanje pripadajućeg udjela unutar određenog transekta. Navedeni transekt, prikazan na Grafikonu 7., proteže se od lokacija L3 do L8, uglavnom slijedeći obalu od novog Skradinskog

Mosta (na mjestu L8) do L3 u jezeru. Iako lokacije L1, L2 i L9 pružaju dodatne podatke za željenu zonu, samo su lokacije od L3 do L8 uzete u obzir radi geometrijski koherentne analize.

Bitan je jer omogućuje precizniju analizu i vizualizaciju promjena u distribuciji saliniteta kroz vodeni stupac, što je ključno za razumijevanje hidroloških, kemijskih i bioloških procesa unutar estuarija. UBV definiran je kako bi se kvantificirao udio vodenog stupca s salinitetom ispod određenog praga, u odnosu na ukupni volumen vodenog stupca unutar određenog transekta. Matematički, ovaj indeks je definiran jednadžbom:

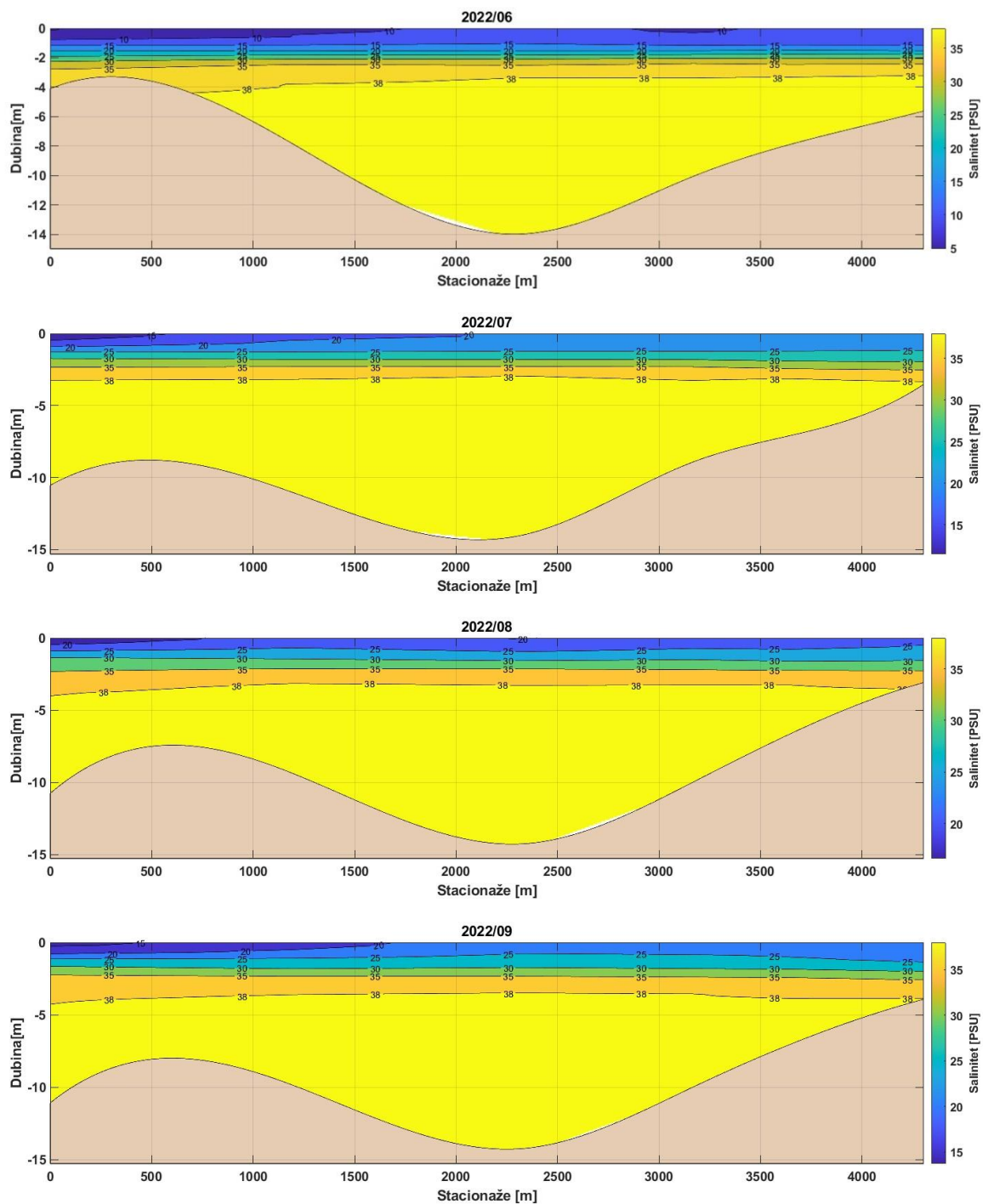
$$UBV (PSU_n) = \frac{\iint_{A_n} dx dy}{\iint_{A_{tot}} dx dy}$$

gdje je:

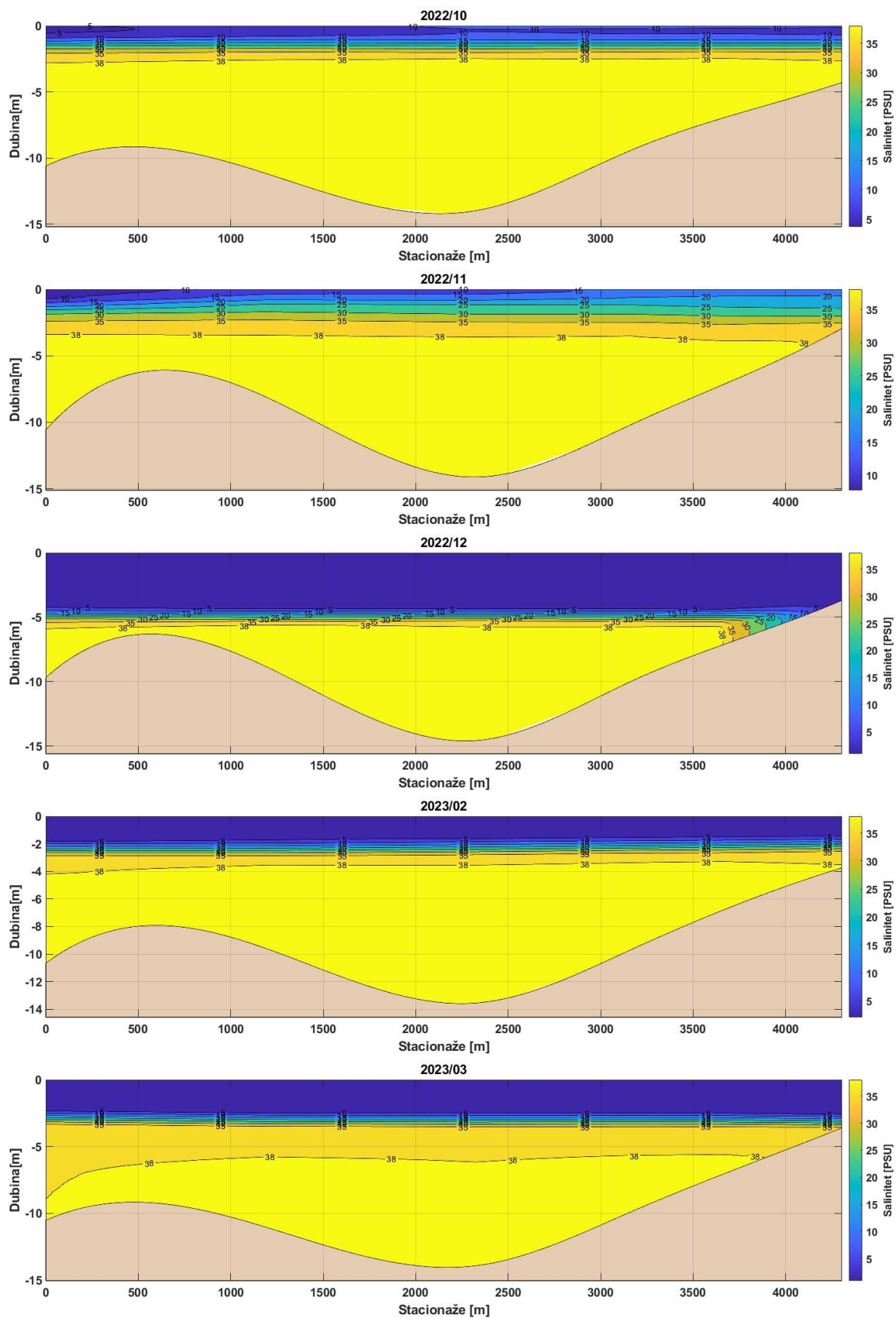
A_n površina gdje salinitet ne prelazi određeni prag, tj. ($S(x,y) \leq nPSU$), gdje je $nPSU$ odabrani prag saliniteta.

A_{tot} ukupna površina transekta, koja obuhvaća prostor od površine vode do morskog dna. Ovo područje je grafički prikazano podebljanom linijom na grafikonu 7.

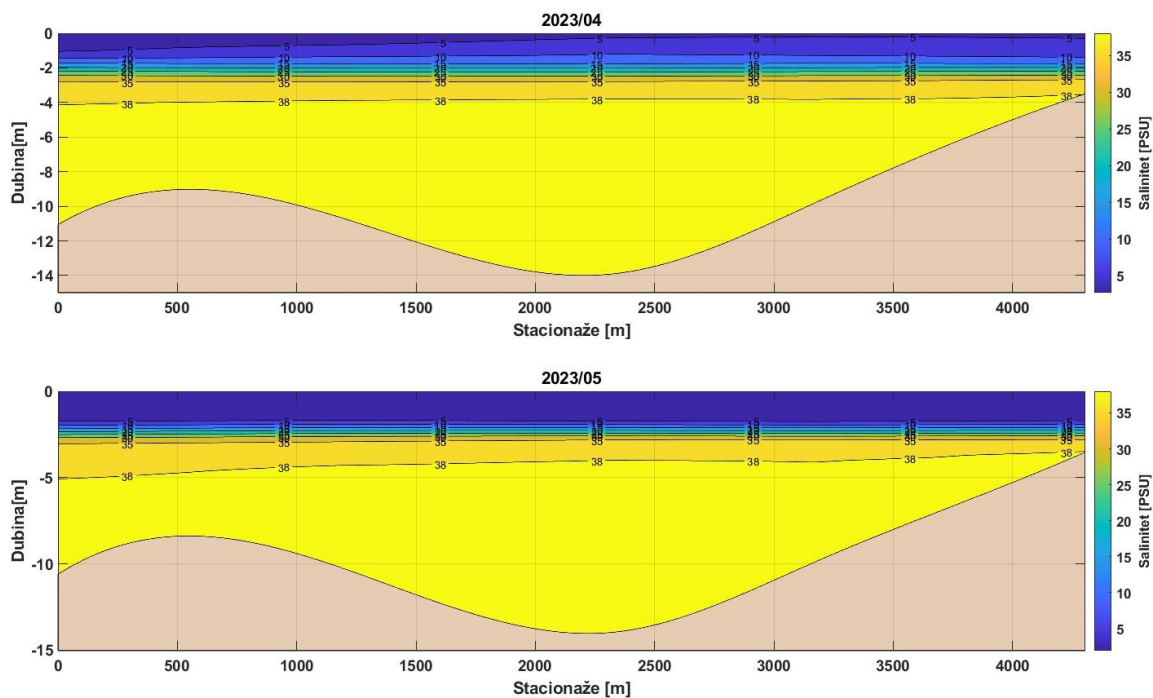
U okviru deset terenskih istraživanja, podaci o salinitetu korišteni su za kreiranje dvodimenzionalnih transekata, koji su prikazani na grafikon 13. (za period od lipnja do rujna 2022.), 14. (od listopada 2022. do ožujka 2023.) i 15. (travanj i svibanj 2023.). Ovi transekti omogućuju detaljniji prikaz promatranih promjena, prostirući se od lokacije mjerenja L8 do plićeg mjesta L3.



Grafikon 13. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje od lipnja do rujna 2022.)[43].

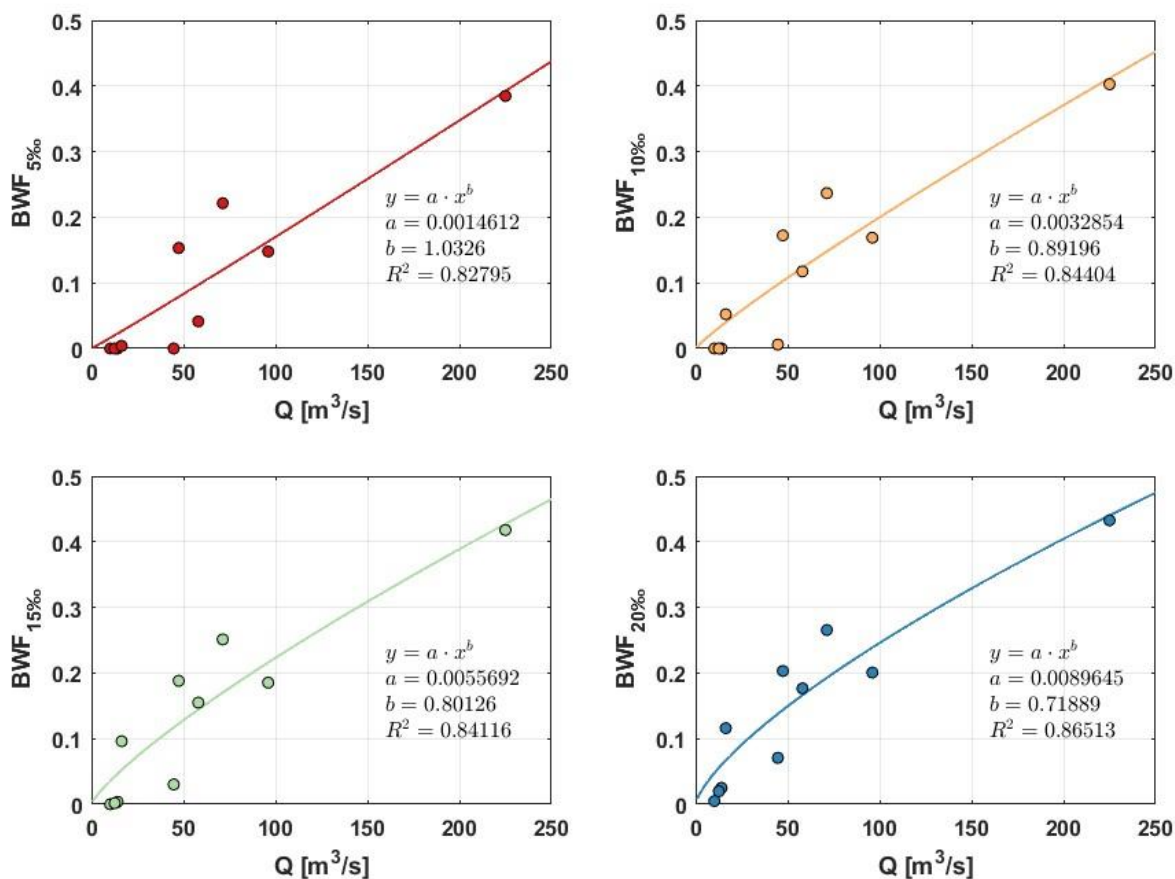


Grafikon 14. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje od listopada 2022. do ožujka 2023.) [43]

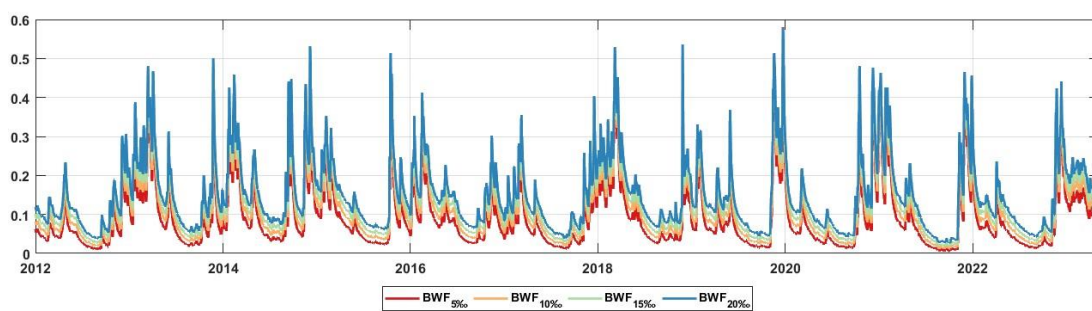


Grafikon 15. 2D transekt saliniteta dobiven iz mjernih točaka L3-L8 (kampanje travanj i srpanj 2023.) [43]

Nakon definiranja i izračuna UBV za različite pragove saliniteta (nPSU), provedena je analiza kako bi se istražile korelacije između izračunatih vrijednosti UBV-a i protoka rijeke Krke. Na temelju ovih korelacija, razvijeni su regresijski modeli kako bi se kvantitativno opisale i predvidjele ove veze.



Grafikon 16. Regresijski modeli za procjenu frakcije slane vode na različitim razinama saliniteta kao funkcija protoka rijeke [43]



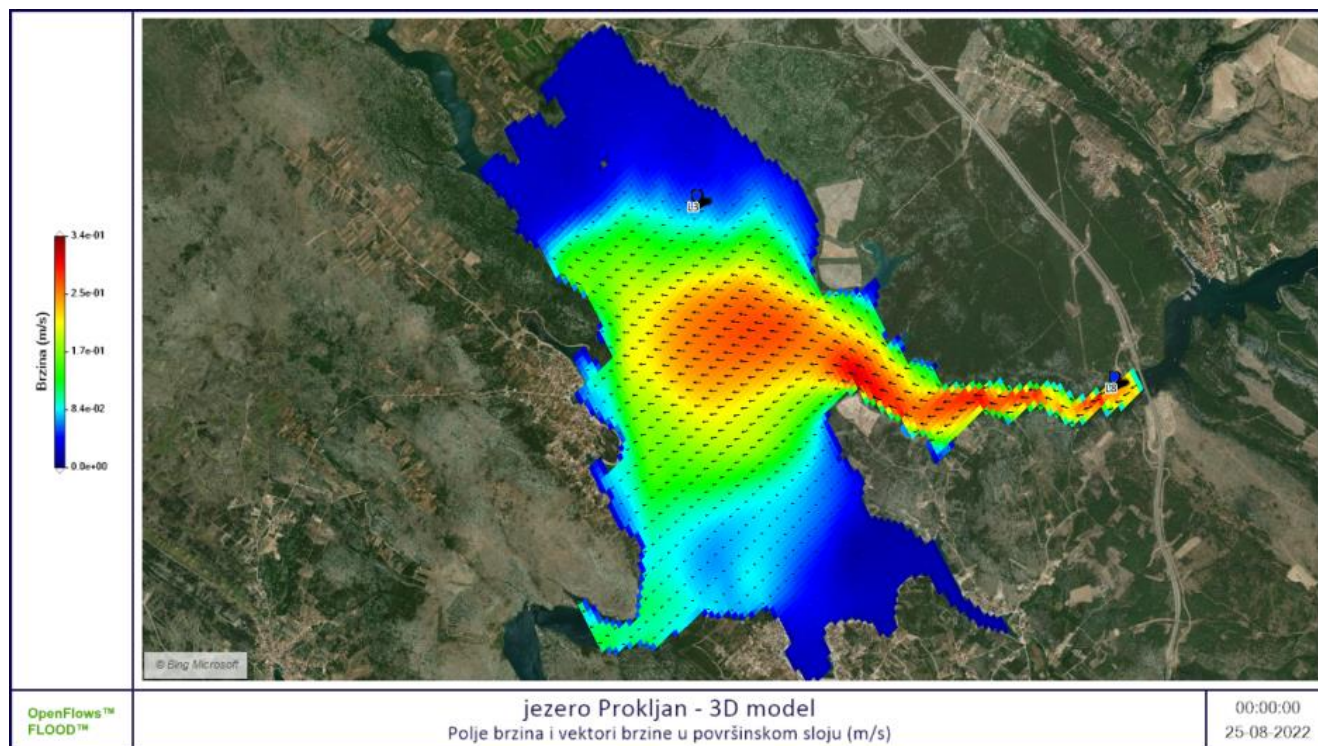
Grafikon 17. Procjena udjela bočate vode za sve dostupne podatke o protoku rijeke [43]

Relativno mala količina suspendiranih materijala i niska stopa sedimentacije unutar KRE [42], dopuštaju nam da zanemarimo promjene na morskom dnu, fokusirajući se na UBV isključivo temeljem vrijednosti protoka rijeke duž odabranog transekt. Premda bi promjene uzrokovane sedimentacijom i plimnim utjecajima mogle imati utjecaj na konfiguraciju dna i samim time na transekt, ovaj indeks nudi optimističku perspektivu. Može služiti kao brz način procjene kako se slanost distribuira duž transekt. Nadalje, kod razvoja numeričkog modela, u slučaju daljnjeg kalibriranja postavki modela, UBV bi mogao pridonijeti izradi vertikalnih profila za cijelo jezero, pa čak i estuarij, identificirajući udio određene koncentracije slane vode unutar specifičnog volumena jezera [43].

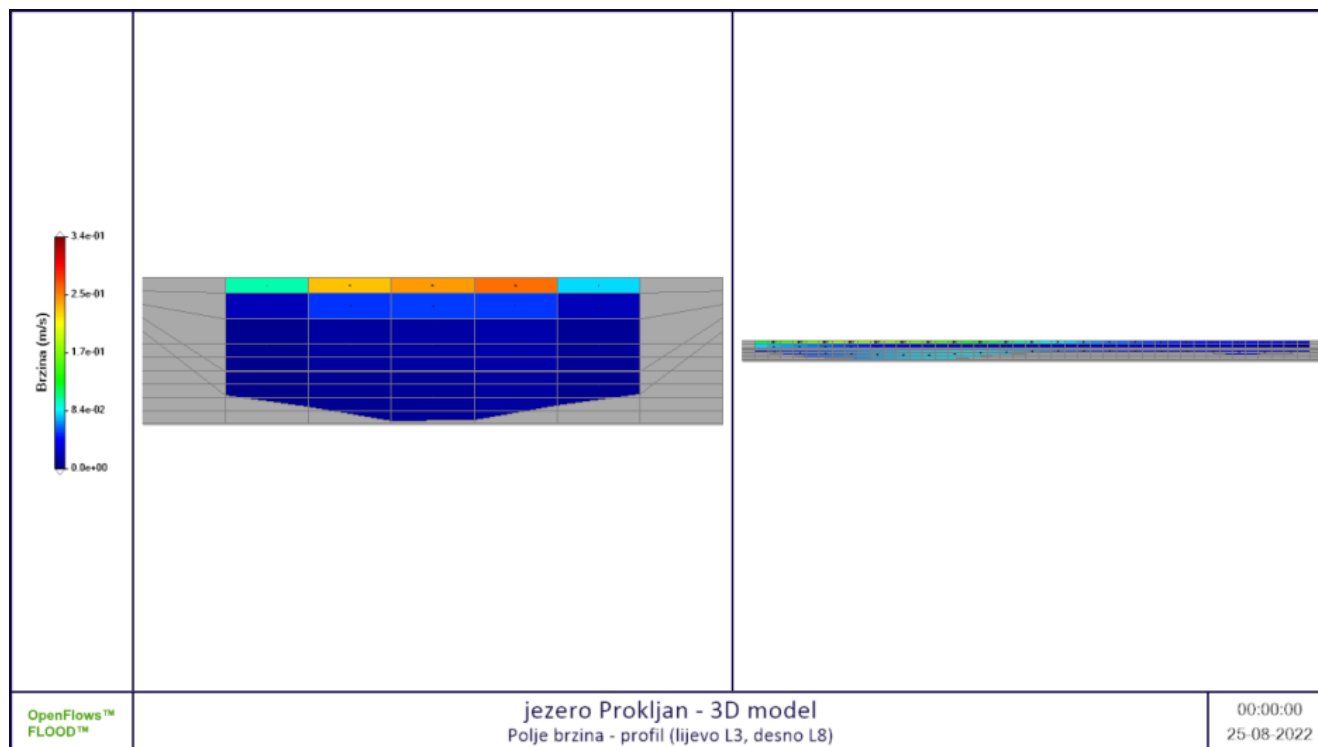
4.3 Rezultati hidrodinamičkog 3D modela

4.3.1 Polje brzina

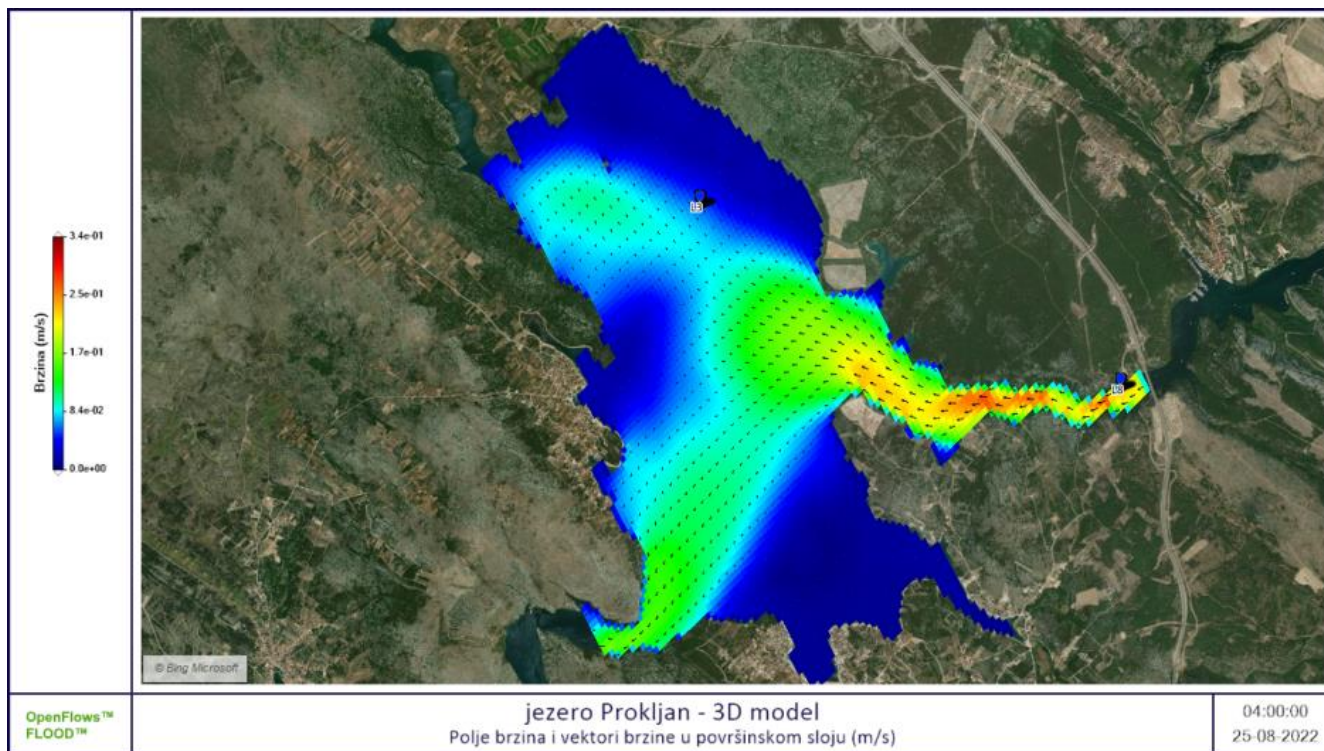
Postavke modula – discharge definira protok, za 8 mjesec obzirom na prethodnu statističku analizu serija protoka, vršni protok za 25. 8. 23. je 10 (m³/s).



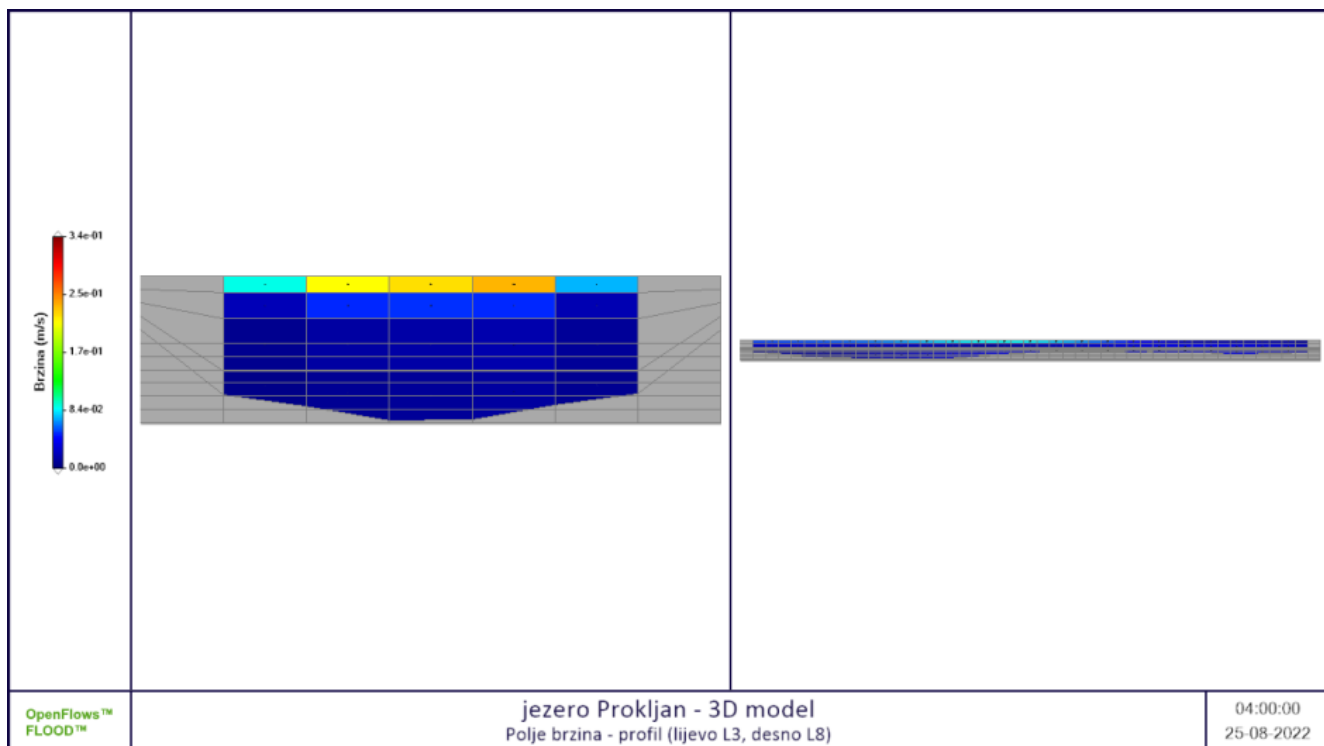
Slika 11. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



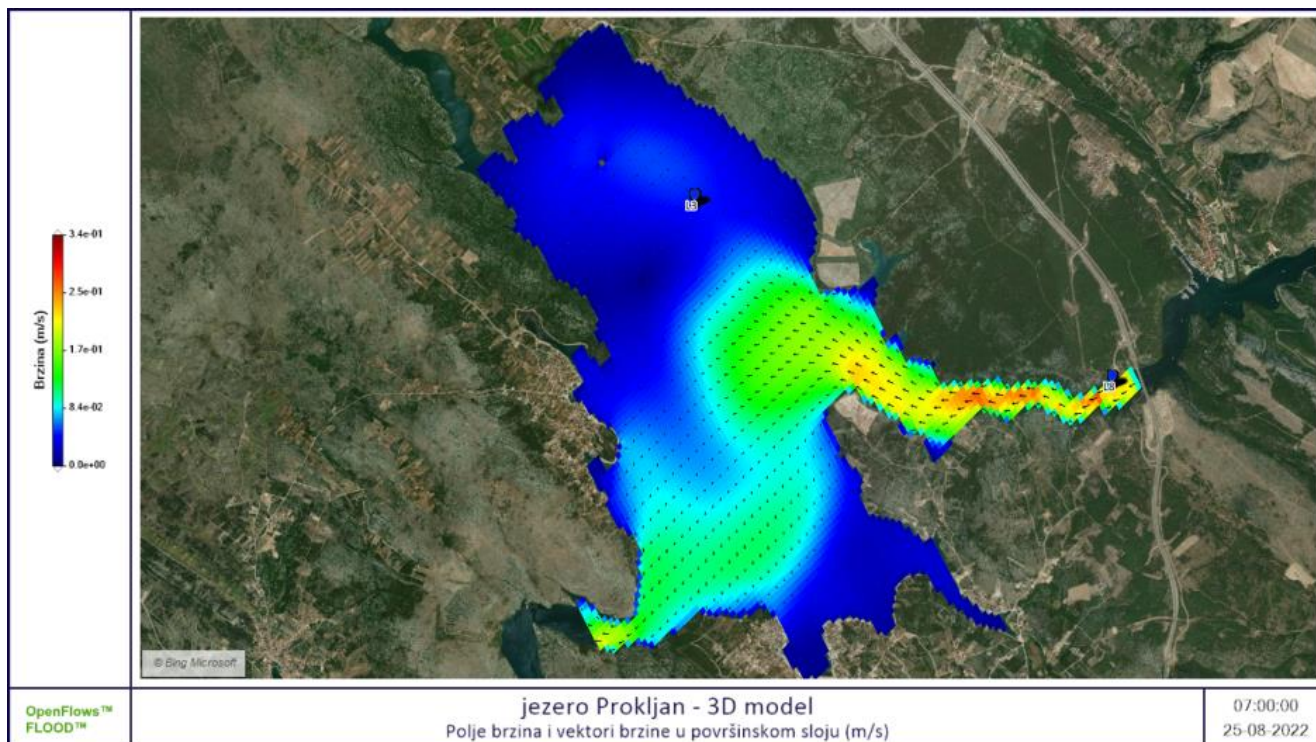
Slika 12. Polje brzina - profil – početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



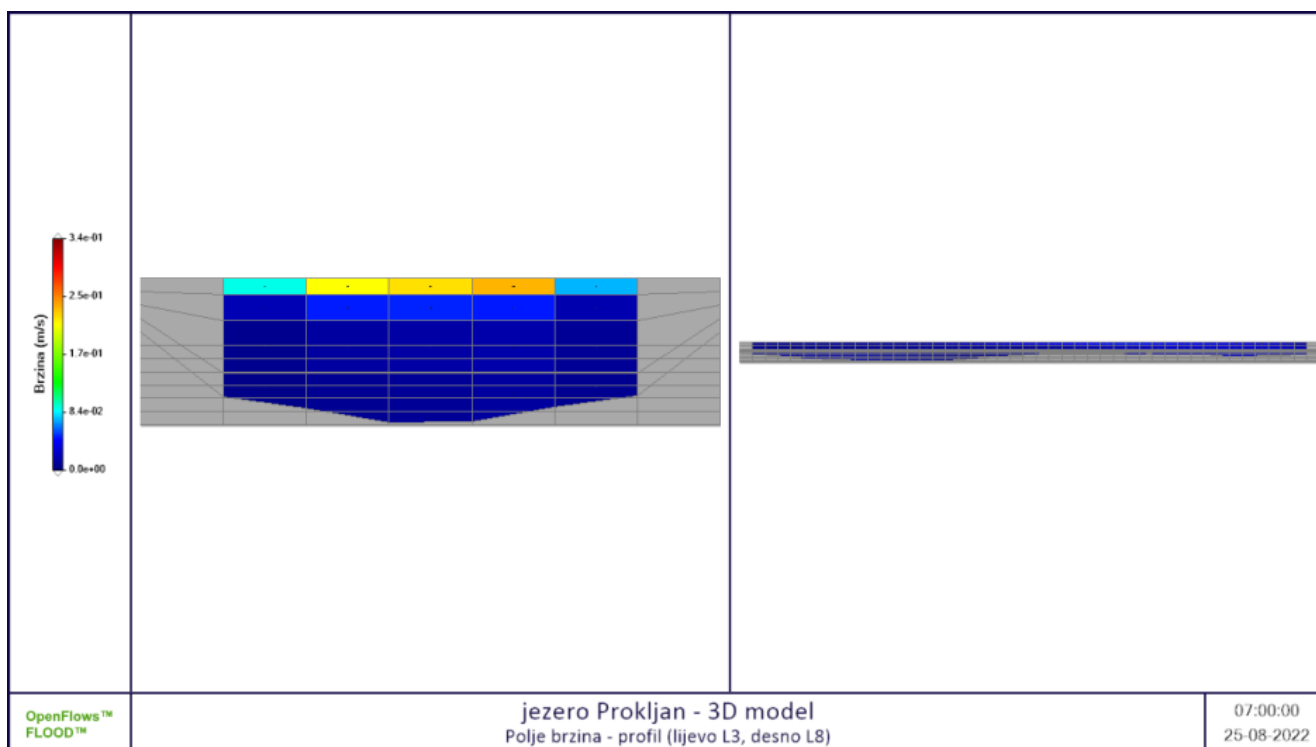
Slika 13. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



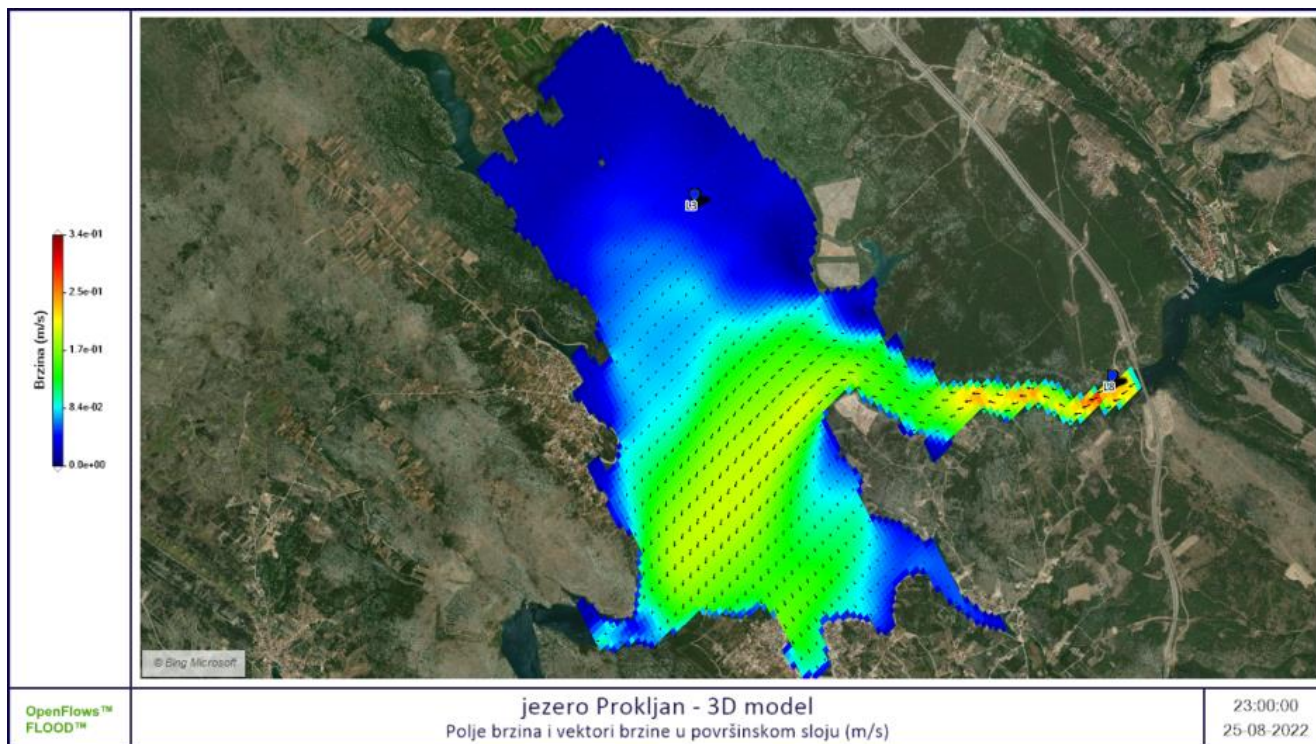
Slika 14. Polje brzina - profil – 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



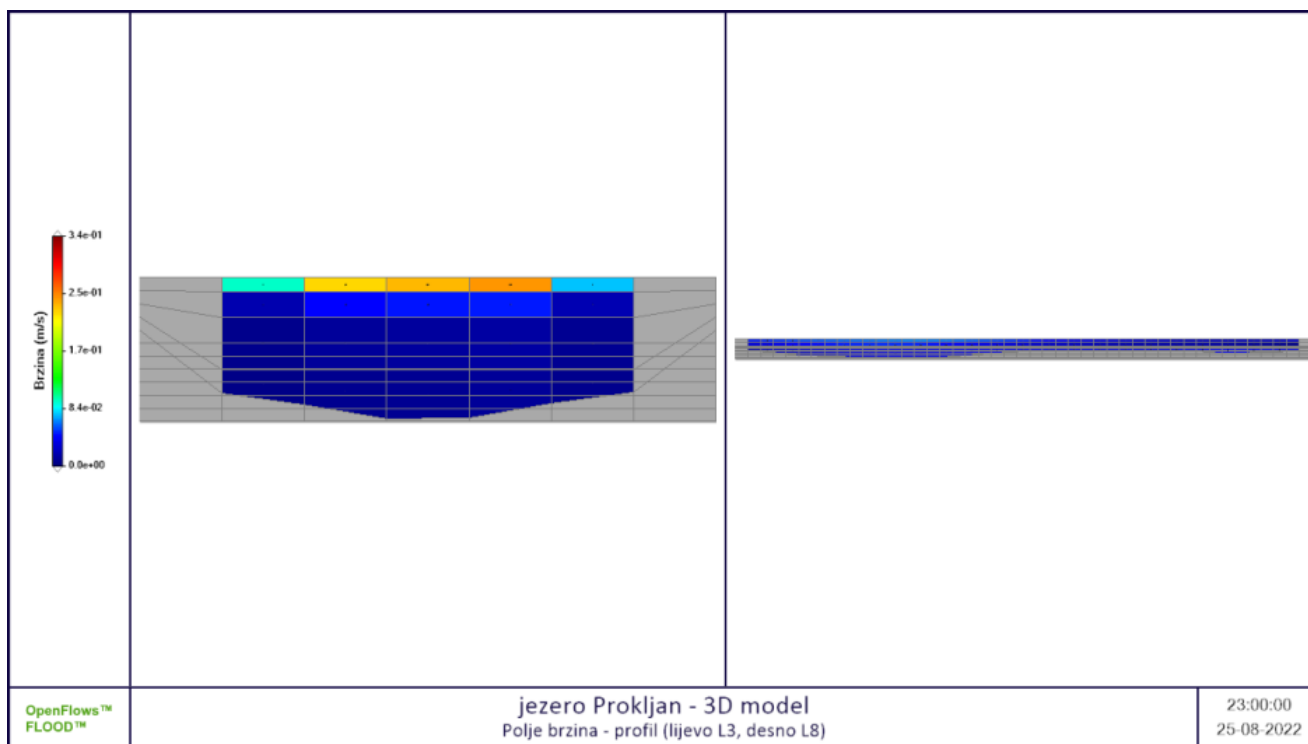
Slika 15. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



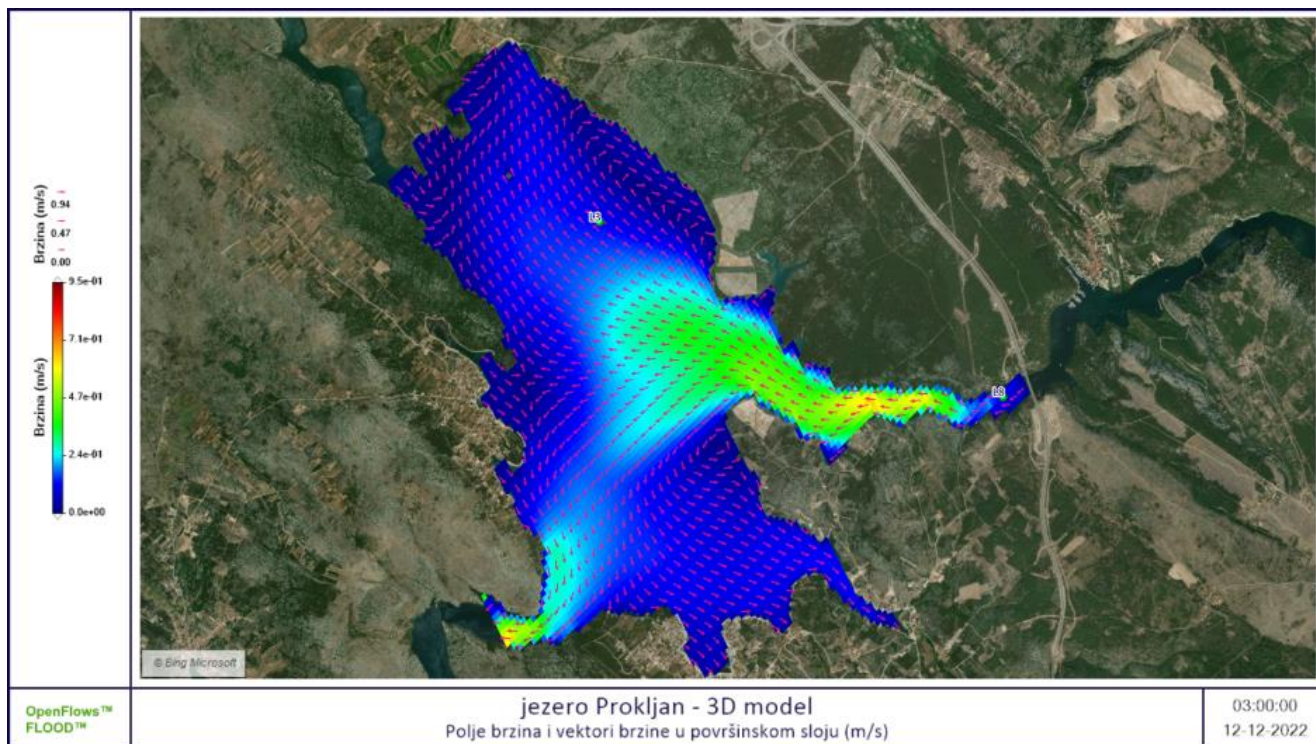
Slika 16. Polje brzina - profil – 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



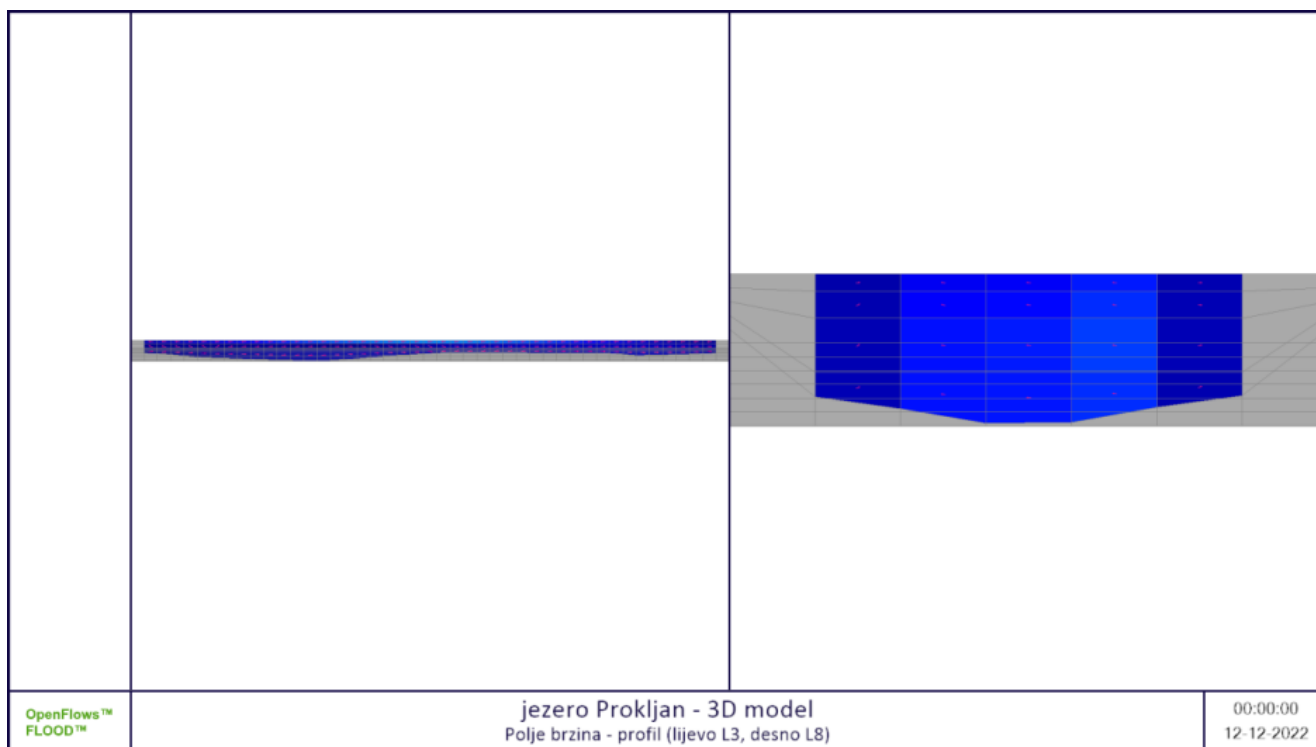
Slika 17. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



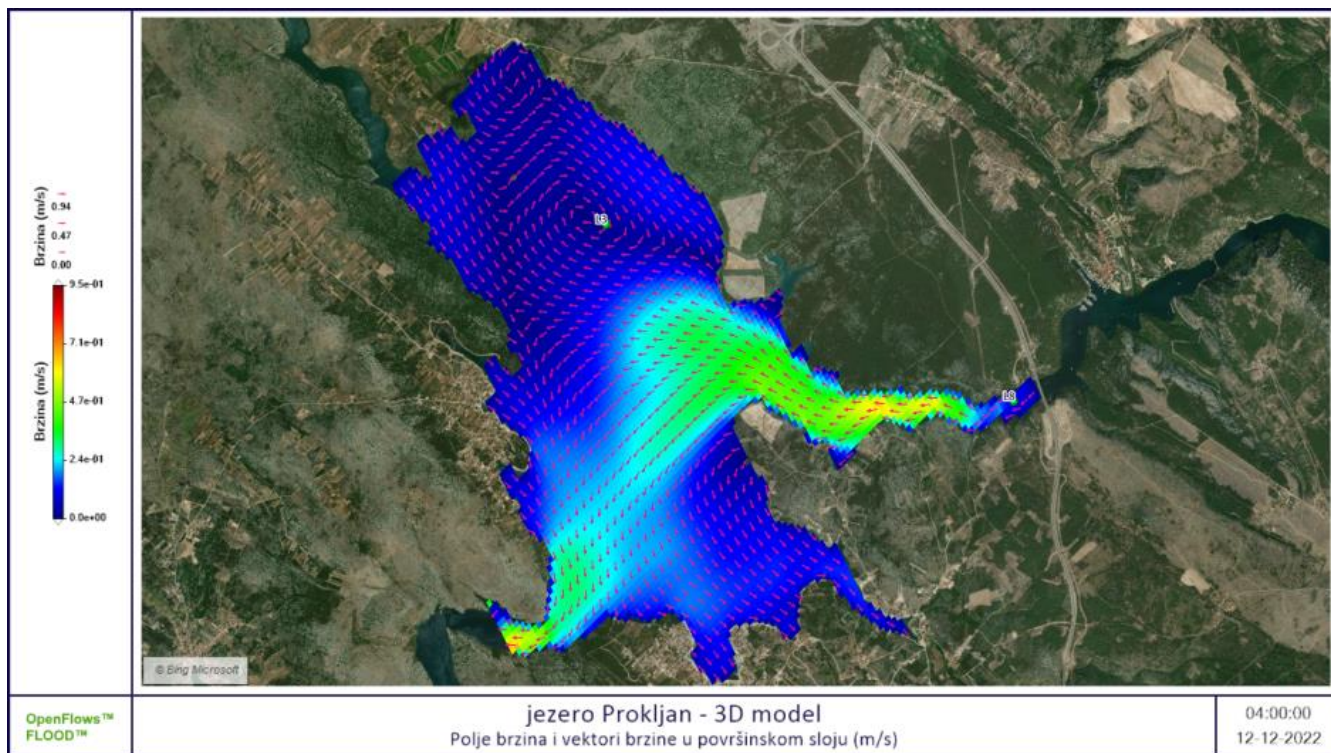
Slika 18. Polje brzina - profil – kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



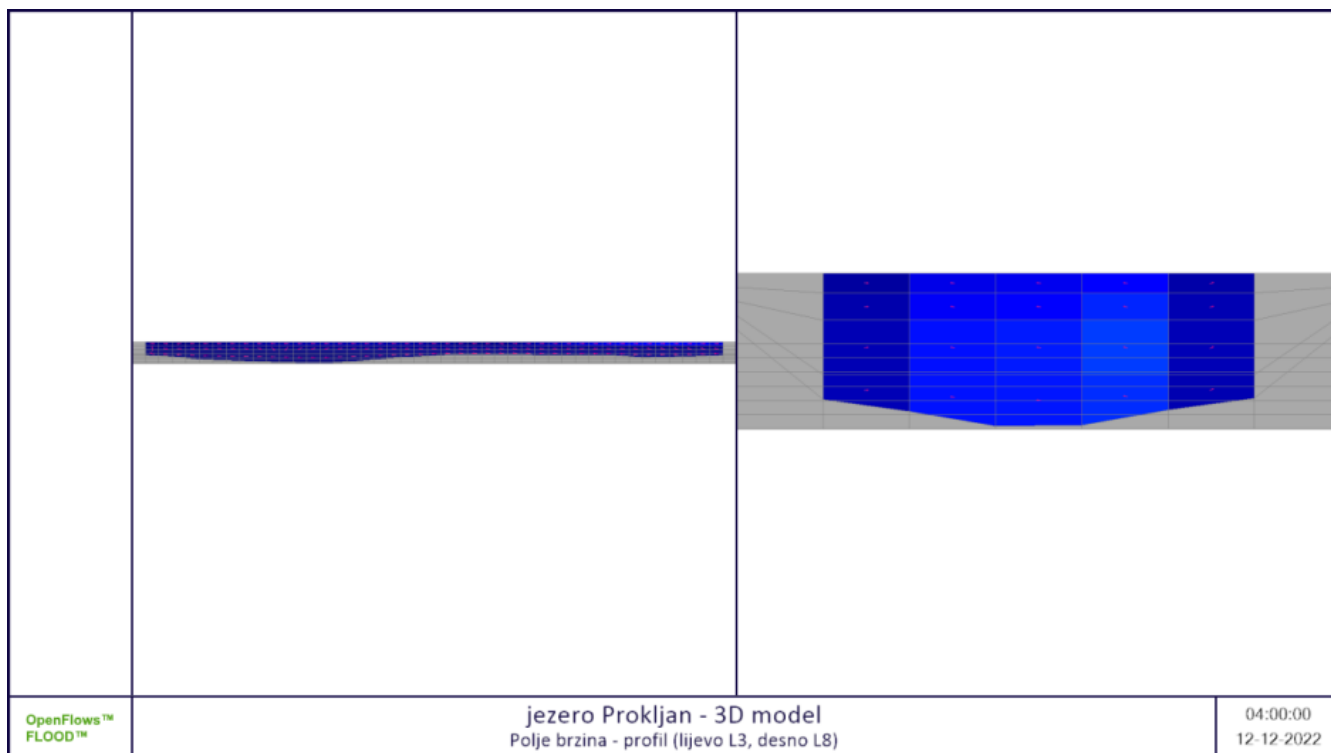
Slika 19. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine



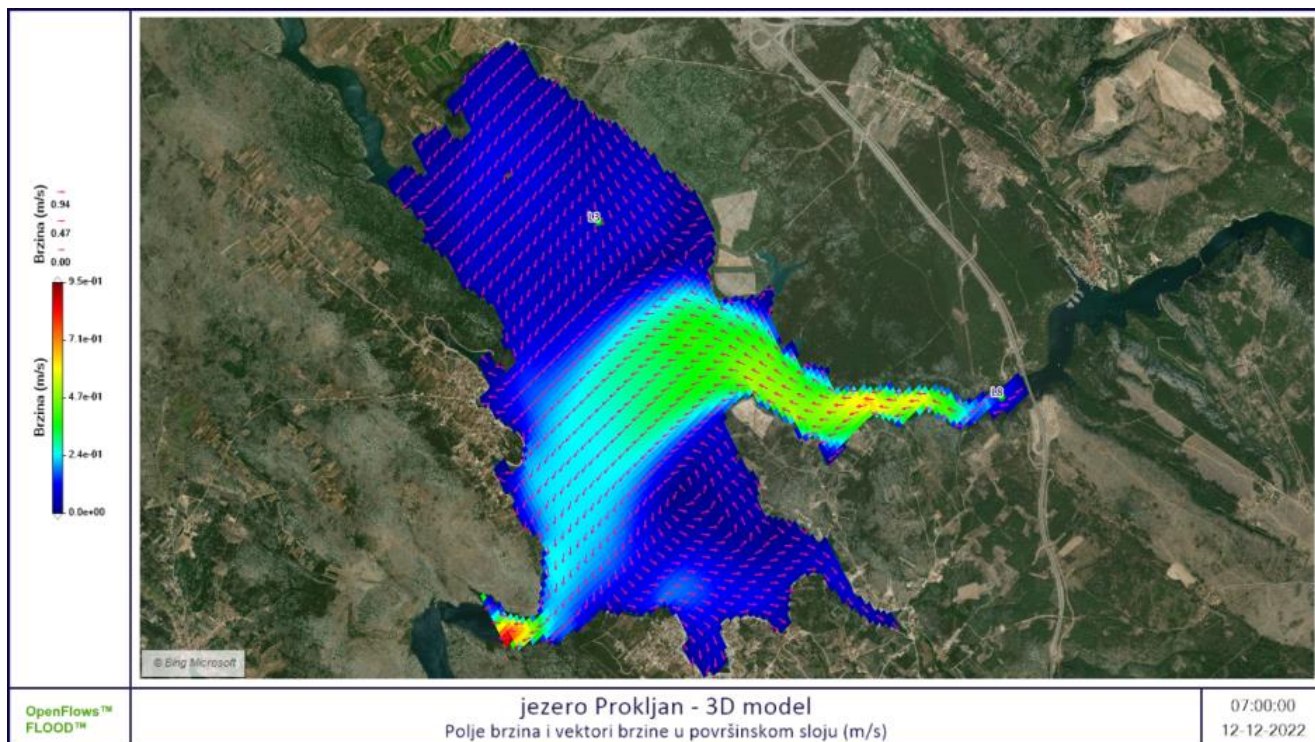
Slika 20. Polje brzina - profil – početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine



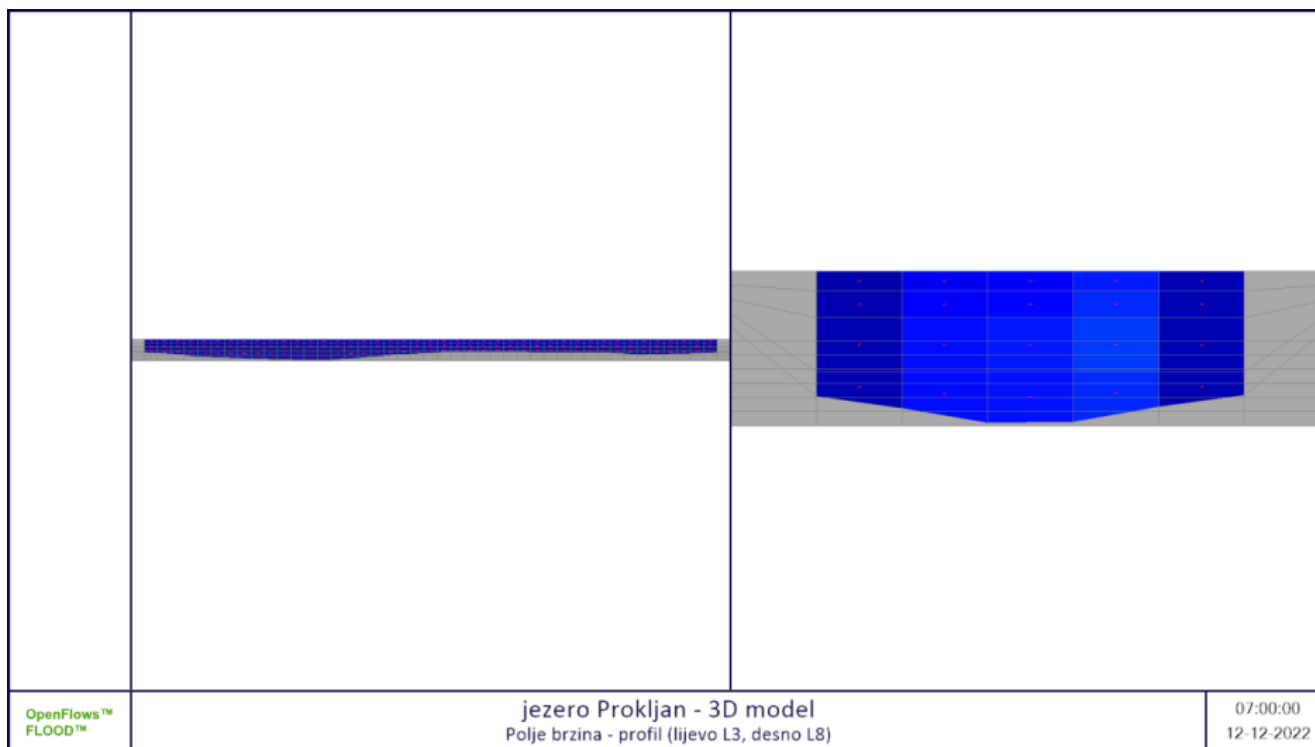
Slika 21. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije na lokaciji L3, 12. prosinca 2022. godine



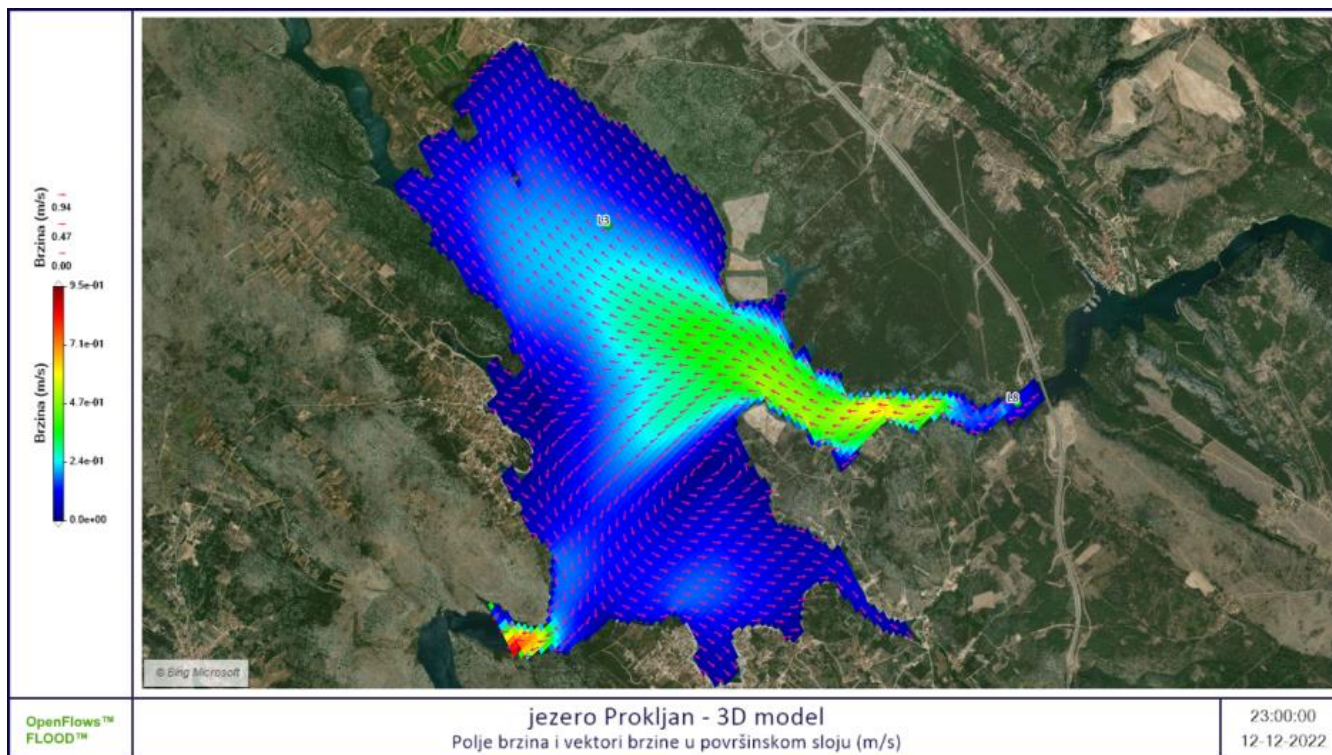
Slika 22. Polje brzina - profil - 4h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine



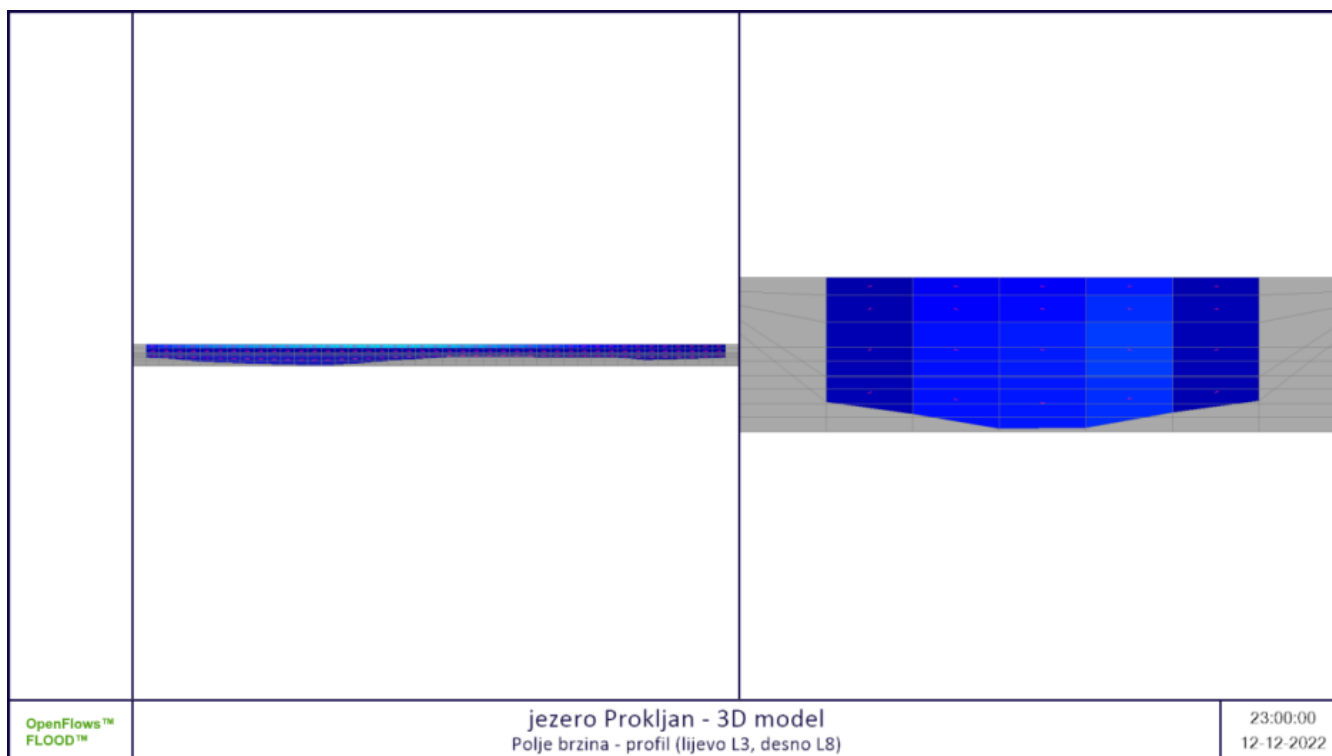
Slika 23. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine



Slika 24. Polje brzina - profil - 7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine

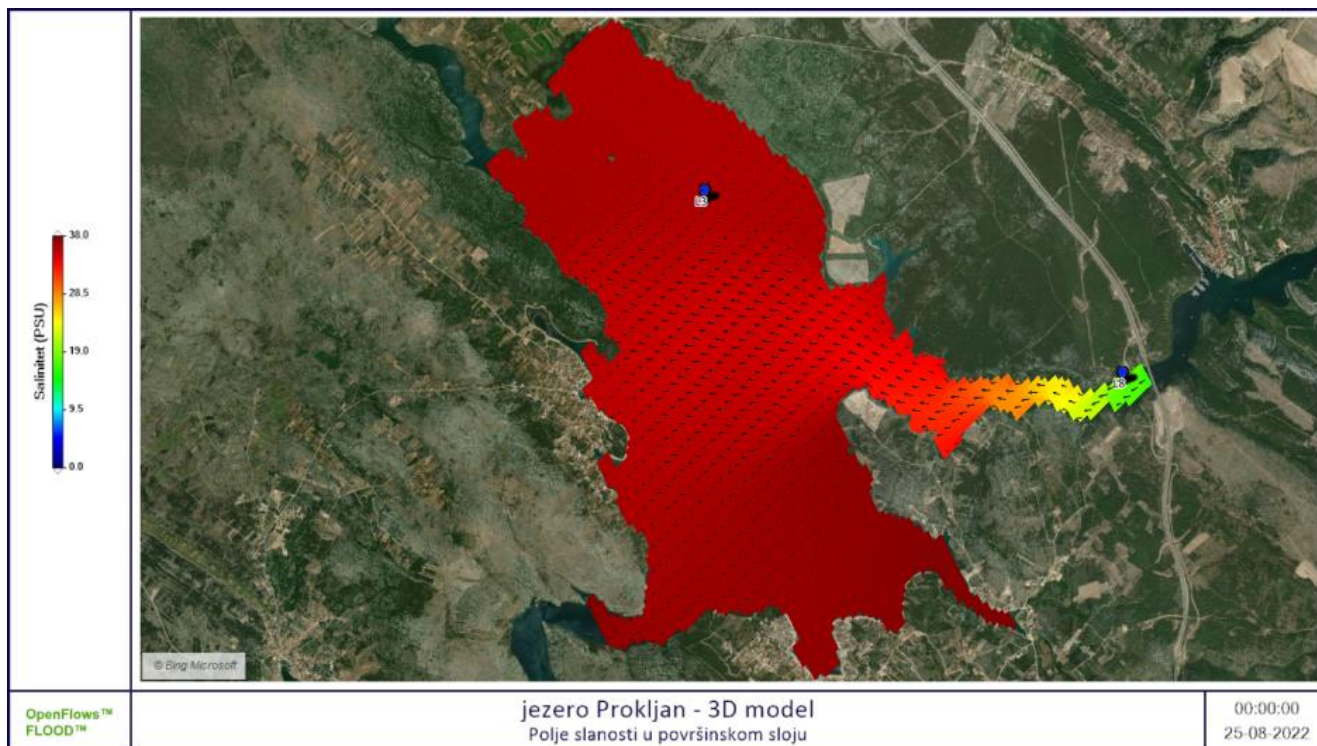


Slika 25. Polje brzina i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije - 12. prosinca 2022. godine

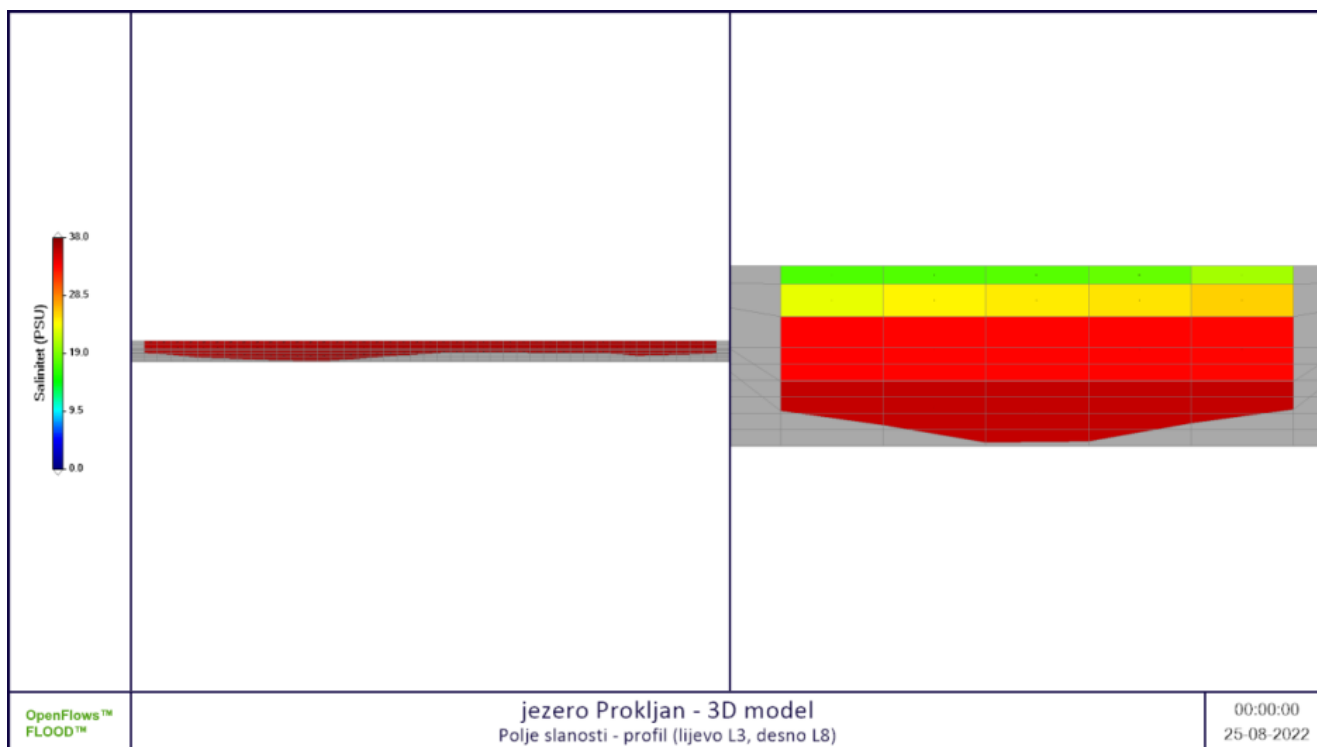


Slika 26. Polje brzina – profil – kraj simulacije, 12.prosinca 2022. godine

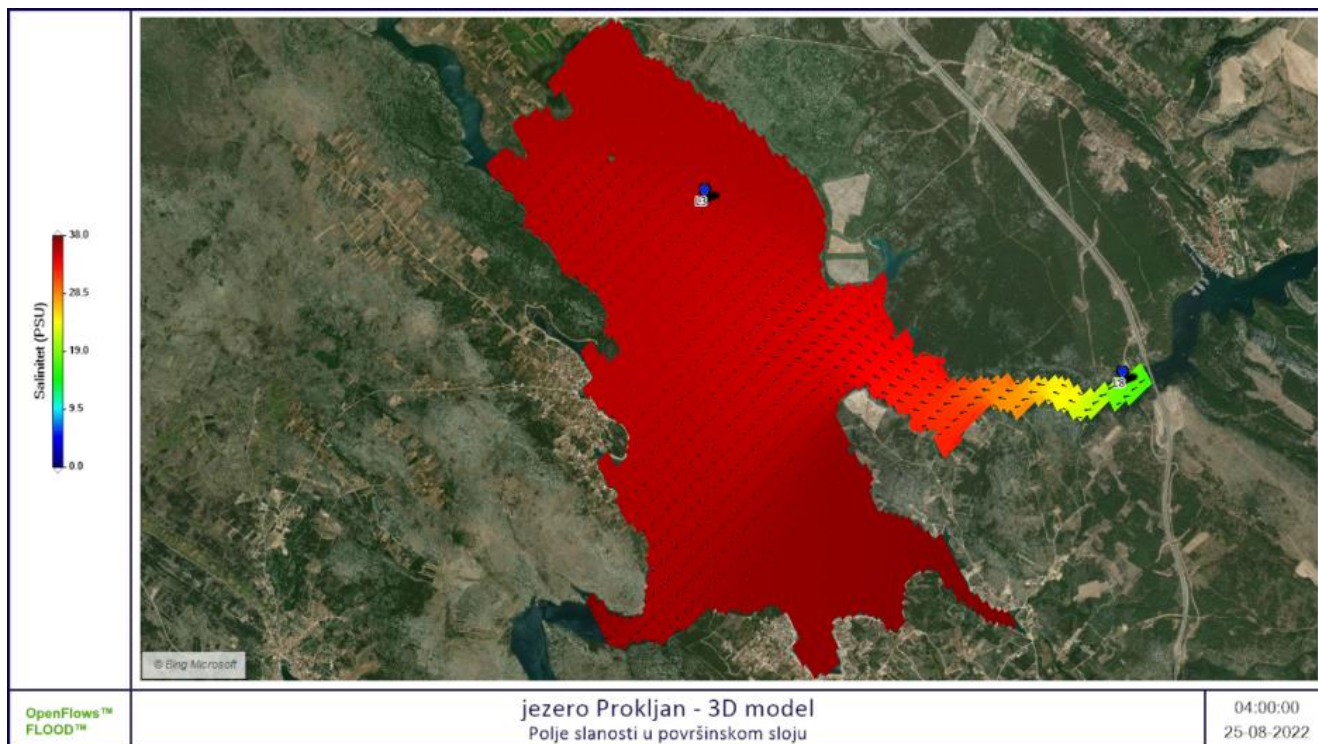
4.3.2 Polje slanosti



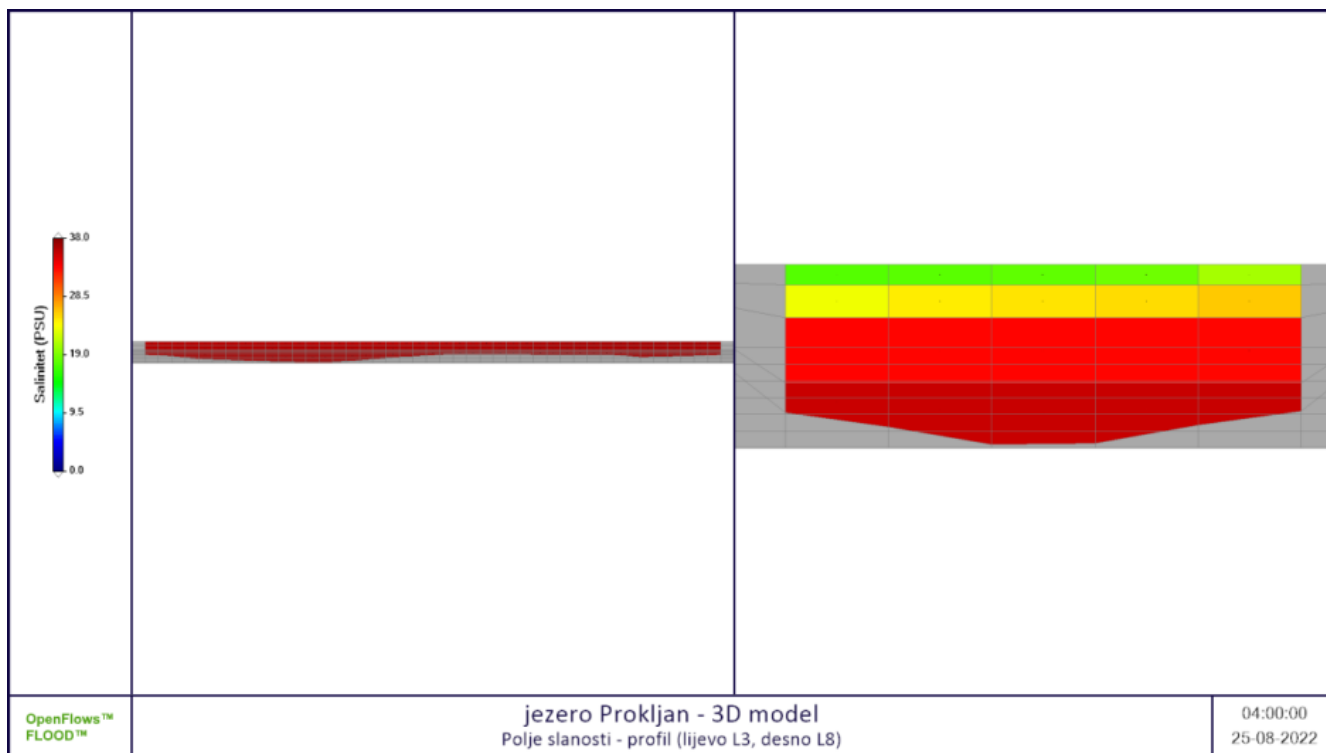
Slika 27. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



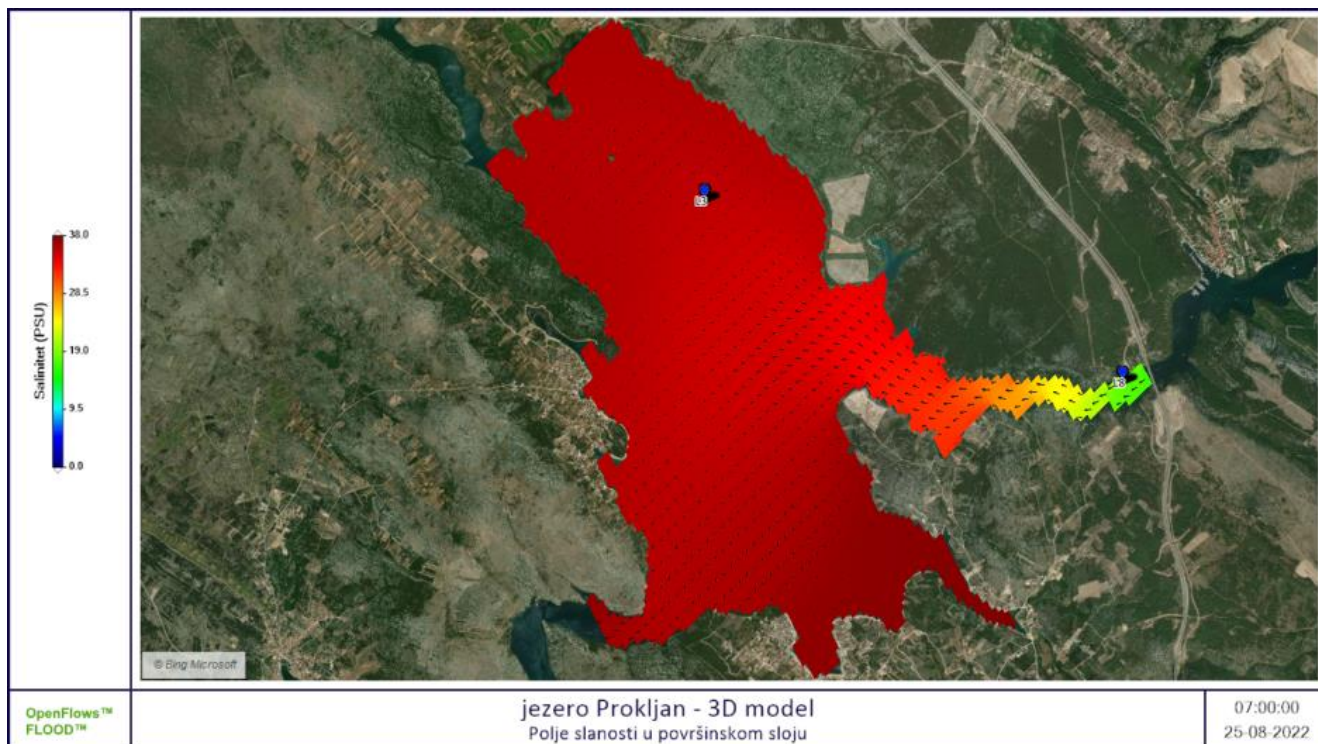
Slika 28. Polje slanosti – profil – početak simulacije. 25. kolovoza 2022. godine



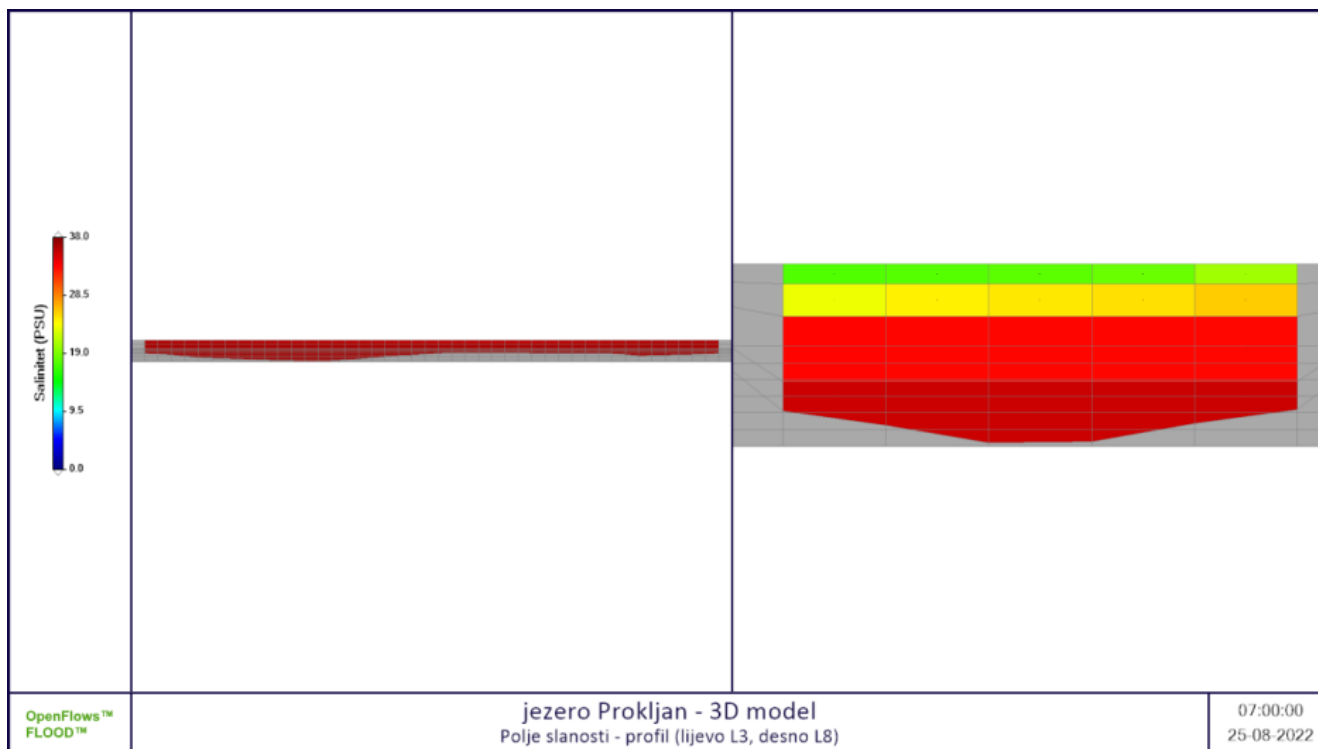
Slika 29. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine



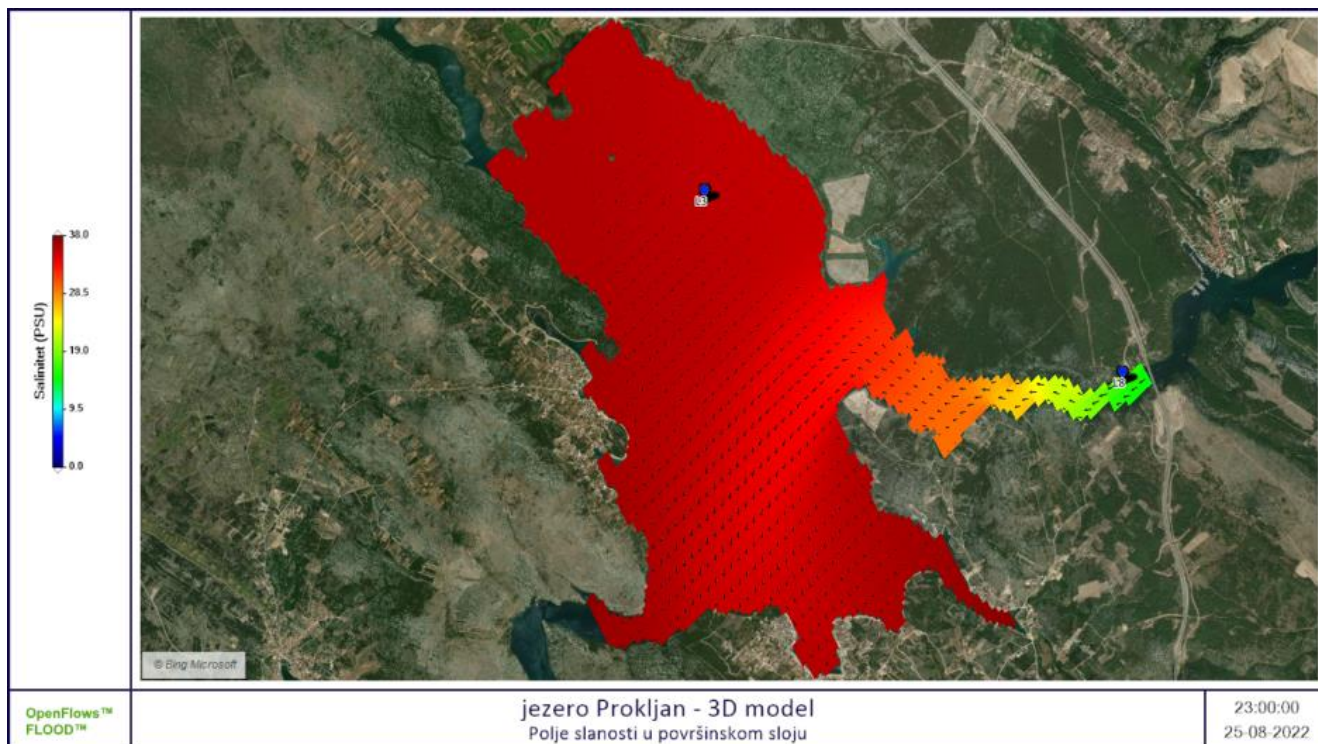
Slika 30. Polje slanosti – profil – 4h nakon početka simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine



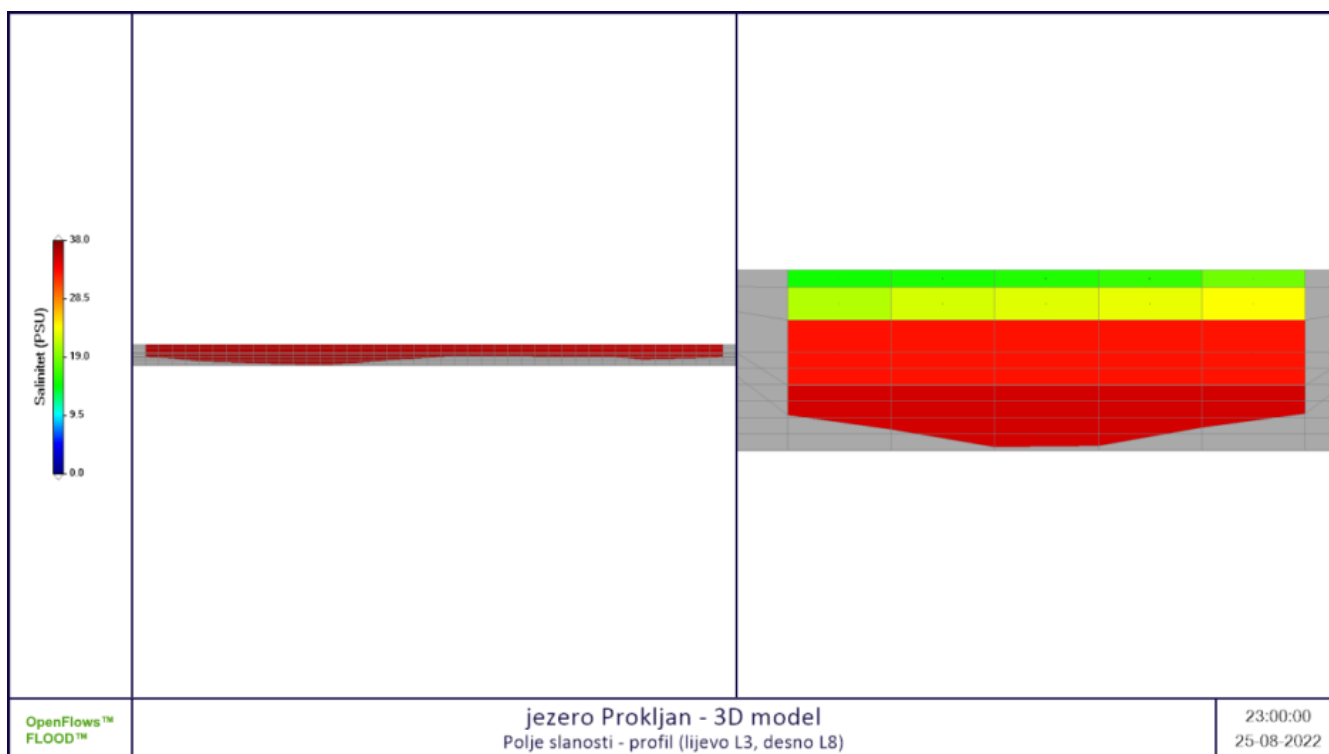
Slika 31. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



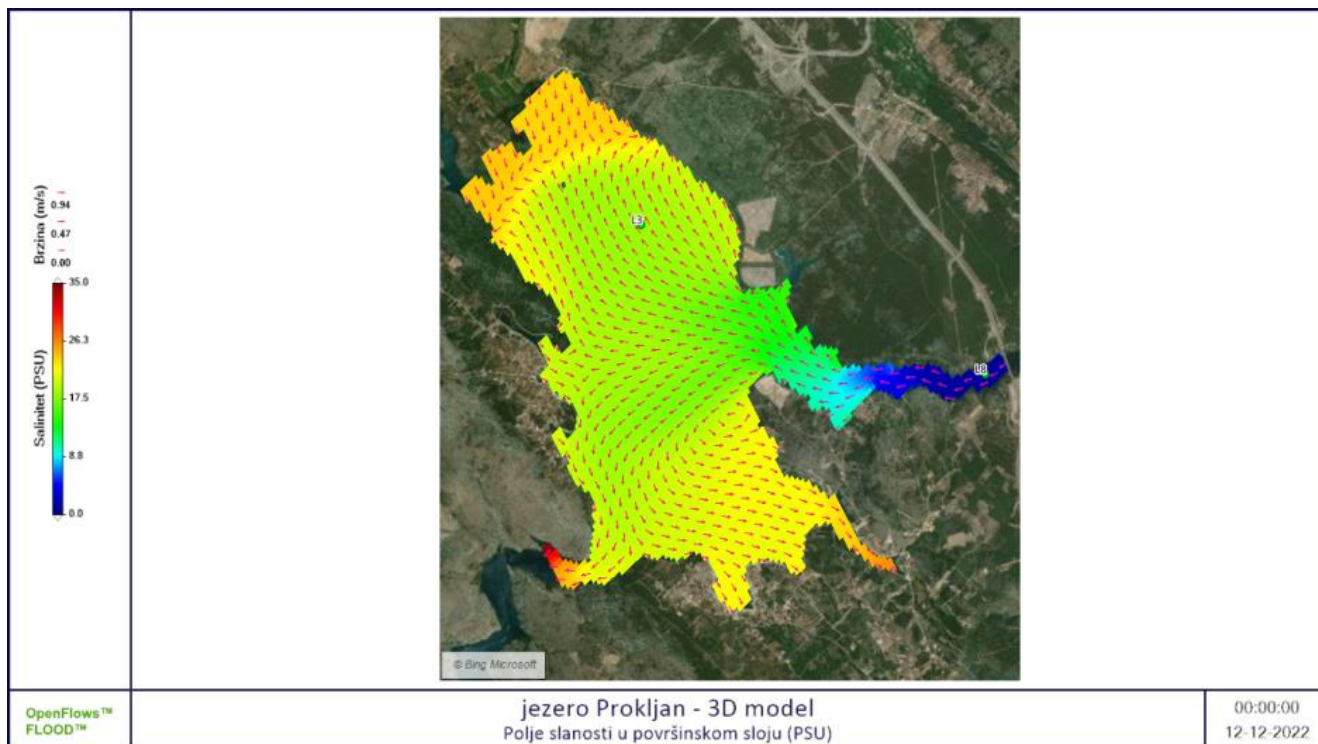
Slika 32. Polje slanosti – profil – 7h nakon početka simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



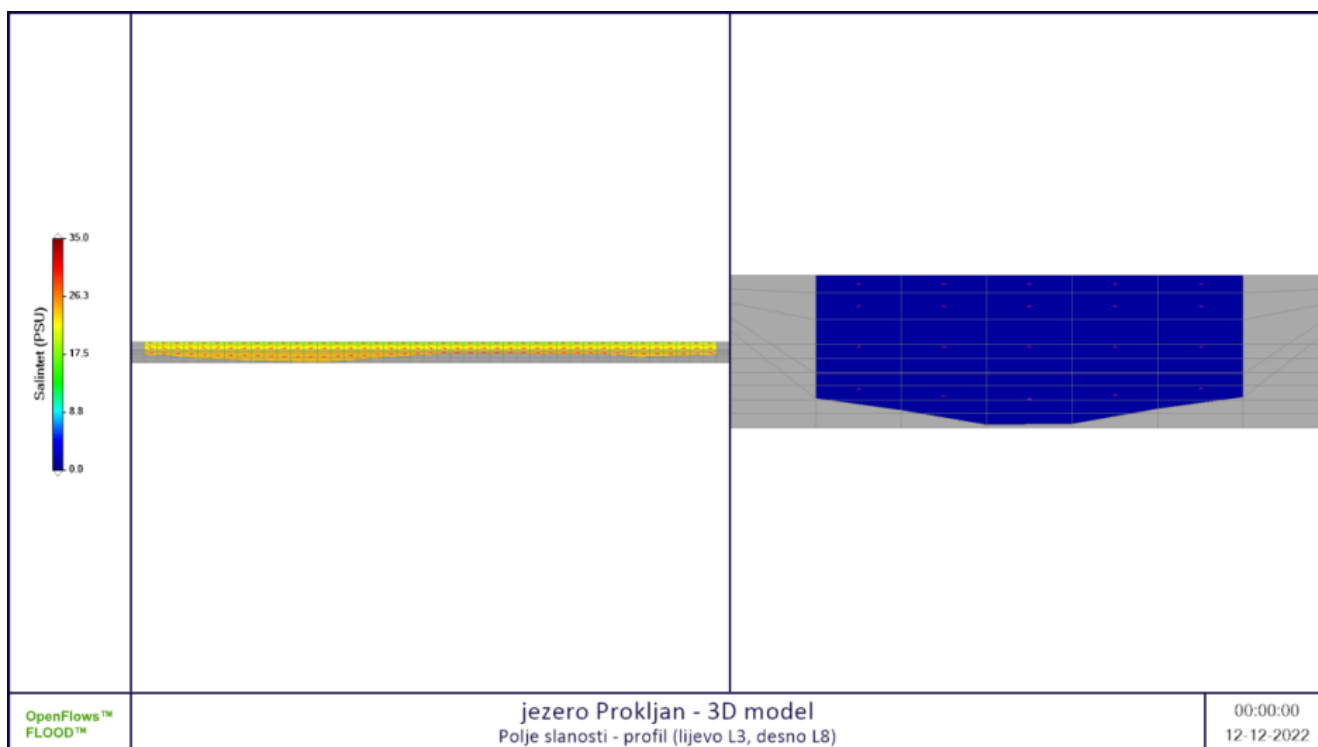
Slika 33. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 25. kolovoza 2022. godine



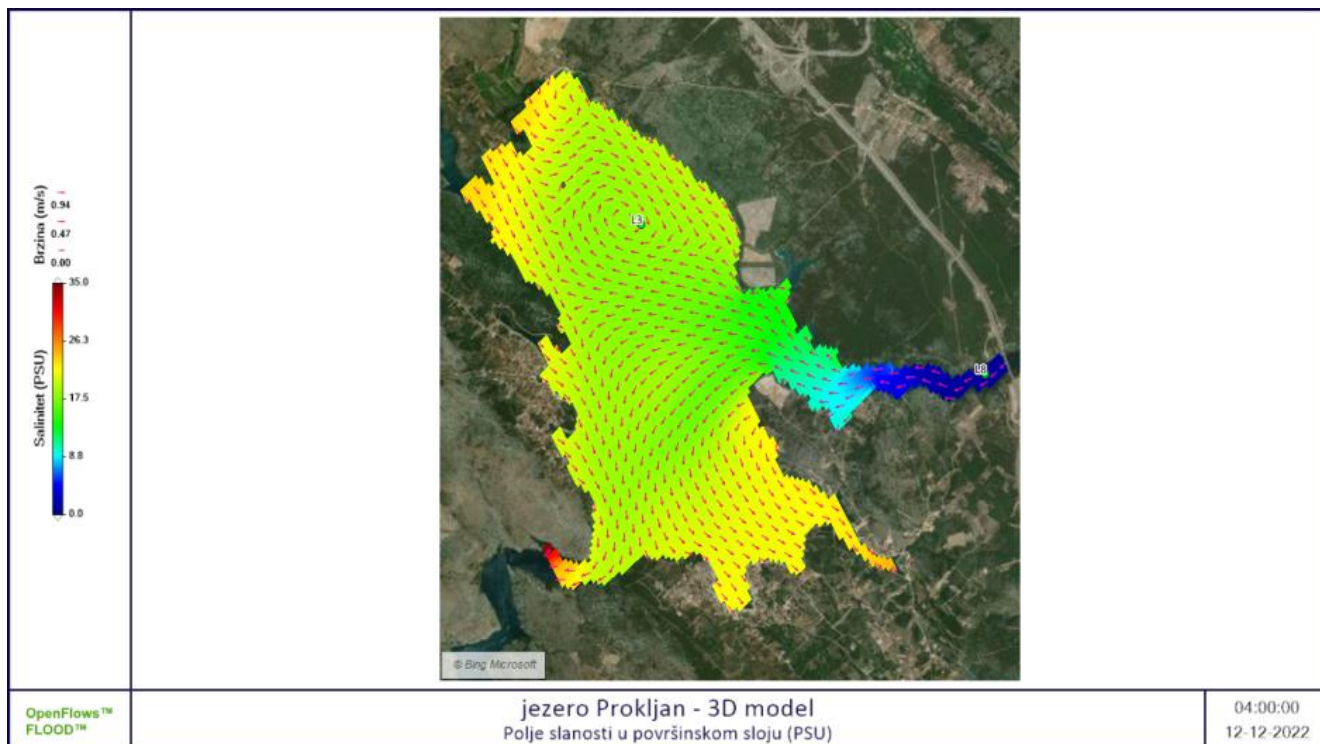
Slika 34. Polje slanosti – profil – kraj simulacije, 25. kolovoza. 2022. godine



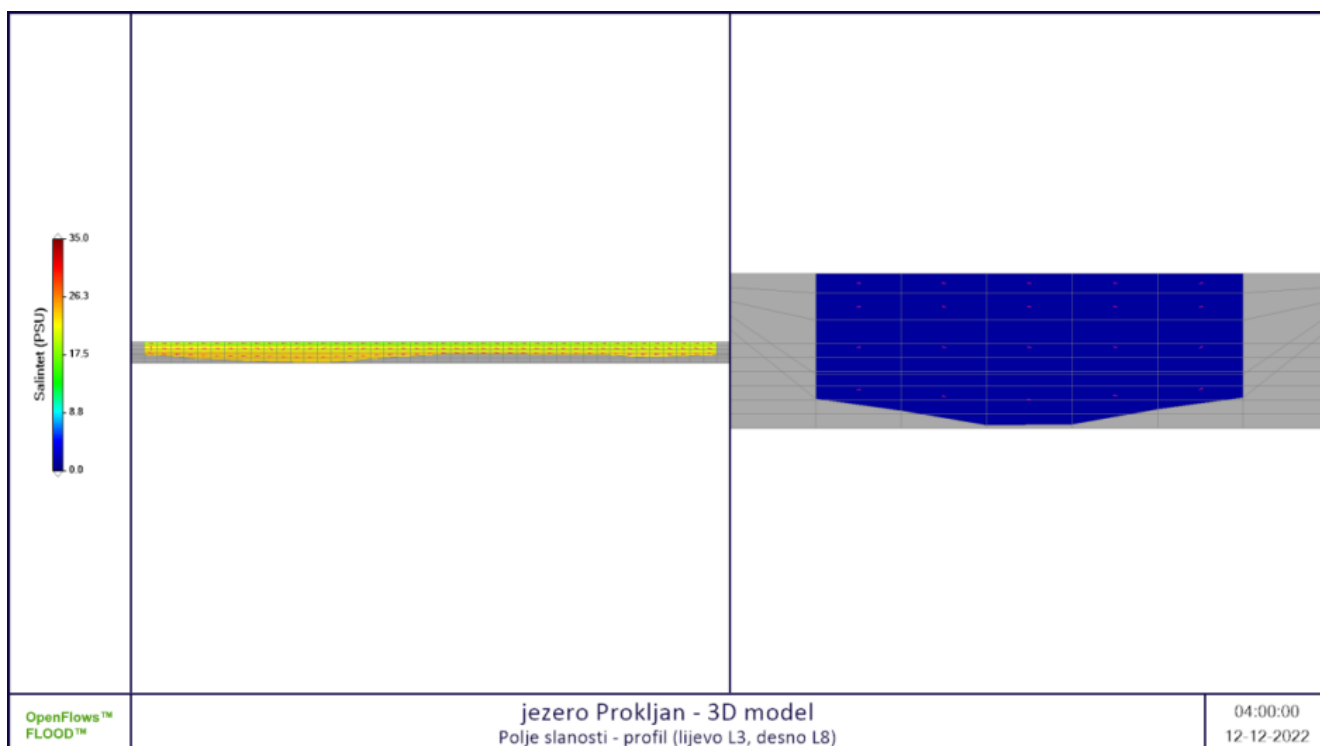
Slika 35. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - početak simulacije - 12. prosinca 2022. godine



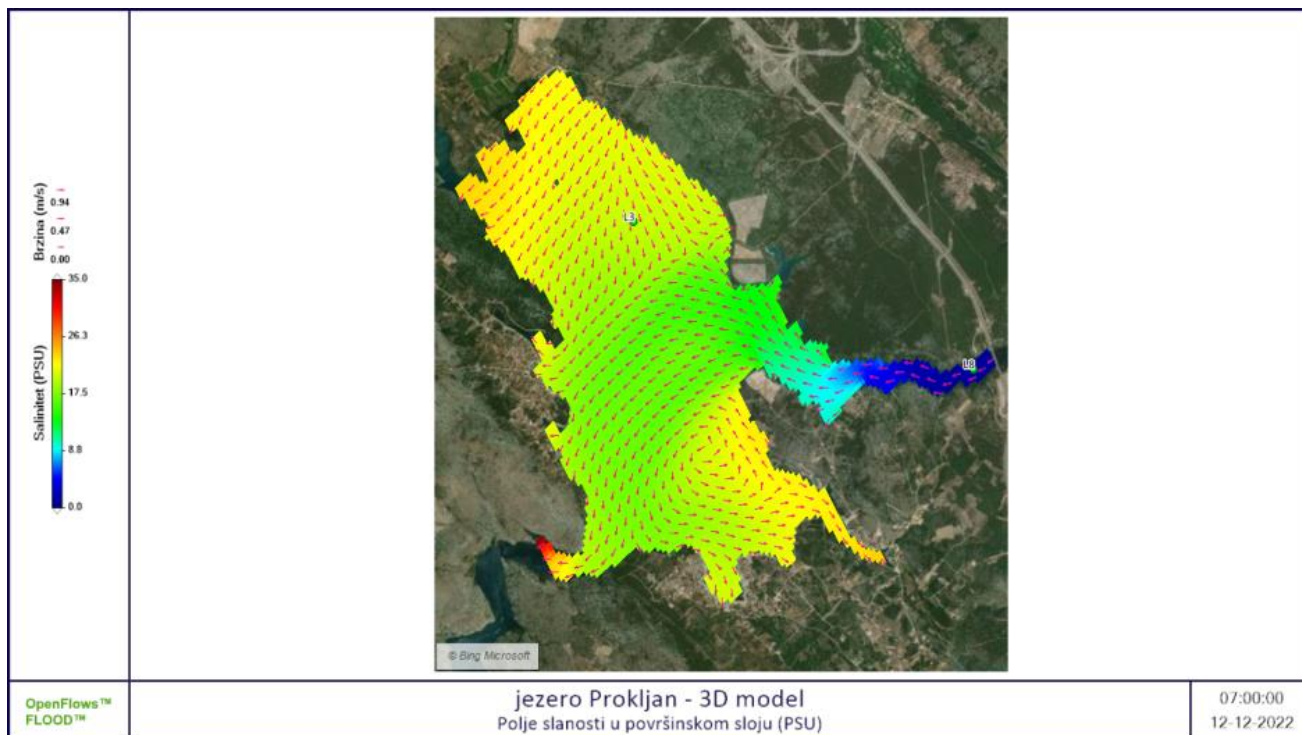
Slika 36. Polje slanosti – profil – početak simulacije, 12. prosinca 2022. godine



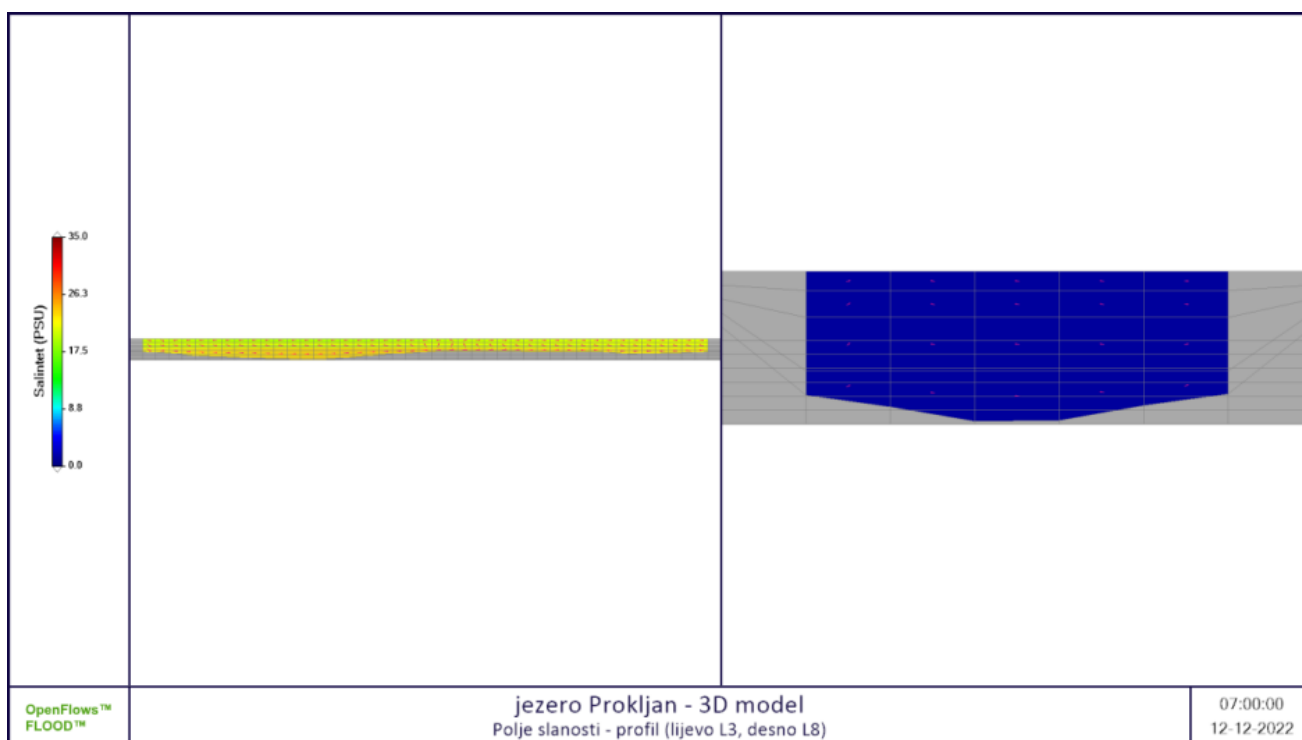
Slika 37. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - 4h nakon početka simulacije - 12. prosinca 2022. godine



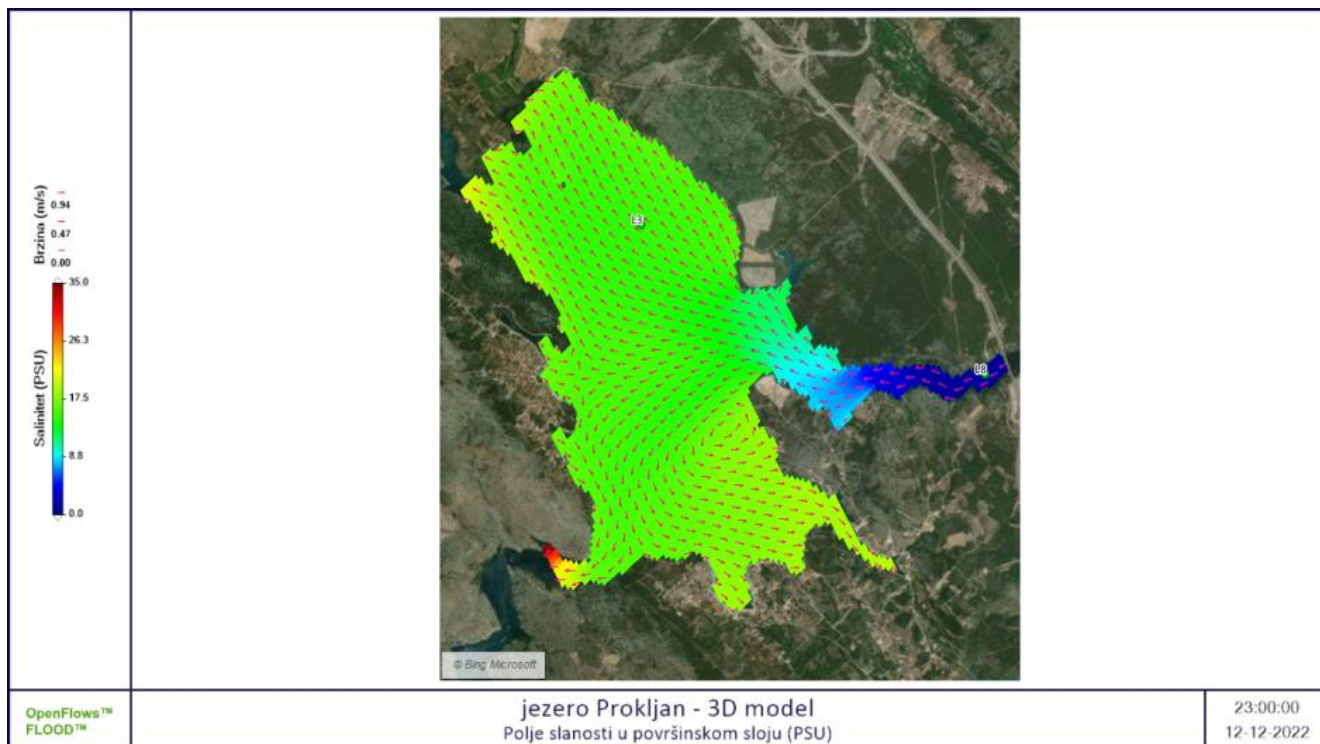
Slika 38. Polje slanosti – profil – 4h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022.godine



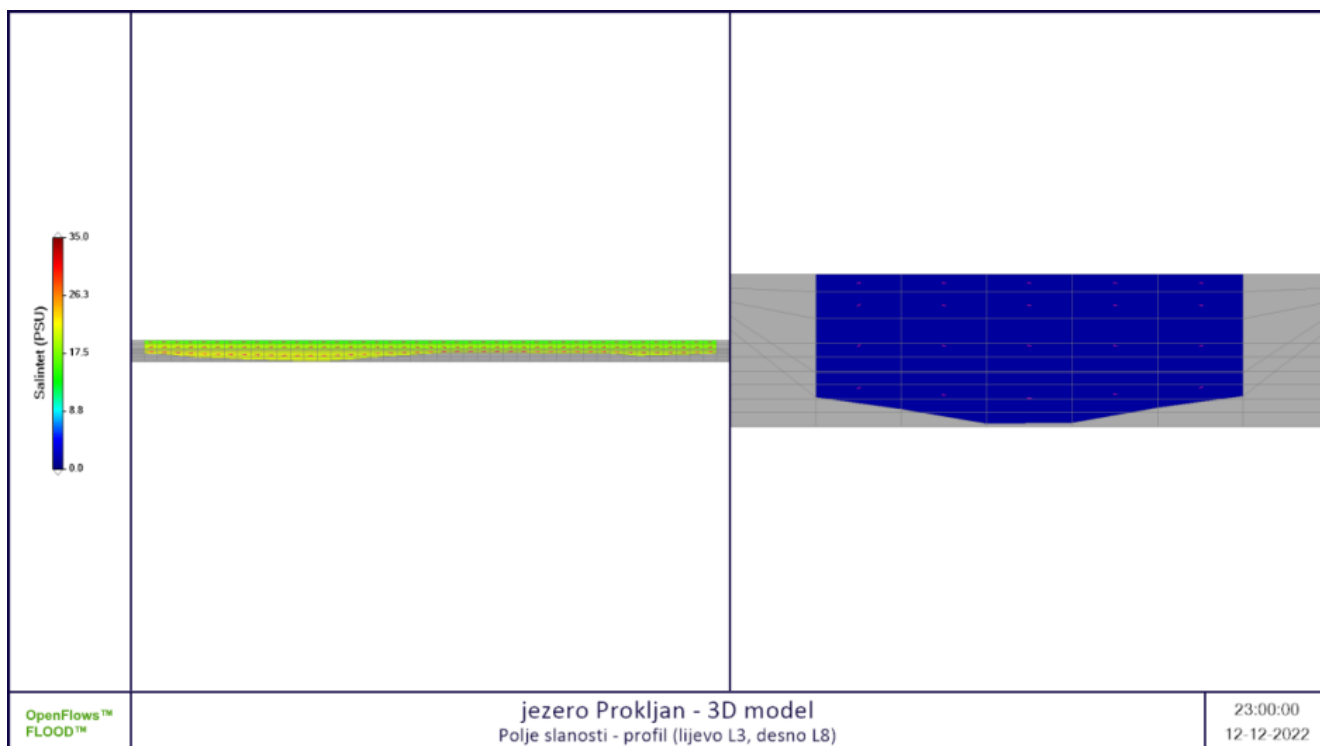
Slika 39. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju -7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022. godine



Slika 40. Polje slanosti – profil –7h nakon početka simulacije, 12. prosinca 2022.godine



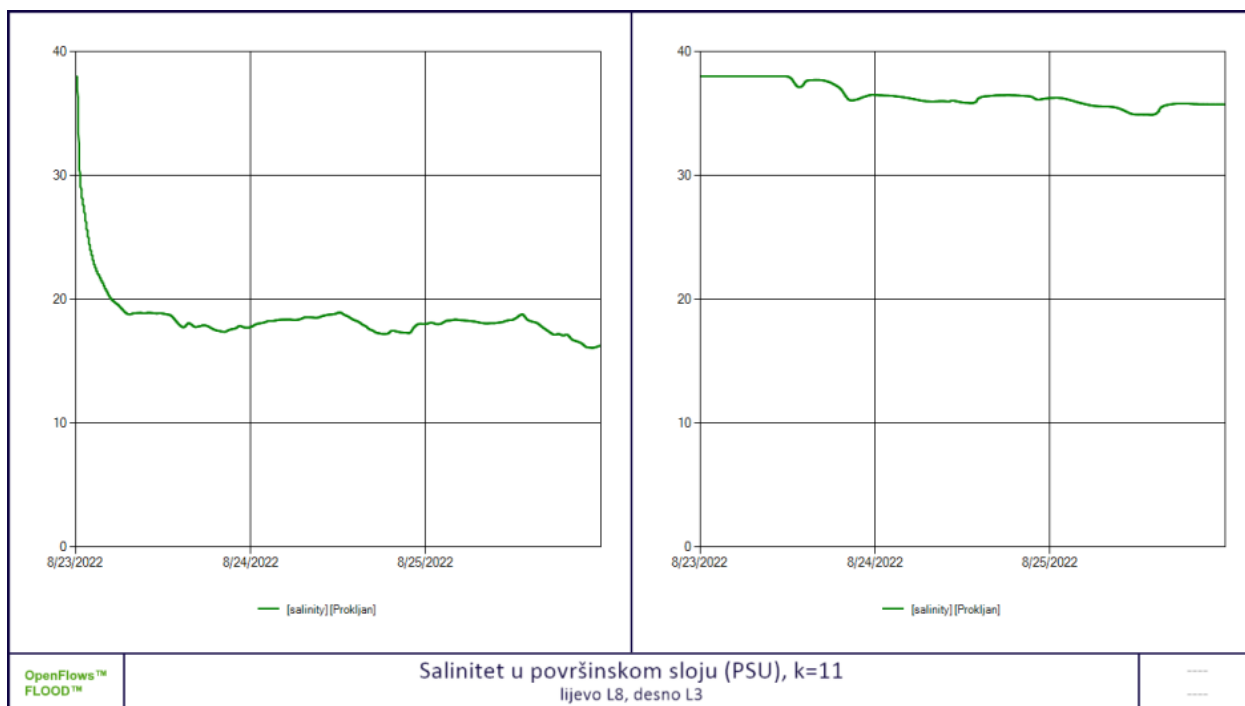
Slika 41. Polje slanosti i vektori brzine u površinskom sloju - kraj simulacije, 12. prosinca 2022. godine



Slika 42. Polje slanosti – profil – kraj simulacije, 12. prosinca 2022. godine

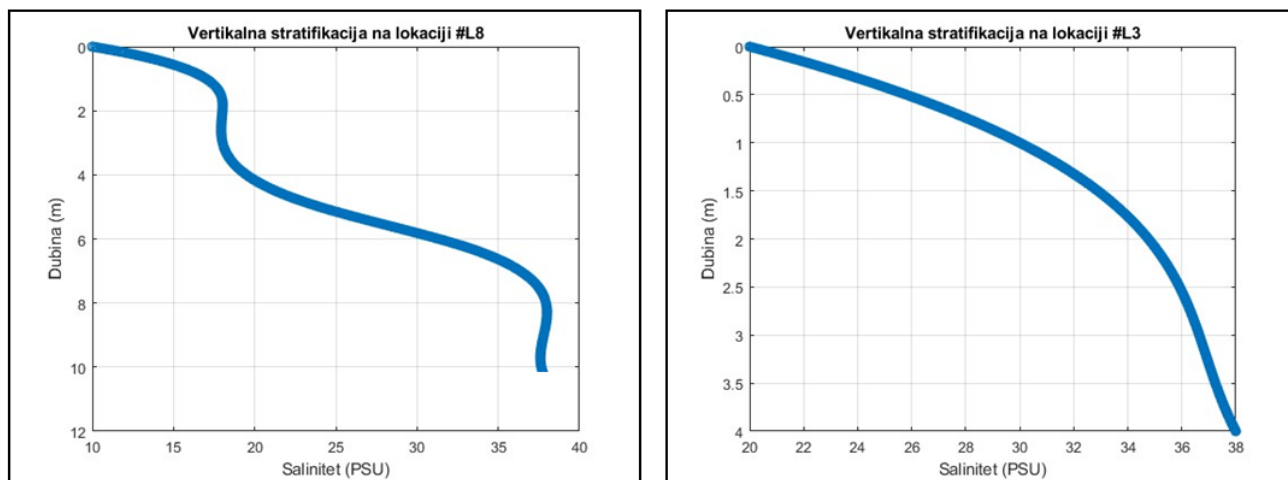
4.3.3 Usporedba rezultata mjerenja, analize i numeričkog modela

Razlike u rezultatima često su uzrokovane različitim postavkama numeričkih modela, kao što je npr. dimenzija ćelija u modelu. Preciznost obrade podataka i terenska mjerenja mogu pružiti informacije potrebne za usporedbu i kalibraciju numeričkog u ovom slučaju, model raspodjele slanosti u estuarijima. Analizirajući rezultate terenskih mjerenja u odnosu na rezultate dobivene iz numeričkog modela za određenu točku, možemo zaključiti da model, iako nije precizan u svim aspektima, pruža detaljniji prikaz promatranog područja i fleksibilnost u kreiranju različitih scenarija. Unapređenjem ovog modela možemo težiti boljoj preciznosti i pouzdanosti, čime bi se model mogao koristiti kao alternativa stvarnim terenskim mjerenjima. Model predstavljen u ovom kontekstu otvara vrata daljnjim istraživanjima i može poslužiti kao temelj za razvoj sofisticiranijih modela koji kvantitativno prate fenomene u estuarijima.

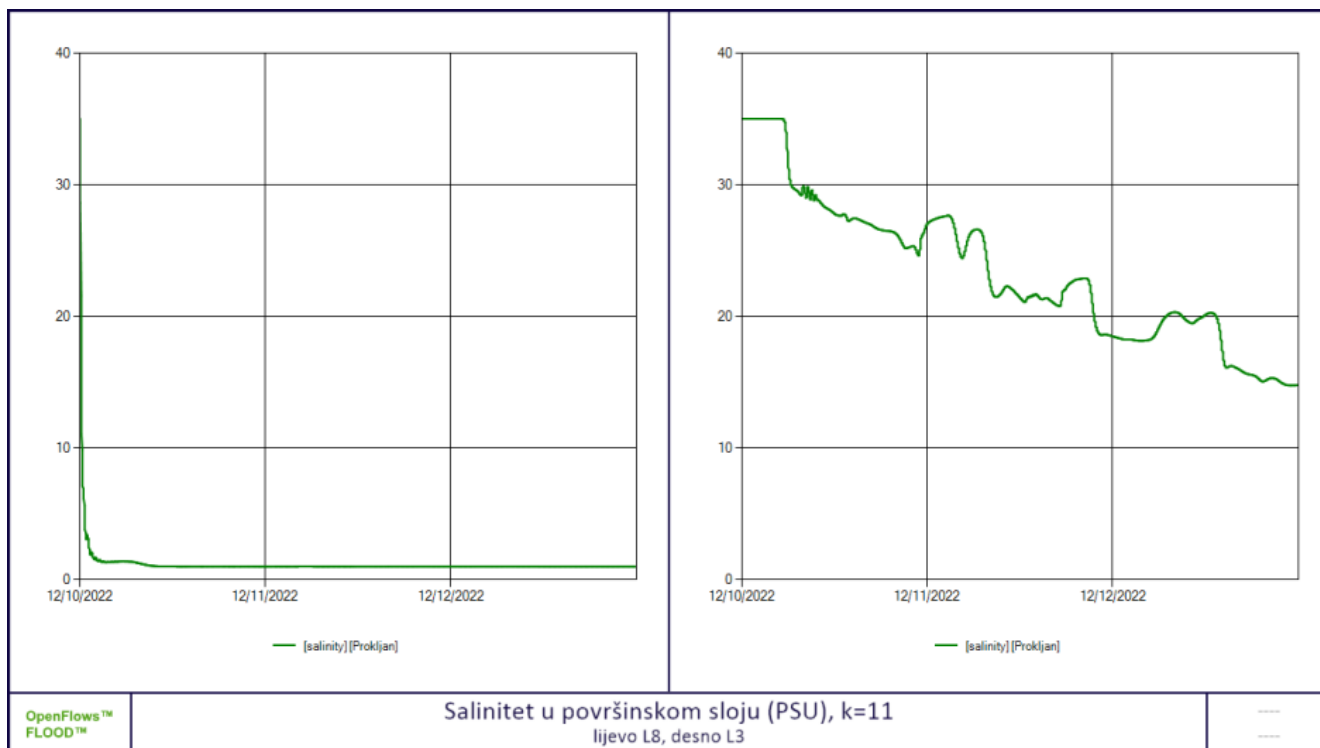


Grafikon 18. Salinitet u površinskom sloju, numerički model k=11, 25. kolovoz 2022. godine

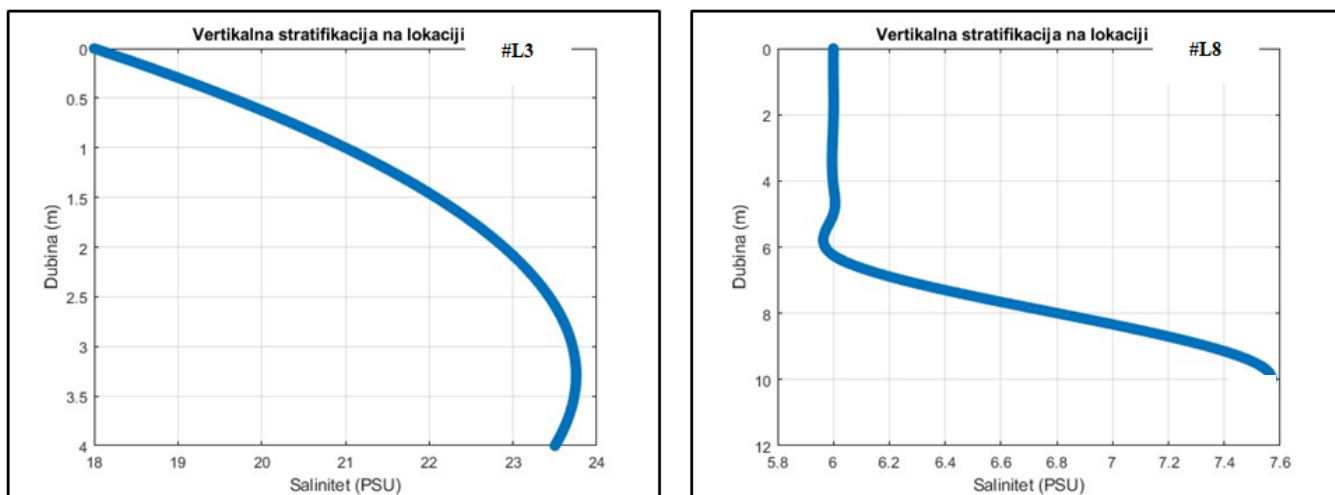
Na grafikonu 21. rezultata numeričkog modela vidljiva je izražena promjena na samom početku, koja se interpretira kao period uhadavanja modela.



Grafikon 19. Vertikalna stratifikacija u interesnim lokacijama, 25. kolovoza 2022. godine



Grafikon 20. Salinitet u površinskom sloju, k=11, 12. prosinca 2022. godine



Grafikon 21. Vertikalna stratifikacija u interesnim lokacijama, 12. prosinca 2022. godine

Iz priloženog se može tumačiti odstupanje rezultata modela od stvarnih izmjerenih vrijednosti.

Jedan od mogućih razloga odstupanja numeričkog modela od terenskih mjerenja može biti razlika u trenju između sedimenta i vode, koja utječe na dinamiku strujanja. Turbulencija i viskoznost vode također igraju značajnu ulogu u odstupanju modela, pa je potrebno pažljivo kalibrirati model kako bi se postigla veća točnost. Da bi se model bolje uskladio s terenskim mjerenjima, preporučuje se prilagodba parametra rugoznosti, čime se omogućava bolje "klizanje" vode kroz model. Kalibracija modela prema izmjerenim vrijednostima od ključne je važnosti za minimiziranje odstupanja, posebno u uvjetima gdje trenje i viskoznost imaju veliki utjecaj. Razlike u interpretaciji rugoznosti terena mogu dovesti do odstupanja u modeliranju strujanja vode, što ukazuje na potrebu za preciznijim definiranjem ovog parametra.

Razmatrajući terenske podatke, nužno je prilagoditi numerički model kako bi se smanjile razlike, posebno u pogledu faktora kao što su trenje sedimenta, turbulencija i viskoznost vode.

5 ZAKLJUČAK I BUDUĆE SMJERNICE

U ovom diplomskom radu opisane su metode provedenih mjerenja te je na temelju dostupnih izmjerenih podataka s terenskih kampanja, službene stranice DHMZ-a i ostalih online izvora provedena sveobuhvatna statistička analiza. Analitički pristup omogućio je detaljnu analizu vremenskih serija, što je rezultiralo predloženim indeksom koji nudi inovativni pogled na analizirane podatke. Ovaj indeks UBV, osim što pruža dublji uvid u specifične karakteristike transekta saliniteta, ima potencijal primjene i na cijelom području kroz numerički model Prokljanskog jezera.

Analiza raspodjele saliniteta u Prokljanskom jezeru provedena je korištenjem 3D hidrodinamičkog modela koji je omogućio detaljnu procjenu polja brzina i saliniteta. Kroz različite simulacije, jasno je prikazana dinamika promjena u različitim vremenskim intervalima. Međutim, usporedbom rezultata numeričkog modela s terenskim mjerenjima, primijećena su određena odstupanja. Potrebno je napomenuti da je analiza na razini cijelog jezera izvan opsega ovog diplomskog rada, ali predstavlja intrigantnu temu za buduća istraživanja. Kroz analize provedene u ovom radu, identificirane su specifične putanje koje mogu pridonijeti razvoju i optimizaciji budućih numeričkih modela.

Buduće smjernice:

1. Razvijanje i optimizacija numeričkog modela prema identificiranim putanjama i analiziranim podacima iz ovog rada.
2. Unaprijediti numerički model tako da bolje odgovara stvarnim terenskim mjerenjima, posebno uzimajući u obzir početne faze simulacije.
3. Ispitati druge faktore koji mogu utjecati na salinitet, poput sedimentacije i turbulencije i viskoznosti fluida.
4. Proširenje domene modela, s posebnim osvrtom na batimetriju jezera, kako bi se dobila detaljnija slika o njegovim karakteristikama.
5. Povećanje vremenskog okvira simulacija kako bi se bolje razumjele dugoročne dinamike jezera.
6. Istraživanje mogućnosti primjene predloženog indeksa na ostatak jezera Prokljan

6. LITERATURA

- [1] Mohid water for dummies [PDF skripta]
- [2] Inventarizacija, vrednovanje i planiranje obalnih područja Dalmacije - estuarij Krke (URL https://issuu.com/undphr/docs/krajobrazna_obalna_podrucja_dalmacije_krka/22)
- [3] MOHID Modelling System Description, *Online izvor*: (http://maretec.mohid.com/PortugueseEstuaries/Reports/MOHID_Description.pdf)
- [4] MOHID Modelling SystemDescription, [Online] Available: http://maretec.mohid.com/PortugueseEstuaries/Reports/MOHID_Description.pdf
- [5] V. Divić, M. Galešić, M. Di Dato, M. Tavra, R. Andričević, "Application of Open Source Electronics for Measurements of Surface Water Properties in an Estuary: A Case Study of River Jadro, Croatia,"2020.
- [6] MOHID water, *Online izvor* (URLhttp://www.mohid.com/pages/models/mohidwater/mohid_water_home.shtml)
- [7] Numeričko modeliranje pronosa konzervativnog zagađenja u ušću rijeke Jadro korištenjem programskog paketa MOHID;(<https://repozitorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A1674>)
- [8] Practice Workbook- Urban Flood Simulation – OpenFlows FLOOD-learning resource (https://communities.bentley.com/products/hydraulics___hydrology/w/hydraulics_and_hydrology__wiki/43401/learning-resource-guide-for-users-of-openflows-flood)
- [9] Asterion, *online izvor* (URL: <https://www.asterion.info/>), pristupljeno 10. 9. 2023.
- [10] DHMZ, *službena stranica* (URL: <https://meteo.hr/>), pristupljeno 31. 5. 2023.
- [11] Matlab support , *Online izvor* (URL: https://www.mathworks.com/help/?s_tid=gn_supp), zadnji put pristupljeno 31. 5. 2023.
- [12] Openflows FLOOD Bentley community, *Online izvor* (URL:<https://communities.bentley.com/>), zadnji put pristupljeno 30. 8. 2023.
- [13] Mohid description PDF (Ramiro Neves, Paulo Chambel Leitão and Frank Braunschweig, from the Technical University of Lisbon.)
- [14]Group of Authors. *General Ocean Turbulence Model, Community model*. 2017., *Online izvor* (URL: <http://gotm.net/>), pristupljeno 10. 9. 2023.
- [15]Chippada S., C. Dawson, M. Wheeler, (1998) - Agodonov-type finite volume method for the system of shallow water equations, *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 151(01): 1

- [16] Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L., and Picot, N.: FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Sci.*, 17, 615–649, <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>, 2023
- [17] Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. and Andrić, I. (2017) “Prilog izučavanju hidrologije Skradinskog buka na rijeci Krki,” *Hrvatske vode*, 25(9), pp. 27–36.
- [18] Cindrić, A.-M. (2015) *Distribution, speciation and fate of trace metals in the stratified Krka river estuary*. Edited by D. Omanović and C. Garnier. Faculty of Science, University of Zagreb.
- [19] Cukrov, N. *et al.* (2008) “Spatial distribution of trace metals in the Krka River, Croatia: an example of the self-purification,” *Chemosphere*, 72(10), pp. 1559–1566.
- [20] Bonacci, O., Jukić, D. and Ljubenković, I. (2006) “Definition of catchment area in karst: case of the rivers Krčić and Krka, Croatia,” *Hydrological Sciences Journal*. Taylor & Francis, 51(4), pp. 682–699.
- [21] Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. and Andrić, I. (2017) “Prilog izučavanju hidrologije Skradinskog buka na rijeci Krki,” *Hrvatske vode*, 25(9), pp. 27–36.
- [22] Cindrić, A.-M. (2015) *Distribution, speciation and fate of trace metals in the stratified Krka river estuary*. Edited by D. Omanović and C. Garnier. Faculty of Science, University of Zagreb.
- [23] Cukrov, N. *et al.* (2008) “Spatial distribution of trace metals in the Krka River, Croatia: an example of the self-purification,” *Chemosphere*, 72(10), pp. 1559–1566.
- [24] Fischer, H. B. *et al.* (2013) *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Elsevier.
- [25] Fuks, D. *et al.* (1991) “Bacterial abundance and activity in the highly stratified estuary of the Krka River,” *Marine chemistry*.
- [26] Geyer, W. R. and Ralston, D. K. (2011) “The dynamics of strongly stratified estuaries,” in *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Elsevier, pp. 37–51.
- [27] Gržetić, Z. *et al.* (1991) “Nutrient enrichment and phytoplankton response in an Adriatic karstic estuary,” *Marine chemistry*, 32(2), pp. 313–331.
- [28] Hasan, O. *et al.* (2023) “Integrated Reconstruction of Late Quaternary Geomorphology and Sediment Dynamics of Prokljan Lake and Krka River Estuary, Croatia,” *Remote Sensing*, 15(10), p. 2588.
- [29] Kurup, G. R., Hamilton, D. P. and Patterson, J. C. (1998) “Modelling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in a Microtidal Estuary,” *Estuarine, coastal and shelf science*, 47, pp. 191–208.
- [30] Legović, T. (1991) “Exchange of water in a stratified estuary with an application to Krka (Adriatic Sea),” *Marine chemistry*, 32, pp. 121–135.
- [31] Legović, T. *et al.* (1994) “Eutrophication in the Krka estuary,” *Mar. Chem.*, 46, pp. 203–215.
- [32] Legović, T., Petricioli, D. and Žutić, V. (1991) “Hypoxia in a pristine stratified estuary (Krka, Adriatic Sea),” *Marine chemistry*, 32(2), pp. 347–359.

- [33] Liu, J. *et al.* (2019) "Net submarine groundwater-derived dissolved inorganic nutrients and carbon input to the oligotrophic stratified karstic estuary of the Krka river (Adriatic sea, Croatia)," *Journal of Geophysical Research, C: Oceans*. American Geophysical Union (AGU), 124(6), pp. 4334–4349.
- [34] Matlab (2023) *version 9.14.0 (R2023a)*. The MathWorks Inc.
- [35] McLeod, R. J. and Wing, S. R. (2008) "Influence of an altered salinity regime on the population structure of two infaunal bivalve species," *Estuarine, coastal and shelf science*, 78(3), pp. 529–540.
- [36] Milović, M. (2015) "A new contribution to the knowledge of the vascular flora of the Krka National Park (North Dalmatia, Croatia)," *Glasnik Hrvatskog botaničkog društva*, 4, pp. 22–29.
- [37] Pikelj, K. and Juračić, M. (2013) "Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast," *Journal of Coastal Research*. Coastal Education and Research Foundation, 29(4), pp. 944–957.
- [38] Šenolt, N. *et al.* (2022) "Submerged karst landscape of the Prokljan Lake (Krka River estuary in the central Dalmatia)." doi: 10.5194/icg2022-189.
- [39] Svensen, C. *et al.* (2007) "Plankton distribution and vertical flux of biogenic matter during high summer stratification in the Krka estuary (Eastern Adriatic)," *Estuarine, coastal and shelf science*, 71(3), pp. 381–390.
- [40] Valle-Levinson, A. (2010) *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.
- [41] Zachopoulos, K., Kokkos, N. and Sylaios, G. (2020) "Salt wedge intrusion modeling along the lower reaches of a Mediterranean river," *Regional Studies in Marine Science*, 39, p. 101467.
- [42] Žic, V. and Branica, M. (2006) "Iodate and iodide distributions in the waters of a stratified estuary," *CCACAA*, 79(1), pp. 143–153.
- [41] Weather underground, *Online izvor* (URL <https://www.wunderground.com/>), pristupljeno 8. 9.2023.
- [42] Praćenje fizikalnih parametara vode u Prokljanskom jezeru - *tromjesečni izvještaj*; Rujan
- [43] Galešić Divić, M., Divić, V., Kvesić Ivanković, M., Rumenović, R., Andričević, R. "The impact of water flow variability on brackish water distribution in Prokljan Lake, Croatia". 9th International Conference on Water Resource and Environment. 2023
- [44] Frost, J., Failing to Reject the Null Hypothesis (URL <https://statisticsbyjim.com/hypothesis-testing/failing-reject-null-hypothesis/>) , pristupljeno 15. 8 2023.
- [45] Projekt COMON, FGAG (URL <https://comon-project.com>)
- [46] Galešić, M., Doctoral dissertation, Concentration statistics for conservative solute transport in river estuaries, 2018
- [47] Hrvatski hidrografski institut, *službena stranica* (URL <https://www.hhi.hr/>)