

# Numeričko modeliranje podmorskih ispusta uz primjenu strojnog učenja

---

**Alvir, Marta**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:027585>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Marta Alvir

**NUMERIČKO MODELIRANJE  
PODMORSKIH ISPUSTA UZ PRIMJENU  
STROJNOG UČENJA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2024.



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Marta Alvir

**NUMERIČKO MODELIRANJE  
PODMORSKIH ISPUSTA UZ PRIMJENU  
STROJNOG UČENJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, 2024.





UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING

Marta Alvir

**NUMERICAL MODELLING OF  
SUBMARINE OUTFALLS WITH THE  
APPLICATION OF MACHINE LEARNING**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2024.



Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Doktorski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof. dr. sc. Siniša Družeta, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
2. izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
3. izv. prof. dr. sc. Severino Krizmanić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje



# Sažetak

Prilikom rada podmorskih ispusta dolazi do ispuštanja otpadne vode u morsku vodu. S obzirom da takva voda u sebi sadrži različite vrste nečistoća poput bakterija, toksina, metala, velike količine soli te može imati značajne varijacije u temperaturi, potrebno je postići što bolje miješanje kako bi se minimizirali negativni efekti na morski ekosustav.

U doktorskom radu je analizirano ponašanje podmorskih ispusta korištenjem numeričkih modela i strojnog učenja. Pri tome su predložene četiri tehnike koje doprinose razumijevanju ponašanja i smanjenju negativnog utjecaja na okoliš, te pružaju skup inovativnih metoda koje se mogu primjenjivati kod planiranja izgradnje, praćenja rada podmorskih ispusta te određivanja njihovog utjecaja na okoliš.

Otpadna voda najčešće ima drugačiju gustoću od morske vode, što prouzrokuje različite uzgonske efekte. Ovisno o gustoći otpadne vode, mogu se analizirati pozitivni ili negativni uzgonski mlazovi pri čemu su u ovom radu promatrana oba slučaja. Rezultati numeričkih simulacija uzgonskih mlazova izrađenih u OpenFOAM-u uspoređeni su s prethodnim eksperimentalnim podacima. S obzirom da navedeni problem zahtijeva nestacionarne simulacije miješanja fluida s različitim svojstvima, provođenje takvih simulacija zahtijeva značajne računalne resurse. Iz tog razloga, predložen je pristup reduciranja broja varijabli koje se računaju u numeričkim simulacijama pri čemu se na temelju poznatog saliniteta i temperature računa gustoća otpadne vode, te se dalje promatra koncentracija kao udio s obzirom na gustoću. Na taj način se smanjuje broj diferencijalnih jednadžbi koje se rješavaju. Numeričke simulacije s navedenim pristupom pokazale su veoma dobro poklapanje s eksperimentalnim podacima, te su navedeni modeli korišteni u daljnjoj analizi.

Kod projektiranja rada ispusta, nužno je odabrati adekvatne parametre strujanja i odgovarajuću geometriju ispusta kako bi se minimizirali ekološki učinci. Zbog toga je razvijena metodologija za izradu i analizu negativnih uzgonskih mlazova na temelju strojnog učenja i SHAP metode (engl. *Shapley Additive Explanations*), pri čemu se baza podataka razvila na velikom broju nu-

meričkih simulacija. Isprobano je više različitih uvjeta strujanja, te nekoliko modela strojnog učenja. Najbolji rezultati postignuti su korištenjem umjetne neuronske mreže, dok se najutjecajniji parametar na ponašanje mlaza pokazala brzina mlaza.

Kako bi se dobili realni uvjeti strujanja i modelirao rad podmorskih ispusta uključujući morske struje i ostale parametre, razvijen je postupak jednosmjernog ugnježđivanja *twoLiquidMixing-Foam* OpenFOAM modela u globalni ROMS model (engl. *Regional Ocean Modeling System*) strujanja mora. Postupak je primijenjen na stvarnom podmorskom ispustu u Rijeci za ljetni i zimski period te je analizirano širenje onečišćenja. Rezultati su pokazali da ovakav pristup može biti vrlo koristan kod većih brzina u nižim slojevima mora, pri čemu uobičajeni postupci koji zanemaruju brzine strujanja mora, nisu adekvatni.

Za praćenje rada podmorskih ispusta i validaciju numeričkih modela, predložena je primjena satelitskih snimki. U te svrhe, analizirane su dostupne metode i vrste snimki koje se mogu koristiti. Uspostavljena je metodologija za obradu slika iz Sentinel-2 satelita koja je primijenjena na ispust u Rijeci. Navedeno omogućava analizu rada podmorskog ispusta tijekom dužeg perioda kako bi se moglo planirati buduće zahvate, uočiti eventualna oštećenja i pratiti širenje onečišćenja. Napravljena je usporedba snimki i okolišnih parametara. Rezultati obrade satelitskih snimki uspoređeni su s numeričkim modelom, te je dobiveno podudaranje lokacije pojave onečišćenja.

Navedeni set tehnika služi za poboljšanje planiranja i analizu rada podmorskih ispusta, čime se utječe na smanjenja onečišćenje u obalnom morskom području.

**Ključne riječi:** podmorski ispusti, uzgonski mlazovi, OpenFOAM, satelitski nadzor, strojno učenje, SHAP

# Abstract

During the operation of submarine outfalls, wastewater is released into seawater. Given that such water contains various impurities such as bacteria, toxins, metals, and large amounts of salt and can have significant temperature variations, achieving the best possible mixing is necessary to minimize the negative effects on the marine ecosystem.

In the doctoral dissertation, the behavior of submarine outfalls was analyzed using numerical models and machine learning. Therefore, four techniques were proposed that contribute to understanding behavior and reducing negative environmental impact. They provided a set of innovative methods that can be applied in construction planning, monitoring the operation of submarine outfalls, and determining their impact on the environment.

Wastewater usually has a different density than seawater, which causes different buoyancy effects. Positive or negative buoyancy jets can be analyzed depending on the density of wastewater, and both cases were observed in this paper. The results of numerical simulations of buoyant jets modeled in OpenFOAM were compared with previous experimental data. Since the stated problem requires non-stationary simulations of fluid mixing with different properties, performing such simulations requires significant computer resources. Hence, an approach of reducing the number of variables was proposed, which are calculated in numerical simulations, whereby the density of wastewater is calculated based on the known salinity and temperature, and the concentration is further observed as a proportion with respect to the density. In this way, the number of differential equations to be calculated is reduced. Numerical simulations with the mentioned approach showed a very good agreement with the experimental data, and the mentioned models were used in further analysis.

When designing the outfall operation, it is necessary to choose adequate flow parameters and the appropriate geometry of the outfall to minimize the environmental effects. For this reason, a methodology was developed for creating and analyzing negative buoyant jets based on machine learning and the SHAP method (Shapley Additive Explanations), whereby the database was



developed on many numerical simulations. Several different flow conditions and a few machine learning models were tested. The best results were achieved using an artificial neural network, while the most influential parameter on the behavior of the jet proved to be the velocity of the jet.

In order to obtain actual flow conditions and model the operation of submarine outfalls, including sea currents and other parameters, a one-way nesting procedure of the *twoLiquidMixing-Foam*OpenFOAM model was developed in the global ROMS model (Regional Ocean Modeling System) of sea flow. The procedure was applied to a real submarine outfall in Rijeka for the summer and winter conditions, and the spread of pollution was analyzed. The results showed that this approach can be very useful for higher velocities in the lower layers of the sea, where the usual procedures that ignore the velocities of sea currents are not adequate.

The application of satellite images is proposed to monitor the operation of submarine outfalls and validate numerical models. For these purposes, available methods and types of images that can be used were analyzed. A methodology was established for processing images from the Sentinel-2 satellite, which was applied to the actual outfall in Rijeka. The aforementioned enables the analysis of the work of the submarine outfall over a longer period in order to be able to plan future operations, spot any damage and monitor the spread of pollution. A comparison of recordings and environmental parameters was made. The results of the processing of satellite images were compared with the numerical model, and the location of the pollution occurrence was matched.

The mentioned set of techniques is used to improve the planning and analysis of the operation of submarine outfalls, thereby influencing the reduction of pollution in the coastal marine area.

**Keywords:** submarine outfalls, buoyant jets, OpenFOAM, satellite monitoring, machine learning, SHAP

# Sadržaj

1	UVOD . . . . .	1
1.1	Problem i predmet znanstvenog istraživanja . . . . .	1
1.2	Pregled dosadašnjih istraživanja . . . . .	4
1.3	Ciljevi i hipoteze istraživanja . . . . .	13
1.4	Znanstveni doprinos . . . . .	14
1.5	Struktura doktorskog rada . . . . .	15
2	NUMERIČKO MODELIRANJE UZGONSKIH MLAZOVA . . . . .	17
2.1	Miješanja efluenta i recipijenta . . . . .	17
2.2	Numeričko modeliranje u OpenFOAM-u . . . . .	20
2.3	Redukcija broja varijabli pri miješanju fluida različitih svojstava . . . . .	24
2.4	Opis numeričkih modela . . . . .	27
2.4.1	Pozitivni uzgonski mlazovi . . . . .	27
2.4.2	Negativni uzgonski mlazovi . . . . .	29
2.5	Rezultati numeričkih simulacija . . . . .	31
2.5.1	Pozitivni uzgonski mlazovi . . . . .	31
2.5.2	Negativni uzgonski mlazovi . . . . .	34
3	PRIMJENA STROJNOG UČENJA ZA MODELIRANJE UZGONSKIH MLA- ZOVA . . . . .	38
3.1	Izrada baze za model strojnog učenja . . . . .	38
3.2	Algoritmi i parametri modela strojnog učenja . . . . .	40
3.3	Rezultati modela strojnog učenja . . . . .	42
3.4	Korelacijska analiza . . . . .	45
3.5	Analiza graničnih slučajeva pomoću SHAP metode . . . . .	50
3.6	Integrirani model strojnog učenja s rezultatima iz prethodnih istraživanja . . . . .	53

3.7	Primjena strojnog učenja na reducirani broj varijabli . . . . .	55
4	MODELIRANJE PODMORSKOG ISPUSTA U REALNIM UVJETIMA STRU- JANJA . . . . .	57
4.1	ROMS modeli . . . . .	57
4.2	OpenFOAM-ROMS tehnika jednosmjernog ugnježdivanja . . . . .	59
4.3	Testni primjer - podmorski ispust u Rijeci . . . . .	61
4.4	Validacija tehnike ugnježdivanja . . . . .	65
4.5	Rezultati numeričkih modela . . . . .	67
5	PRIMJENA SATELITA ZA ANALIZU ONEČIŠĆENJA IZ PODMORSKIH ISPUSTA . . . . .	72
5.1	Daljinsko očitavanje . . . . .	72
5.2	Analiza onečišćenja temeljem satelitskih snimki . . . . .	77
5.3	Predobrada satelitskih snimki . . . . .	80
5.4	Baze satelitskih snimki i preuzimanje podataka . . . . .	82
5.5	Analiza satelitskih snimki . . . . .	86
5.6	Rezultati analize . . . . .	91
5.7	Usporedba rezultata ugnježđenog OpenFOAM-ROMS modela s rezul- tatima satelitskih snimki . . . . .	99
6	ZAKLJUČAK . . . . .	103
	Literatura . . . . .	106
	Popis slika . . . . .	120
	Popis tablica . . . . .	124
	PODACI O AUTORICI . . . . .	125

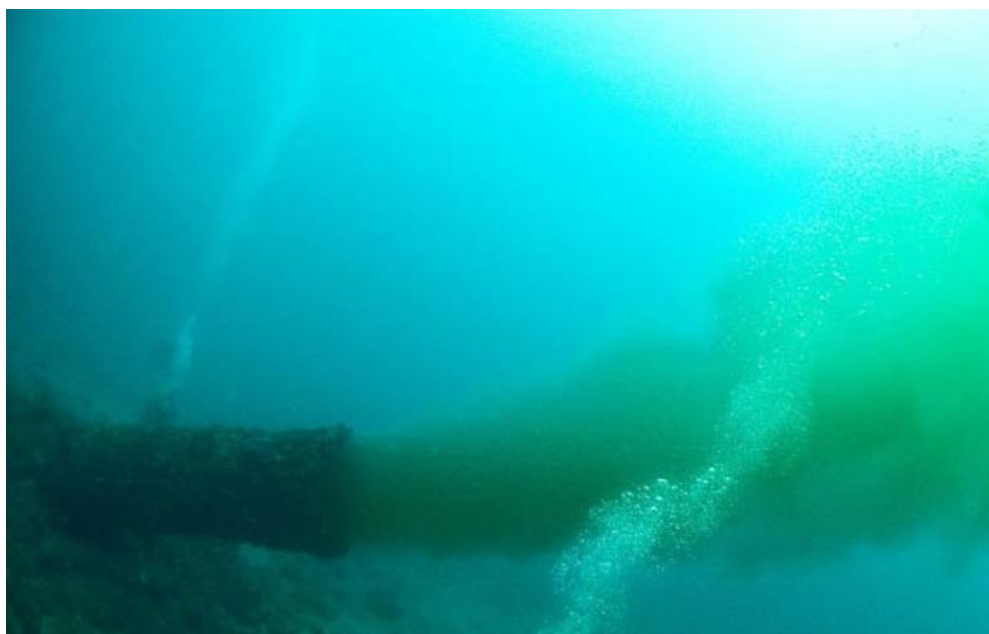
# 1 UVOD

U uvodnom dijelu doktorskog rada opisana je problematika i predmet znanstvenog istraživanja podmorskih ispusta. Napravljen je pregled prethodnih istraživanja i relevantnih metoda. Navedeni su ciljevi i hipoteze doktorskog rada, znanstveni doprinos te je predstavljena struktura doktorskog rada.

## 1.1 Problem i predmet znanstvenog istraživanja

Prema podacima Ujedinjenih naroda [97] 40% svjetskog stanovništva živi unutar 100 kilometara od obale. Porast broja stanovnika te industrijski rast uzrokuju povećanje ispuštanja otpadnih voda u morski okoliš. Za ispuštanje otpadnih voda najčešće se primjenjuju podmorski ispusti analizirani u ovom doktorskom radu. Osim toga postoje i površinski ispusti koji predstavljaju jeftiniju alternativu, no uzrokuju snažne negativne učinke na okoliš i nakupljanje onečišćenja uz obalu te se zbog toga još uvijek koriste jedino u slabo razvijenim zemljama.

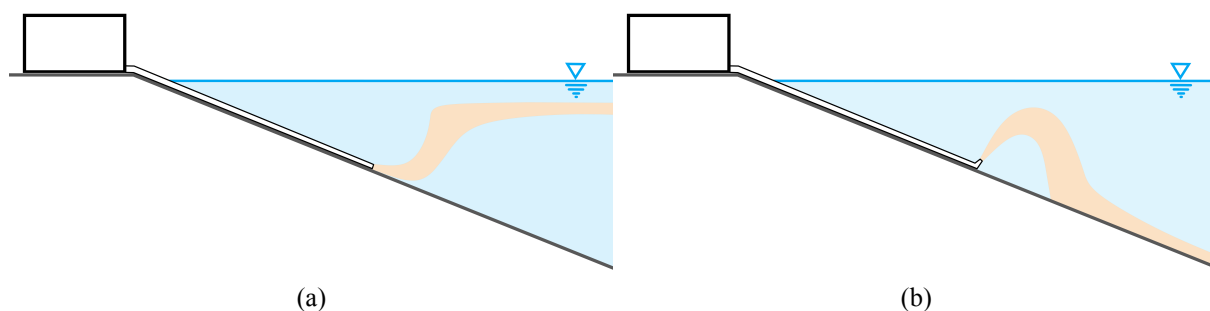
Podmorski ispust, također poznat kao oceanski ispust, ili morski ispust je građevina koja se sastoji od cjevovoda, tunela ili njihove kombinacije, koji završava s difuzorom čija je svrha učinkovito miješanje otpadne vode s morskom vodom. Primjer jednog ispusta prikazan je na slici 1.1.



Slika 1.1: Fotografija podmorskog ispusta [47]

U Hrvatskoj prema *Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (26/20)*, podmorski ispušt je definiran kao vodna građevina za ispuštanje otpadnih voda u more na udaljenosti od obalne crte (najniže plime na kopnu) u pravilu ne manjoj od 500 metara i na dubini većoj od 20 m. Otpadna voda se još naziva efluent, a morska voda recipijent.

Miješanje otpadnih voda je kompleksan proces, stoga se može podijeliti na više dijelova u kojima dominiraju različite fizikalne pojave. Kod većine promatranih ispusta, razlikujemo dva glavna područja uzgonskih mlazova: blisku i daleku zonu [8]. U bliskoj zoni dominantan utjecaj imaju uzgonske sile zbog razlike u gustoći te inercijalne sile zbog brzine istjecanja iz sapnice i oblika geometrije ispusta. S obzirom na utjecaj uzgonskih sila, mlazovi se dijele na pozitivne s manjom gustoćom efluenta i negativne s većom gustoćom efluenta u odnosu na recipijent, prikazane na slici 1.2. U dalekoj zoni snažan utjecaj na miješanje imaju advekcija i difuzija uzrokovane morskim strujama. Proces u bliskoj zoni dešavaju se najčešće u vremenskim skalama od nekoliko minuta i prostornim skalama od desetaka metara, dok u dalekoj zoni traju od nekoliko sati do dana i imaju duljine od desetaka metara do kilometara.



Slika 1.2: Skice podmorskih ispusta s (a) pozitivnim i (b) negativnim uzgonskim mlazom

Neki autori još razlikuju i zonu tranzicije u kojoj efluent prelazi iz bliske u daleku zonu. U toj zoni istodobno važan utjecaj imaju i uzgonske i inercijalne sile kao i smjer strujanja mora [9, 39]. Ovo je posebno važno u slučajevima kada su varijacije gustoće i brzine značajne po dubini vode. Takvi uvjeti se dešavaju u blizini riječnih dotoka koji pospješuju miješanje efluenta prije nego što dosegne površinu i prijeđe u udaljeno područje te ispuste s manjim razlikama u gustoći i velikim brzinama morskih struja. Dizajn podmorskog ispusta utječe najviše na blisku zonu i zonu tranzicije u kojima se događa snažnije miješanje za razliku od daleke zone koja nije pod čovjekovim utjecajem, stoga je fokus ovog istraživanja stavljen upravo na te dvije zone.

Otpadne vode kojima se efluent ispušta u recipijent mogu biti industrijske, oborinske te komunalne otpadne vode koje su dospjele putem kanalizacije [13]. Navedeni ispusti najčešće

uzrokuju pozitivne uzgonske mlazove. Komunalne otpadne vode u sebi mogu sadržavati mikroorganizme, kao što su bakterije i virusi te mogu sadržavati povećane količine organskih tvari kao što su ugljik, dušik i fosfor. Ponekad takva voda ima veću temperaturu od mora, pa zbog patogeni uzrokuje bržu potrošnju otopljenog kisika te dodatno može stvoriti negativne ekološke efekte. U sebi mogu sadržavati i otpadne tvari, koje se nastoje ukloniti uređajima za pročišćavanje prije ispuštanja u morski okoliš. Efluenti također mogu sadržavati značajne količine plastičnog otpada, posebice mikroplastike i nanoplastike koji se nalaze u proizvodima za osobnu njegu, kozmetici, odjeći te dodatno mogu nastati usitnjavanjem iz većih komada plastike prilikom pročišćavanja otpadnih voda [117]. Oborinske vode nastaju zbog kiša i ostalih vrsta padalina te često u sebi sadrže nečistoće jer ispiru površine gradova i naselja, posebice nakon dugog sušnog perioda.

Industrijske vode u sebi mogu sadržavati štetne i toksične tvari koje mogu biti organskog ili anorganskog podrijetla. Osim toga, industrijske vode mogu dolaziti i iz termoelektrana u obalnom području, koje koriste morsku vodu za hlađenje, koju nakon procesa vraćaju nazad u okoliš. Zato se u zoni blizu industrijskih ispusta javlja područje s povišenom temperaturom, što može utjecati na mortalitet i smanjenje određenih vrsta riba i algi, varijacije u broju fitoplanktona te ostalih ekoloških problema [132].

Danas sve češći problem predstavlja salamura, industrijska otpadna voda iz desalinizacijskih procesa, koja se smatra manjim rizikom za javno zdravlje, ali ima veći utjecaj na okoliš [63]. Naime potražnja za pitkom vodom u svijetu se naglo povećala zbog porasta stanovništva, posebice na otocima i u priobalnom području, pa su postrojenja za desalinizaciju sve brojnija. U procesu desalinizacije, morska ili bočata voda se koristi za proizvodnju pitke vode uklanjanjem suspendirane tvari i otopljenih minerala, uglavnom soli, a efluent, tj. salamura se ispušta natrag u obalno morsko područje. Za dobivanje pitke vode iz morske vode najčešće se primjenjuje postupak reverzne osmoze koji ima stopu konverzije od oko 40-50%, pri čemu nastaje salamura približno dvostruko veće slanosti od morske vode [85]. Povećana količina soli potencijalno može imati negativne učinke na morski ekosustav jer dovodi do dehidracije stanica i moguće smrti organizama [74]. Osim toga, salamura može imati višu temperaturu od okoline te sadržavati teške metale i ostatke opasnih kemikalija koje se primjenjuju u procesu kao što su sredstva protiv kamenca, sredstva za flokulaciju i koagulanti [86]. Zbog veće gustoće takvog efluenta nastaju negativni uzgonski mlazovi koji se još mogu javiti pri ispuštanju hladne vode iz LNG (engl. *liquefied natural gas*) terminala.

Prema istraživanju Palomar i Losada [83], projektiranje sustava ispuštanja otpadnih voda se sastoji od osnovnih pet koraka. Prvi korak se odnosi na preliminarnu studiju i prikupljanje podataka. Navedeno podrazumijeva prikupljanje očekivanih informacija o efluentu uključujući njegovu vrstu, protoke, opterećenja polutantima, fizikalna svojstva (temperaturu, salinitet, gustoću, viskoznost, sl.), kemijska i biološka svojstva (količine bakterija i metala, sl.). Dakle, efluenti iz podmorskih ispusta mogu biti različitog podrijetla, stoga mogu imati specifična svojstva i polutante koji mogu negativno utjecati na okoliš. Osim toga potrebno je skupiti podatke o recipijentu, odnosno lokalnim uvjetima u blizini mjesta ispuštanja, topografiji, batimetriji, meteorološkim i hidrološkim uvjetima, brzini i promjeni razine vode, fizikalnim, kemijskim i biološkim svojstvima recipijenta [22]. Drugi korak se odnosi na odabir lokacije i sustava za ispuštanje otpadnih voda. U navedenom koraku je nužno ispitati veći broj različitih uvjeta strujanja kako bi se odredila lokacija ispusta te odabrao dizajn i dimenzije difuzora. U ovom koraku se određuje nužni stupanj pročišćavanja otpadnih voda ovisno o svojstvima i osjetljivosti morskog područja u koji se efluent ispušta. Treći korak se odnosi na modeliranje miješanja efluenta i recipijenta. U ovoj fazi je ključno detaljno modeliranje i analiza rada podmorskih ispusta kako bi se odredio utjecaj na okoliš. Četvrti korak je optimizacija ispusta i geometrije na temelju detaljnih modela ispusta i odabir konačnog oblika ispusta i parametara strujanja. Peti, konačni korak odnosi se na praćenje stanja morskog okoliša tijekom rada ispusta. Nakon dizajniranja i izgradnje ispusta, nužno je održavanje standarda zaštite okoliša putem kontinuiranog praćenja kvalitete otpadnih voda. Granične dopuštene vrijednosti emisija otpadnih voda propisane su zakonskim regulativama te je bitno osigurati da one ostanu ispod propisanih razina.

## 1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Za predviđanje i analizu miješanja efluenta i recipijenta kod uzgonskih mlazova koji nastaju pri radu podmorskih ispusta može se koristiti nekoliko različitih pristupa. Najveći broj analiza u dosadašnjoj literaturi proveden je u laboratorijskom, stacionarnom okruženju na umanjenim modelima, pomoću kojih su se promatrale pojave u bliskoj zoni s obzirom da se u tom dijelu dešava najveći dio razrjeđivanja. Pri tome su se koristile tehnike kao što su mjerenje brzine fotogramom čestica (engl. *Particle Image Velocimetry*, PIV), laserski inducirana fluorescencija (engl. *Laser Induced Fluorescence*, LIF) i metoda prigušenja svjetlosti (engl. *Light Attenuation*, LA). U nekim eksperimentima su se također promatrali skalirani fizikalni modeli podmorskih

ispusta s utjecajem struja, valova, udaljenosti ispusta od dna i površine vode. Nedostaci laboratorijskih eksperimenata su visoka cijena, vremenska zahtjevnost te otežana analiza većeg broja konfiguracija i uvjeta strujanja, posebice stratificiranog okruženja.

Na temelju velikog broja eksperimentalnih istraživanja u bliskom polju izradili su se integralni modeli, lagranžijanski modeli npr. JETLEG u Visjet programu [28] i UM3 model u Visual Plumes programu [41], modeli karakterističnih duljina, njihovih kombinacija kao što je CorJet integriran u CORMIX programu [33], analitičko-empirijski modeli kao što je NRFIELD (RSB) [20] te niz drugih modela baziranih na empirijskim formulama. Takvi modeli omogućavaju brzo dobivanje osnovnih informacija o ponašanju mlazova, no imaju ograničenu primjenu na jednostavne slučajeve i uglavnom ne predviđaju dovoljno dobro razrjeđenje i geometrijske karakteristike mlazova [84].

Kako bi se dobio detaljniji uvid u kompleksno ponašanje i miješanje uzgonskih mlazova koriste se numerički modeli izrađeni pomoću računalne dinamike fluida. Numerički modeli, nakon validacije s eksperimentalnim istraživanjima, omogućavaju isprobavanje velikog broja kombinacija geometrija i parametara strujanja, što dovodi do jednostavnijeg istraživanja odgovarajućeg dizajna podmorskih ispusta ili poboljšanja postojećeg. Prvi numerički modeli za simuliranje onečišćenja u bliskom polju izrađeni su u komercijalnom rješavaču za računalnu dinamiku fluida ANSYS CFX [82, 111] na modelima nagnutih negativnih uzgonskih mlazova. Međutim, većina novijih studija se bazira na primjeni besplatnog paketa otvorenog koda OpenFOAM-a (engl. *Open Field Operation and Manipulation*) [52].

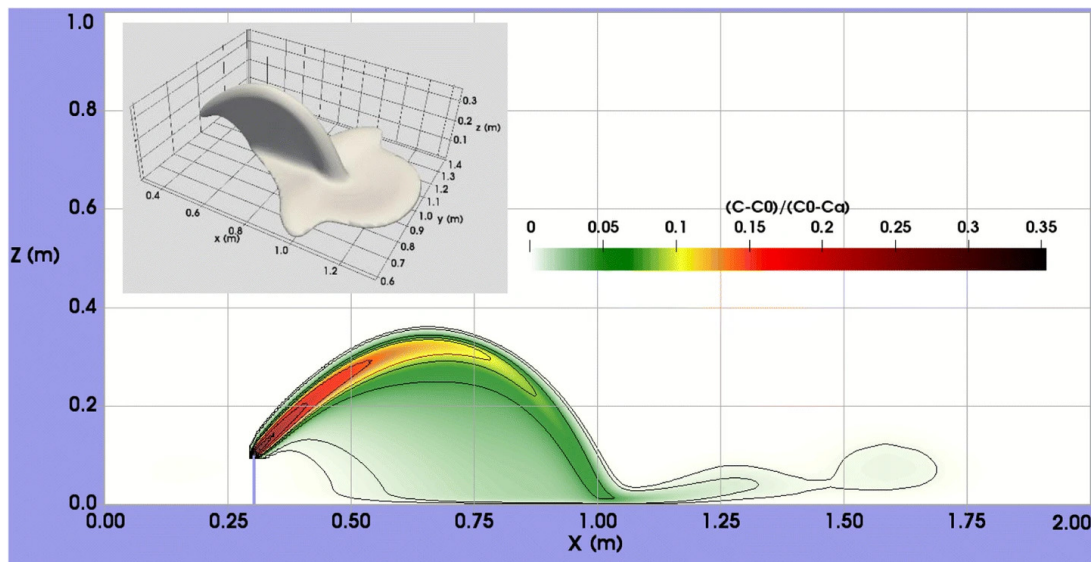
Kheirkhah i sur. [61] radili su opsežno numeričko istraživanje nagnutih negativnih uzgonskih mlazova u OpenFOAM-u koje su usporedili s prethodnim eksperimentalnim i numeričkim podacima. Pri tome su uspoređivali veliki broj turbulentnih modela, pri čemu se pokazalo da najbolje predviđanje za ovakav tip problema daju turbulentni modeli LRR i *realizable k - ε*. Takav zaključak dobiven je i u radu Kheirkhah i Nistor [59], pri čemu su uspoređeni turbulentni modeli za pozitivne uzgonske mlazove s različitim salinitetima i temperaturama. Osim toga, analizirani su utjecaji dimenzija domene i spremnika te nagnutosti i hrapavosti dna, pri čemu se zaključilo da navedeni efekti mogu znatno utjecati na rezultate.

Zhang i sur. [128] su analizirali negativne uzgonske mlazove pomoću numeričkih simulacija u OpenFOAM-u koje su usporedili s eksperimentalnim podacima, pri čemu se pokazalo da ovakav pristup može uzrokovati podcijenjenjivanje koncentracije efluenta udaljavanjem od sapnice posebice u slučajevima nedovoljne gustoće numeričke mreže. Autori Tofighian i sur.



[108] su proveli detaljnu eksperimentalnu i numeričku analizu negativnih uzgonskih mlazova za različite kuteve sapnice, pri čemu je također uočeno da može doći do slabije sposobnosti predviđanja razrjeđenja u blizini dna.

Alfaifi i sur. [10] analizirali su ponašanje pozitivnih i negativnih uzgonskih mlazova s različitim salinitetom i temperaturom, pri čemu su uspoređivali eksperimente čiji su rezultati dobiveni mjerenjem pomoću PIV uređaja i numeričkih simulacija u OpenFOAM-u. Uočili su različito ponašanje za efluente s istim salinitetom, a različitom temperaturom. Ardalan i Vafaei [16] promatrali su ponašanje nagnutih termalnih uzgonskih mlazova s povećanim salinitetom pomoću eksperimenata i numeričkih simulacija u OpenFOAM-u pri stacionarnom recipijentu. Na slici 1.3 prikazani su rezultati koncentracije numeričke simulacije za slučaj negativnog uzgonskog mlaza.



Slika 1.3: Rezultati simulacije za nagnuti termalni uzgonski mlaz s povećanim salinitetom. Boje prikazuju koncentraciju ( $C$ ) mlaza u promatranom području [16].

Istraživanje autora Tahmooresi i Ahmadyar [107] pokazalo je da vrijednosti turbulentnog Schmidtoovog broja mogu utjecati na rezultate numeričkih simulacija nagnutih negativnih uzgonskih mlazova. Odgovarajuće vrijednosti dovode do veće točnosti i poboljšanja predviđanja razrjeđenja blizu dna u odnosu na eksperimentalna istraživanja. U radu autora García-Alba i sur. [42] korištene su PIV i LIF tehnike za analizu četiri karakteristične zone uzgonskih mlazova te validacije rezultata numeričkih simulacija izrađenim pomoću OpenFOAM programa. Rezultati su se također usporedili s CORJET i VISJET modelima, pri čemu se pokazalo da takvi modeli podcjenjuju putanju i precjenjuju razrjeđivanje, dok se s numeričkim modelima može reproducirati ponašanje uzgonskih mlazova za sve zone u odnosu na eksperimentalne rezultate.

Kako bi se postiglo što bolje miješanje, podmorski ispusti mogu biti s jednom sapnicom ili više, što ovisi o konstrukciji i planiranim uvjetima. Ispusti s više sapnica najčešće postižu bolje miješanje kod većih protoka efluenta, dok su ispusti s jednom sapnicom jeftiniji za izvedbu i održavanje. Zbog toga su rađena istraživanja [118, 120, 122] koja su pokazala jako dobro podudaranje rezultata numeričkih modela i eksperimenata.

Neka od istraživanja uzgonskih mlazova u OpenFOAM-u su se fokusirala na granične slučajeve kada se efluent nalazi blizu dna ili površine vode. Ramezani i sur. [91] analizirali su ponašanje negativnih uzgonskih mlazova u OpenFOAM-u kod ispuštanja veoma blizu morskog dna pri čemu se javlja učinak Coande (engl. *Coanda effect*) što dovodi do znatnog smanjenja miješanja efluenta i recipijenta. Ponašanje nagnutih uzgonskih mlazova u plitkim vodama u nekim slučajevima također može dovesti do smanjenog razrjeđivanja stoga su autori Kheirkhah i sur. [60] promatrali takve pojave na temelju numeričkih simulacija u OpenFOAM-u.

Osim navedenih pristupa za predviđanje i analiziranje karakteristika negativnih uzgonskih mlazova, nedavno su se počele primjenjivati i tehnike strojnog učenja. Prednost ovakvog pristupa je veća točnost predviđanja u odnosu na analitičke modele, kraće vrijeme izračuna rezultata te mogućnost opisivanja i analiziranja kompleksnih pojava, no izrade baza podataka za takve modele mogu biti dugotrajne.

Većina prethodnih istraživanja primijenila je strojno učenje na podmorske ispuste s malim brojem varijabli koje su uglavnom bile bezdimenzijske te malim rasponom parametara. Osim toga, istraživanja su uglavnom bila bazirana na neuronskim mrežama, adaptivnom neuro-fuzzy inferentnom sustavu (ANFIS) te multi-genskom genetskom programiranju (MGGP). Abdel [6] je primijenio ANFIS tehniku za predviđanje karakteristika mlaza podmorskih ispusta na temelju tri bezdimenzijska parametra, pri čemu su se dobili dobri rezultati. Musavi i Ahadiyan [78] koristili su umjetnu neuronsku mrežu za predviđanje gornje i donje granice putanje mlaza na temelju četiri bezdimenzijska parametra i baze dobivene eksperimentalnim putem uz visoku točnost predviđanja.

Yan i Mohammadian [119] koristili su MGGP za predikciju koncentracije vertikalnih mlazova čiji su rezultati uspoređeni s prethodnim eksperimentalnim istraživanjima i analitičkim rješenjima. Yan i sur. [123] također su primijenili MGGP na ispuste s više sapnica, pri čemu su analizirali podatke iz baze dobivene na temelju provedenih numeričkih simulacija u OpenFOAM-u. Zaključena je prihvatljiva sposobnost predviđanja, pri čemu se kod nekih koncentracija pojavljuju nerealne vrijednosti te je pri nižim Foudovim brojevima dobiveno bolje predviđanje.

Yan i Mohammadian [121] su napravili model na temelju MGGP algoritma i bezdimenzijskih karakteristika iz prethodnih eksperimentalnih istraživanja u stacionarnom i nestacionarnom okruženju. Rezultati su pokazali dobru moć predviđanja, no naglašeno je da je model valjan samo na treniranom rasponu podataka. Autori Yan i sur. [124] primijenili su konvolucijske neuronske mreže (CNN) za predviđanje koncentracija na području u blizini ispusta s više sapnica, pri čemu su rezultati pokazali da CNN daje bolje performanse na ovom tipu problema od MGGP algoritma.

U sklopu istraživanja autora Jain i sur. [50] primijenjen je ANFIS s algoritmima za optimizaciju na bazi podataka iz simulacija napravljenih pomoću OpenFOAM-a kako bi se na temelju kuta i Froudovog broja mogle predvidjeti koordinate dvije geometrijske karakteristike negativnih uzgonskih mlazova te razrjeđivanje u tim točkama. Iz rezultata se može uočiti da opisane kombinacije ANFIS algoritma daju puno bolje rezultate od multivarijatne regresije.

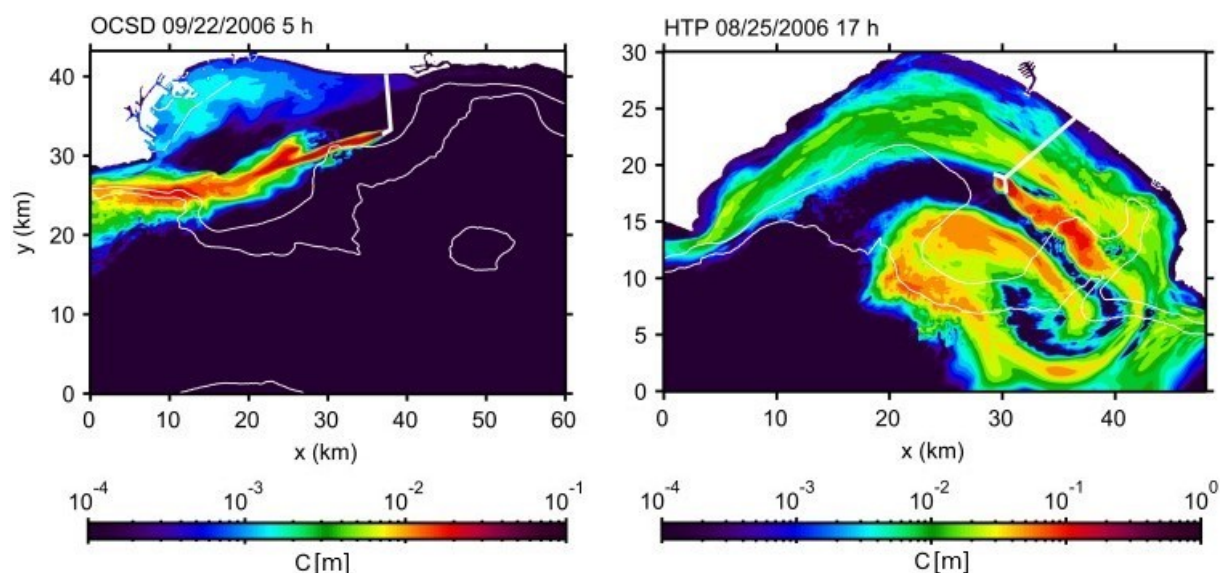
Za numeričko modeliranje realnih uvjeta strujanja i rada podmorskih ispusta posebice u zoni tranzicije i dalekoj zoni potrebno je uzeti u obzir parametre mora kao što su morske struje, salinitet i temperatura. Da bi se to napravilo, koriste se izmjereni podatci o recipijentu ili numerički oceanografski modeli, kao što su DELFT3D [31], POM (engl. *Princeton Ocean Model*) [70] te Regionalni sustav za modeliranje oceana (engl. *Regional Ocean Modeling System, ROMS*) [100, 101] gdje će se posljednji koristiti u ovom doktorskom radu.

ROMS je besplatan program otvorenog koda za modeliranje strujanja mora, koji je često korišten među znanstvenom zajednicom. U sklopu modela mogu se dodavati moduli za simuliranje sedimenta, onečišćenja, leda, biološki modeli, modeli valova te mnogih drugih pojava. Modeli najčešće obuhvaćaju velike površine, računaju se za točno određene dane, odnosno rubne uvjete uključujući izvore i uroke vode, vremenske uvjete i slično. Također, većina modela se bazira na kalibraciji i usporedbi rezultata simulacije sa realnih uvjetima, stoga takvi modeli imaju veliku točnost i dobro prikazuju realne uvjete strujanja. Međutim, takvi modeli nemaju mogućnost detaljnog opisivanja geometrije te opisivanja miješanja fluida različitih gustoća. Stoga neki od autora koriste podatke iz ROMS modela kao ulazne podatke za druge modele ili analiziraju daleku zonu ispusta pomoću ROMS modela.

Lončar i sur. [67, 66] te Mrša i sur. [46] su preuzeli podatke iz ROMS modela za definiranje rubnih uvjeta u MIKE programu pri modeliranju onečišćenja iz podmorskih ispusta u dalekoj zoni. U radu Ho i sur. [48] analiziralo se širenje oblaka efluenta pomoću ROMS modela u zoni tranzicije i dalekoj zoni pri čemu je onečišćenje modelirano pasivnim skalarom. Podatci

su uspoređeni s laboratorijskim eksperimentima te je zaključeno da se ROMS može primijeniti za analizu takvog tipa problema.

Silva i sur. [104] primijenili su ROMS i lagranžijanski model za analizu širenja onečišćenja iz podmorskog ispusta te strujanja mora u laguni i zaljevu. Autori Uchiyama i sur. [110] su analizirali raspršivanje i razrjeđivanje gradskih otpadnih voda u dalekoj zoni za dvije lokacije podmorskih ispusta različitih udaljenosti od obale pomoću ROMS modela i pasivnog skalara. Kako bi dobili što preciznije rezultate u zoni blizu ispusta, primijenili su tehniku ugnježdavanja (engl. *nesting*) ROMS modela većih gustoća mreže i manje domene u ROMS modele manje gustoće mreže i većih domena. Na slici 1.4 prikazani su rezultati vertikalno integrirane normalizirane koncentracije skalara ( $C$ ) iz podmorskih ispusta u južnoj Kaliforniji.



Slika 1.4: Rezultati ROMS modela širenja onečišćenja iz podmorskih ispusta [110]. Deblja bijela linija predstavlja podmorski ispust, a tanja linija izobate na 100 i 500 metara.

Istraživanje [130] autora Zhang i sur. provedeno je u svrhu određivanja utjecaja podmorskih ispusta iz postrojenja za pročišćavanje na farmu morskih algi. Korišten je ROMS model za više načina rada i protoka ispusta. Kao i kod prethodnih istraživanja, promatrana je daleka zona oko ispusta uz Eulerov model pasivnog skalara.

U svrhu praćenja rada podmorskih ispusta i validacije numeričkih modela, mogu se provesti terenska mjerenja koja su relativno malo prisutna u znanstvenoj literaturi. Takva mjerenja provode se s plovila ili pomoću instrumenata koji se sidre na različitim mjestima u promatranom području. Kod usidrenih uređaja, problem je što je postavljanje, održavanje i izvlačenje skupo, pa je potrebno pažljivo razmotriti broj i lokaciju mjernih točaka kako bi se dobilo dovoljno informacija uz što niže troškove. Kod mjerenja s broda nedostatak je vremenska vari-

jabilnost strujanja te duža analiza mapiranja pri čemu može doći do promjene početnih uvjeta. Za analizu podmorskih ispusta prate se fizikalna i kemijska svojstva kao što su količina fosfora, dušika, bakterija, salinitet i temperatura, pri čemu se mjerenja vrše pomoću sonde kao što je CTD (engl. *conductivity temperature, and depth*), dok se za mjerenje brzina i smjera morskih struja uglavnom primjenjuju strujomjeri ili ADCP uređaji (engl. *Acoustic Doppler Current Profiler*).

U novije se vrijeme za analizu praćenja stanja morskog okoliša i pojave onečišćenja mora sve češće primjenjuju satelitske snimke. Sve veća rezolucija i mogućnosti mjerenja različitih parametara omogućavaju analizu utjecaja podmorskih ispusta, posebice kod problema u njihovom radu, npr. puknuća cijevi ispusta. Osim toga, takve snimke su lako dostupne, omogućavaju snimanje širokog raspona podataka s različitim vremenskim i prostornim rezolucijama u različitim pojasevima elektromagnetskog spektra, čak i na teško dostupnim mjestima uz veliku pouzdanost [23]. No, satelitske snimke imaju nedostatke uključujući pojavu oblaka i utjecaj atmosfere pri čemu je potrebno napraviti korekcije snimki kako bi se povećala vidljivost. Također je uočeno da kod intenzivnog miješanja i pojave piknokline (kada efluent ostane na nižim slojevima i ne dođe do površine) koje se dešava u nekim slučajevima, nema vidljivog utjecaja ispusta na satelitskim snimkama [98]. S obzirom da se pomoću satelitskih snimki mogu dobiti vrijednosti saliniteta i temperature na morskoj površini [69], pokazalo se da su takve snimke jako dobre u određivanju utjecaja ispusta iz nuklearnih elektrana [131] i termoelektrana [125].

Na temelju satelitskih snimki mogu se analizirati i ispusti iz desalinizacijskih postrojenja kao što su radili autori Amokranea i sur. [14] gdje su promatrali stanje mora prije i poslije gradnje desalinizacijskog postrojenja. Međutim, najčešća primjena satelita je za analizu ispusta iz uređaja za pročišćavanje.

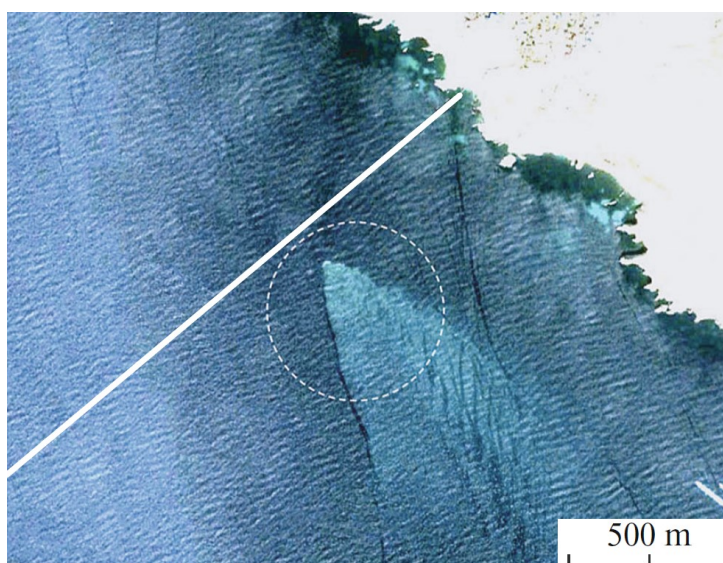
Forster i sur. [40] napravili su regresijsku analizu Landsat-TM snimki područja oko podmorskog ispusta te su uspoređivali podatke s mjerenjima onečišćenja. Zaključili su da je količina klorofila pokazatelj intenziteta rasta algi zbog veće količine hranjivih tvari, dušika i fosfora. Također je uočeno da se pojavljuje veća količina suspendiranih čestica, čime se smanjuje prozirnost vode i povećava mutnoća.

Sherwin i sur. [102] usporedili su modele količine bakterija pomoću snimki radara sa sintetičkom aperturom (engl. *Synthetic Aperture Radar*, SAR) iznad ispusta, koji očitavaju površinsku hrapavost te su uočili značajnu korelaciju između snimki i onečišćenja. Stoga je zaključeno da se SAR snimke mogu primijeniti čak i kod manjih podmorskih ispusta te da se mogu koristiti kao dodatni alat za praćenje rada podmorskih ispusta. Prednost SAR snimki je što zbog

korištenja radarske tehnologije oblaci nemaju utjecaj na rezultate pa se mogu koristiti neovisno o vremenskim prilikama, no valovi mogu utjecati na rezultate.

Ferrara i sur. [37] usporedili su primjenu više zračnih metoda i daljinskog mjerenja, uključujući snimke satelita, helikoptera i drona, na temelju termalnih snimki podmorskih ispusta. Svaki od navedenih postupaka ima različitu rezoluciju te je zaključeno kako su sateliti prvi korak u analizi podmorskih ispusta zbog jednostavnosti primjene i smanjenih troškova, dok se ostale metode mogu primijeniti kod detaljnijih analiza i praćenja manjih ispusta.

U radu [24] Bondur i sur. napravljena je multispektralna analiza na većem broju satelitskih snimki te su ih usporedili s mjerenim podacima. Zaključeno je da se takav postupak može koristiti za analize podmorskih ispusta, posebice kod problema u njihovom radu, npr. puknuća cijevi. Uočeno je također da se u nekim slučajevima oblak efluenta može vidjeti na satelitskim snimkama na temelju promjene boje mora, bez potrebe za dodatnim analizama i obradama slika. Na slici 1.5 prikazan je primjer Google Earth satelitske snimke u slučaju puknuća cijevi podmorskog ispusta.



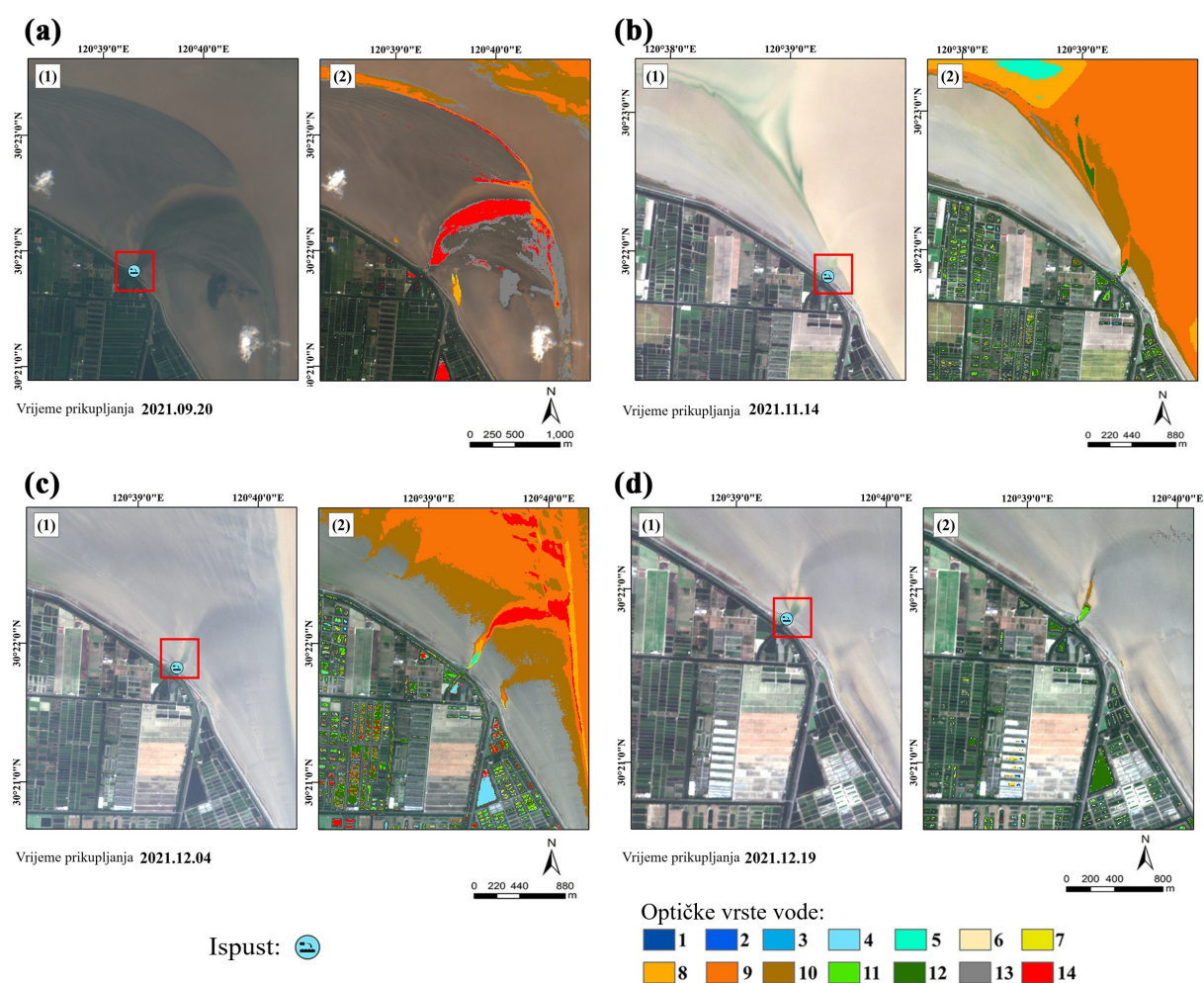
Slika 1.5: Primjer multispektralne Google Earth satelitske snimke mora kod puknuća cijevi podmorskog ispusta [24]. Bijela deblja linija predstavlja podmorskih ispust, a crtkani krug vidljivu lokaciju izbijanja onečišćenja na morskou površinu.

U radu [109] autora Trinh i sur. analizirane su satelitske snimke kako bi se odredio utjecaj komunalnih otpadnih voda, pri čemu su analizirali temperaturu i količinu klorofila u moru, za koje se pokazalo da imaju snažnu povezanost s onečišćenjem iz podmorskih ispusta. Uz snimke, napravljena su terenska mjerenja kako bi se usporedili podatci, na temelju kojih se napravio lokalni algoritam za određivanje količine klorofila na temelju valnih duljina iz satelitskih snimki.



Gierach i sur. [43] analizirali su satelitske snimke mora uključujući temperaturu na površini, boju, klorofile te SAR snimke. Definirane su minimalne razlike parametara iznad ispusta u odnosu na morsku vodu, kako bi bio vidljiv utjecaj, stoga je zaključeno da je korisno primjenjivati više različitih vrsta senzora kako bi se napravila robusnija analiza i uočilo više vrsta potencijalnih onečišćenja s manjim utjecajem vremenskih uvjeta.

Wang i sur. [114] su predložili metodu za detekciju sumnjivog ispuštanja otpadnih voda iz obalnih ispusta na temelju Sentinel-2 satelitskih snimki. Primjenom optičke klasifikacije onečišćenja voda iz slika, napravljen je model za detekciju lokacija ispusta čiji su rezultati prikazani na slici 1.6. Lijeve slike prikazuju Sentinel-2 snimku s lokacijom ispusta označenom crvenim pravokutnikom, a desna slika prikazuje rezultate klasifikacije. To je posebice korisno kod otkrivanja naglog povećanja bakterija i onečišćenja u pojedinim dijelovima uz obalu, čime se znatno ubrzava pronalazak uzroka onečišćenja, npr. ilegalnih ispusta.



Slika 1.6: Rezultati klasifikacije ispusta temeljeni na multispektralnim satelitskim slikama [114] za (a) 20. rujna 2021., (b) 14. studenog 2021., (c) 4. prosinca 2021. i (d) 19. prosinca 2021.

Iz prethodnih istraživanja može se uočiti da nedostaju modeli bliske zone i zone tranzicije koji uključuju parametre mora. Dakle, u bliskoj zoni su se uglavnom koristile OpenFOAM simulacije bez promjene gustoće i utjecaja morskih struja, dok su se u dalekoj zoni primjenjivali ROMS modeli. Osnovni problem prilikom izrade numeričkih modela u bliskoj i zoni tranzicije za realne uvijete strujanja je kompleksna validacija. Također je uočen nedostatak modeliranja ponašanja uzgonskih mlazova temeljem strojnog učenja zbog smanjenog broja ulaznih varijabli. Većina prethodne literature nije analizirala postotak satelitskih snimki s oblacima i ograničenja korištenja daljinskog očitavanja. Stoga će se navedeni problemi istražiti u ovom radu.

### **1.3 Ciljevi i hipoteze istraživanja**

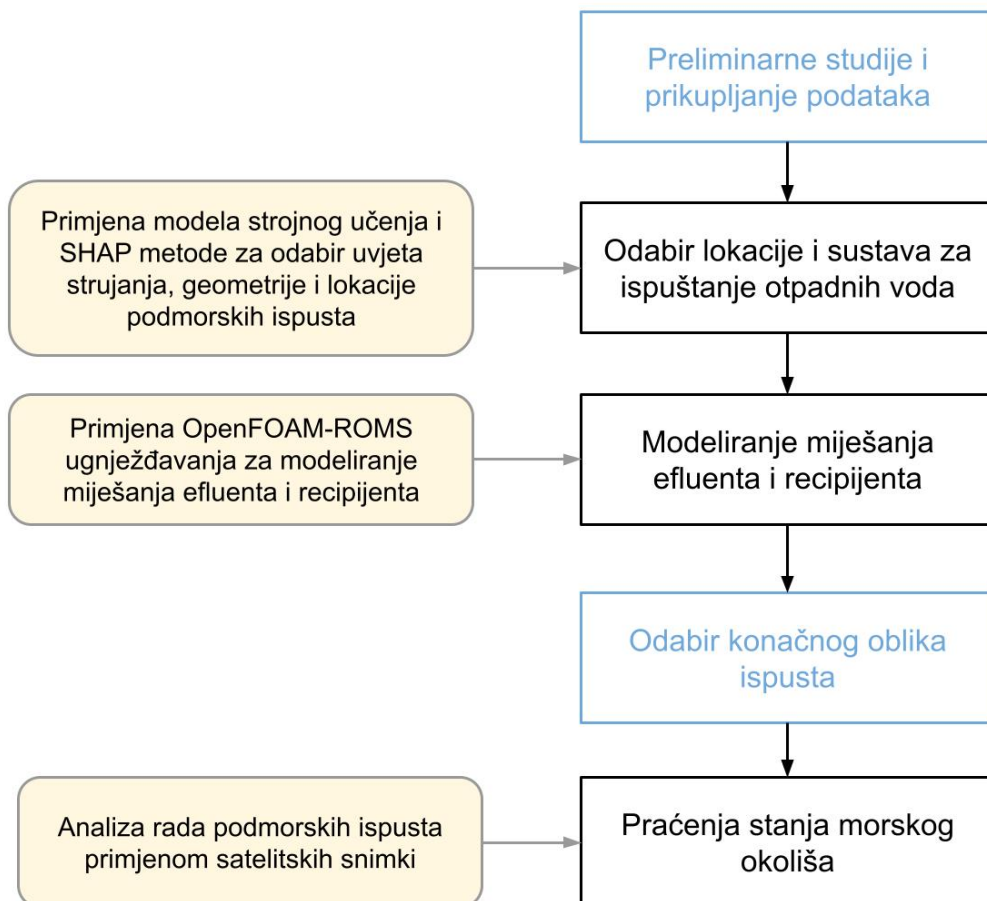
Cilj istraživanja je temeljem numeričkih modela i strojnog učenja doprinijeti analizi podmorskih ispusta, poboljšati njihova konstrukcijska rješenja i smanjiti njihov negativni utjecaj na okoliš. Hipoteza je da se korištenjem numeričkih modela može napraviti analiza ispusta za različite uvjete strujanja. Razvijanjem metodologije bazirane na UNESCO-voj jednadžbi stanja koja će detaljnije biti opisana u sljedećem poglavlju, cilj je smanjivanje broja varijabli i diferencijalnih jednadžbi koje se računaju što posljedično dovodi do smanjenja vremena trajanja proračuna. Hipoteza je da će se smanjenim brojem varijabli za različite temperature i iste salinitete dobiti rezultate koji će odgovarati eksperimentalnim podatcima. Cilj je također razviti metodologiju za primjenu strojnog učenja i SHAP metode na većem broju numeričkih simulacija, čime se omogućava predviđanje ponašanja i analiza utjecaja varijabli na ispuste, stoga je hipoteza da se pomoću metoda strojnog učenja treniranih na rezultatima većeg broja simulacija može predvidjeti ponašanje uzgonskih mlazova. Kako bi se simulirali realnih uvjeti rada podmorskih ispusta, cilj je razviti metodologiju za jednosmjerno ugnježđivanje modela podmorskih ispusta s visokom rezolucijom u regionalni oceanografski model. Hipoteza je da se preuzimanjem podataka o strujanju mora iz ROMS modela u OpenFOAM numeričke modele, može dobiti realno ponašanje ispusta u bliskoj zoni i zoni tranzicije koje je najviše pod čovjekovim utjecajem. Jedan od ciljeva je istražiti mogućnost primjene satelitskih podataka za analizu rada podmorskih ispusta, validaciju numeričkih simulacija te detekciju potencijalnih ekoloških problema. Hipoteza je da se na temelju satelitskih snimki može uočiti i pratiti širenje onečišćenja iz podmorskih ispusta za određene uvijete rada te dobiti uvid u njihovo ponašanje kroz duži vremenski period.



## 1.4 Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos predloženog istraživanja je razvijanje metodologije za predviđanje ponašanja i poboljšanje konstrukcije podmorskih ispusta, analize i određivanja njihovog utjecaja na okoliš te praćenje njihovog rada. Osnovni segment znanstvenog doprinosa se odnosi na poboljšanje numeričkih modela uzgonskih mlazova, uz primjenu redukcije broja varijabli čime se ubrzava izračun.

Ostali segmenti se odnose na poboljšanje ostalih koraka pri projektiranju sustava ispuštanja otpadnih voda i rada podmorskih ispusta prethodno opisanih [83] i prikazanih na slici 1.7. Žuta polja predstavljaju znanstveni doprinos, kao predložene tehnike poboljšanja crnih polja za projektiranje podmorskih ispusta, dok se plava polja odnose na prikupljanje podataka i odlučivanje.



Slika 1.7: Doprinos doktorskog rada u kontekstu projektiranja sustava ispuštanja otpadnih voda

Za odabir lokacije i sustava ispuštanja otpadnih voda, znanstveni doprinos se očituje kroz predlaganje primjene strojnog učenja i SHAP tehnike za analizu najutjecajnijih parametara. Predložena tehnika omogućava brzo i pouzdano predviđanje miješanja za veliki broj različi-

tih parametara te detaljnije razumijevanje ponašanja mlazova. Nakon odabira preliminarne geometrije, nužno je detaljno modeliranje miješanja efluenta i recipijenta. Stoga se u ovom radu predlaže primjena OpenFOAM-ROMS ugnježdavanja. Ugnježdivanjem numeričkih modela ispusta u regionalni oceanografski model, dobiva se precizniji model koji u obzir uzima i razlike u gustoći te morske struje što može značajno utjecati na ponašanje ispusta u bliskoj zoni i zoni tranzicije. Navedena metoda omogućava poboljšani odabir konačnog oblika ispusta. Nakon izgradnje podmorskih ispusta, nužno je njihovo praćenje rada te utjecaj na okoliš, stoga se znanstveni doprinos ovog rada očituje kroz predlaganje metodologije za korištenje satelitskih snimki pri analizi rada podmorskih ispusta i praćenje stanja okoliša. Sve četiri navedene metode predstavljaju set alata baziranih na numeričkim simulacijama, strojnom učenju i satelitskim snimkama za detaljniju, bržu i točniju analizu rada podmorskih ispusta.

## 1.5 Struktura doktorskog rada

Doktorski rad se sastoji od šest poglavlja i pripadajućih potpoglavlja. U uvodnom dijelu dan je pregled dostupne literature u području uzgonskih mlazova i podmorskih ispusta. Opisani su dosadašnji eksperimentalni, analitički i numerički modeli. Prikazani su radovi koji su primijenili strojno učenje za predviđanje ponašanja uzgonskih mlazova, regionalne oceanografske modele i njihove podatke za modeliranje ispusta te satelitske snimke za detekciju onečišćenja. Predstavljani su ciljevi i hipoteze, te je dan pregled sadržaja doktorskoga rada.

U drugom poglavlju analizirani su uzgonskih mlazovi te su opisane postavke numeričkih modela izrađenih u OpenFOAM programu korištenjem *twoLiquidMixingFoam* rješavača za miješanje dva fluida različite gustoće na temelju rješavanja dodatne jednadžbe s udjelom koncentracije. Opisan je postupak redukcije broja varijabli na temelju UNESCO-ve jednadžbe, pri čemu će se umjesto računanja jednadžbi za salinitet i temperaturu, koristiti jednadžba za udio koncentracije. Rezultati trodimenzionalnih numeričkih simulacija i navedeni postupak su validirani s prethodnim eksperimentalnim podacima za pozitivne i negativne uzgonske mlazove.

U trećem poglavlju prikazan je postupak izrade modela za predikciju karakteristika negativnih uzgonskih mlazova baziran na strojnom učenju dobiven na temelju velikog broja trodimenzionalnih numeričkih simulacija te su prikazani rezultati za veći broj algoritama strojnog učenja. Potom je primijenjena SHAP tehnika za analizu najutjecajnijih parametara na model te pregled graničnih slučajeva ispuštanja efluenta.

U četvrtom poglavlju razvijena je metodologija za jednosmjerno ugnježđivanje OpenFOAM-ROMS modela. Iz takvog većeg modela preuzeti su i interpolirani podatci uključujući brzine strujanja vode, salinitet i temperatura. Navedena tehnika primijenjena je na trodimenzionalnom modelu stvarne geometrije podmorskog ispusta u gradu Rijeci u području udaljenom 50 metara oko ispusta. Analizirani su rezultati numeričke simulacije za zimske i ljetne uvjete strujanja mora.

U petom poglavlju prikazane su mogućnosti primjena satelitskih snimki na analizu ponašanja podmorskih ispusta. Pružen je uvid u dostupne metode daljinskog istraživanja te mogućnosti za praćenje onečišćenja putem satelitskih snimki. Opisane su vrste predobrade snimki kako bi se smanjio utjecaj različitih vanjskih faktora koji mogu negativno utjecati na rezultate. Navedene su neke od dostupnih baza podataka te je opisan postupak za preuzimanje i analizu satelitskih snimki. Prikazani su rezultati analize rada podmorskog ispusta te su na temelju toga doneseni zaključci o ponašanju i utjecajnim faktorima. Rezultati su uspoređeni s numeričkim modelom.

U šestom poglavlju naveden je zaključak provedenih istraživanja te su opisane daljnje mogućnosti istraživanja.

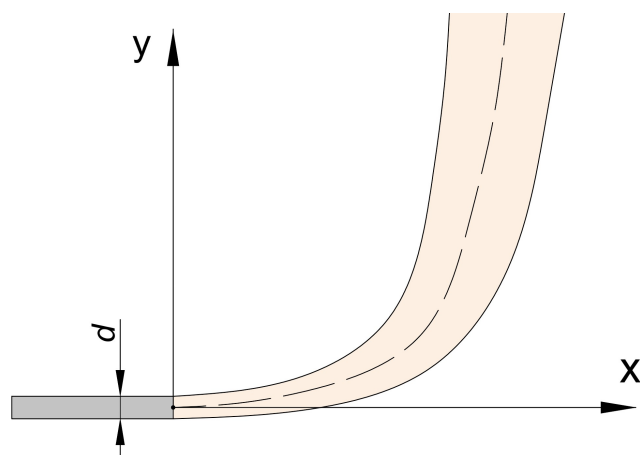
## 2 NUMERIČKO MODELIRANJE UZGONSKIH MLAZOVA

U ovom poglavlju opisani su mogući načini miješanja efluenta i recipijenta, te je detaljnije pružen uvid u pozitivne i negativne uzgonske mlazove koji će se promatrati u sklopu ovog doktorskog rada. Opisane su metode korištene pri numeričkom modeliranju. Potom su navedene postavke i predstavljeni rezultati numeričkih modela za pozitivne i negativne uzgonske mlazove.

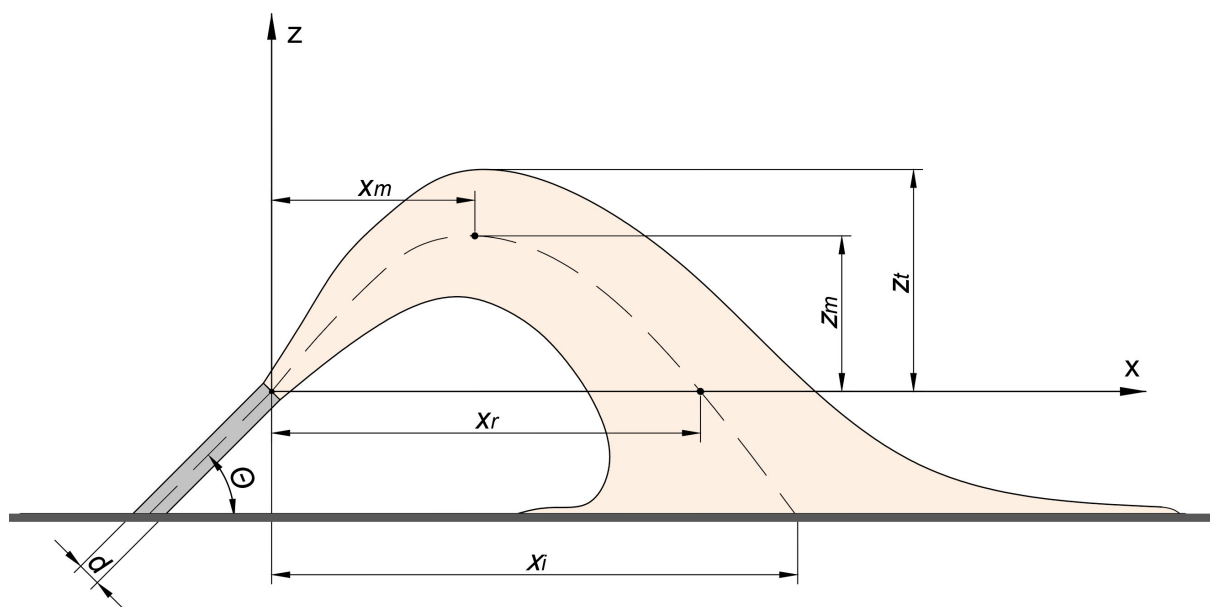
### 2.1 Miješanja efluenta i recipijenta

Pojava miješanja efluenta i recipijenta kod podmorskih ispusta pod utjecajem je dva glavna čimbenika: brzine istjecanja, te razlike u gustoći između efluenta i recipijenta, stoga razlikujemo tri različite pojave. Ukoliko se promatra miješanje efluenta iste gustoće kao i recipijenta s određenom početnom brzinom istjecanja, pojavit će se mlaz (engl. *jet*) pod utjecajem inercijalnih sila. Pri miješanju efluenta i recipijenta različite gustoće, a zanemarivo male brzine istjecanja, dominantan utjecaj će imati uzgonske sile stvarajući perjanicu (engl. *plume*). Kod analize efluenta koji ima različitu gustoću i početnu brzinu, nastat će uzgonski mlaz (engl. *buoyant jet*) pod utjecajem oba čimbenika. U blizini ispusta dominantan utjecaj će imati inercijalne sile, dok će udaljavanjem od ispusta dominantan utjecaj imati uzgonske sile, na taj način stvarajući uzgonske mlazove. Ova pojava je najčešća kod podmorskih ispusta jer efluenti imaju početnu brzinu istjecanja te različitu gustoću u odnosu na morsku vodu zbog različite temperature ili saliniteta.

Pri ispuštanju efluenta početne brzine mlaza  $U_0$  i gustoće  $\rho_e$  manje od gustoće recipijenta  $\rho_r$  nastaje pozitivan uzgonski mlaz, čija je shema prikazana na slici 2.1. U početnom dijelu nakon ispuštanja, smjer je uvjetovan usmjerenjem sapnice te brzinom. Zbog turbulentnog ponašanja efluenta, u tom dijelu je najintenzivnije miješanje s okolnom vodom. Potom uzgonski efekti postaju dominantniji, pa se mlaz efluenta uspinje dok uzgonske sile ne postanu nula na morskoj površini ili terminalnoj visini (u slučaju stratifikacije mora) te se potom dalje širi putem morskih struja i difuzijom.

Slika 2.1: Shema pozitivnog uzgorskog mlaza pri  $\rho_e < \rho_r$ 

Kod analize uzgorskih mlazova osnovna karakteristika koja se promatra je trajektorija, tj. središnja linija (engl. *centerline*) koja predstavlja lokacije maksimalne koncentracije ili brzine za različite poprečne presjeke mlaza koja je na slikama 2.1 i 2.2 označena kao crtkana linija. Prethodna istraživanja pokazala su malu razliku između središnjih linija za koncentracije i brzine [99]. Središte Kartezijevog koordinatnog sustava kod analiza oba tipa uzgorskih mlazova se postavlja u središte izlaznog poprečnog presjeka sapnice promjera  $d$ . Pretpostavka je da je oblik sapnice okrugli.

Slika 2.2: Shema negativnog uzgorskog mlaza pri  $\rho_e > \rho_r$  s karakterističnim točkama [12]

Kod ispuštanja efluenta početne izlazne brzine  $U_0$  i veće gustoće u odnosu na recipijent nastaje negativni uzgorski mlaz prikazan na slici 2.2. Zbog početne količine gibanja uzrokovanog

brzinom na izlazu iz sapnice, mlaz se penje do određene visine. Nakon što dosegne maksimalnu visinu uzgonske sile postaju dominantnije i mlaz se vraća na dno te se dalje širi putem morskih struja [94]. Zbog toga se negativni uzgonski mlazovi često postavljaju pod određenim kutom  $\theta$ .

Kod analize negativnih uzgonskih mlazova često se promatra pet karakterističnih točaka. Koordinate  $x_m$  i  $z_m$  predstavljaju horizontalni i vertikalni položaj najviše lokacije središnje linije (engl. *horizontal and vertical locations of the centerline peak*). Terminalna visina uspona  $z_t$  (engl. *terminal rise height*) definirana je kao mjesto gdje koncentracija pada na 5% koncentracije na središnjoj liniji [53]. Lokacija povratne točke  $x_r$  (engl. *return point location*) definirana je na poziciji gdje uzgonski mlaz prolazi visinu sapnice, određenu pomoću koordinata  $(x_r, 0)$ . Lokacija udarne točke  $x_i$  (engl. *impact point location*) predstavlja mjesto gdje središnja linija dodiruje dno. U toj točki javlja se najveća razina koncentracije na morskom dnu koje se onda dalje razrjeđuje u ostalim smjerovima, no puno manjom brzinom razrjeđivanja.

Uzgonski mlazovi su primarno karakterizirani s 3 parametra: volumnim protokom  $Q$ , inercijalnim silama  $M$  i uzgonom  $B$ , koji se mogu izraziti preko sljedećih formula [94]:

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 U_0 \quad (2.1)$$

$$M = U_0 Q \quad (2.2)$$

$$B = g'_0 Q \quad (2.3)$$

gdje je  $U_0$  početna brzina mlaza, a  $g'_0$  reducirano ubrzanje sile teže koje se može izračunati na sljedeći način:

$$g'_0 = g \frac{|\rho_e - \rho_r|}{\rho_r} \quad (2.4)$$

pri čemu oznaka  $g$  predstavlja ubrzanje sile teže [ $\text{m/s}^2$ ]. Prethodna istraživanja pokazala su snažnu korelaciju između ponašanja uzgonskih mlazova i denzimetrijskog Froudeovog broja  $Fr$  koji se može izračunati na sljedeći način:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g'_0 d}} \quad (2.5)$$

Za usporedbu i analizu rezultata, posebice kod negativnih uzgonskih mlazova, često se prim-

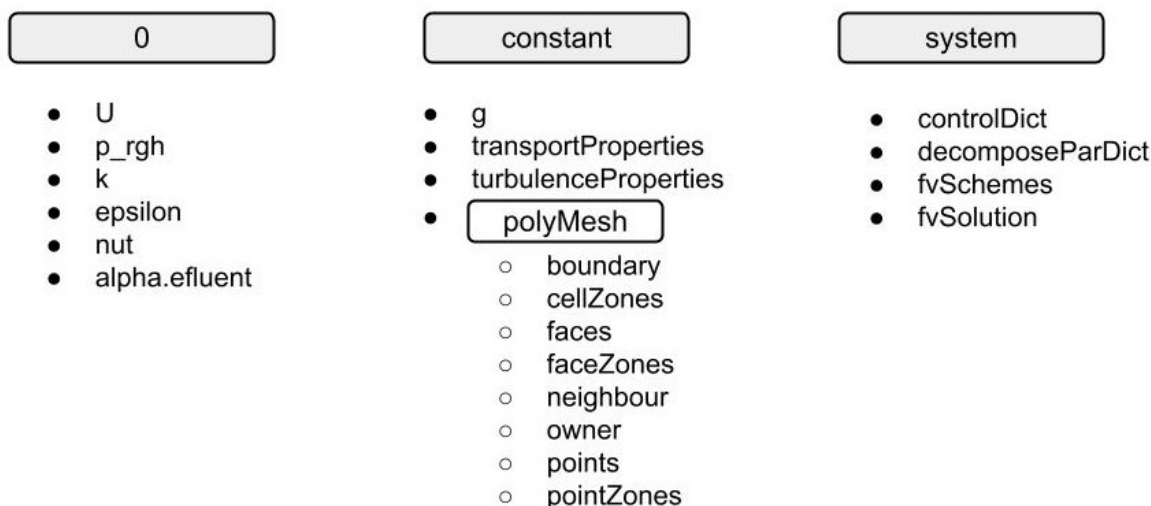
jenjuje momentno-uzgonska duljina skale  $L_M$  (engl. *momentum-buoyancy length scale*) koja predstavlja duljinu na kojoj inercijalne sile  $M$  imaju veći utjecaj od uzgonskih sila  $B$ , a definirana je na sljedeći način [39]:

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} dFr \quad (2.6)$$

## 2.2 Numeričko modeliranje u OpenFOAM-u

Numeričko modeliranje podmorskih ispusta se bazira na rješavanju matematičkih modela koji se temelje na parcijalnoj diferencijalnoj Navier-Stokes jednadžbi i jednadžbi očuvanja mase. U ovom radu numeričko modeliranje će se provoditi pomoću OpenFOAM-a. OpenFOAM je programski paket implementiran u C++ objektno orijentiranom programskom jeziku. Uglavnom se primjenjuje na računalnu dinamiku fluida, no također omogućava modeliranje pojava prijenosa topline, akustike, turbulencije, kemijskih reakcija, mehanike čvrstih tijela te financija, stoga se često primjenjuju u inženjerstvu i znanosti. Sastoji se od kompleta rješavača, biblioteka i niza dodatnih funkcija za analizu računalnih modela. S obzirom da se bazira na programskom paketu otvorenog koda, korisnicima je omogućeno mijenjanje, prilagođavanje i poboljšavanje njegovih mogućnosti. OpenFOAM je namijenjen za Linux operativni sustav. S obzirom da nema korisničko sučelje, bazira se na izmjeni datoteka i pokretanju naredbi pomoću konzole ili bash skripti. Vizualizacija rezultata provodi se pomoću programa ParaView.

Slika 2.3 prikazuje osnovnu strukturu mapa i datoteka u OpenFOAM-u za primjer koji će se koristiti u nastavku rada. Prije početka proračuna, model se najčešće sastoji od 3 podmape. U podmapu *system* nalaze se datoteke u kojima su određene postavke izračuna simulacije kao što je rješavač, trajanje simulacije, vremenski korak, postavke paralelizacije i slično. Podmapa *constant* sadrži podatke o svojstvima fluida i parametrima modela turbulencije fluida, turbulenciji te podmapu *polyMesh* s podacima o numeričkoj mreži. U podmapu *0* nalaze se podatci o rubnim i početnim uvjetima na plohama domene. Umjesto podmape *0* može se nalaziti i neki drugi broj koji prikazuje početni trenutak izvođenja simulacije. Tijekom izvođenja proračuna generiraju se dodatne podmape s novim vremenskim trenucima s datotekama u koje su spremljeni rezultati te opcionalno podmape kao što je *postProcessing*.



Slika 2.3: Struktura OpenFOAM modela te prikaz podmapa i datoteka

Modeliranje turbulencije u OpenFOAM-u može se izvršiti s nekim od modela koji spadaju u tri osnovne kategorije, uključujući DNS (engl. *Direct Numerical Simulation*), LES (engl. *Large Eddy Simulation*) i RANS (engl. *Reynolds Averaged Navier Stokes*). Osim navedenih kategorija, danas je dostupan niz postupaka koji predstavljaju kombinacije metoda. S obzirom da se u DNS modelima rješava puni raspon turbulentnih skala, takav pristup iziskuje jake računalne resurse, stoga se ne primjenjuje kod modeliranja podmorskih ispusta. Kod LES pristupa se veliki vrtlozi računaju numerički, a manji se matematički modeliraju pomoću pod mrežnih modela (engl. *sub-grid models*). RANS pristup predstavlja dodatno pojednostavljenje te se modeli baziraju na Reynoldsovim usrednjenjima. Većina istraživanja uzgonskih mlazova se bazira na RANS ili LES simulacijama koje će se detaljnije analizirati u ovom radu.

Prethodna istraživanja [61, 59] su pokazala da se najbolje modeliranje negativnih i pozitivnih uzgonskih mlazova na temelju RANS modela može dobiti s *realizable*  $k - \epsilon$  turbulentnim modelom uz niže vrijeme potrebno za izračun, stoga će se taj model koristiti u daljnjoj analizi. Implementacija *realizable*  $k - \epsilon$  turbulentnog modela [103] u OpenFOAM-u se bazira na rješavanju dvije dodatne transportne jednačbe za kinetičku energiju  $k$  [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] i disipaciju kinetičke energije turbulencije  $\epsilon$  [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P - \rho \epsilon \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P + C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.8)$$



gdje je  $\rho$  gustoća [kg/m<sup>3</sup>],  $t$  vrijeme [s],  $\mathbf{U}$  vektor brzine [m/s],  $\nu_t$  turbulentna vrtložna viskoznost [m<sup>2</sup>/s],  $\nu$  dinamički viskozitet [kg/ms],  $\sigma_k$  i  $\sigma_\epsilon$  turbulentni Prandtlov broj za  $k$  i  $\epsilon$ ,  $P$  izvor/ponor varijabli  $k$  i  $\epsilon$ . Vrijednosti koeficijenata za ovaj model iznose  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\epsilon = 1,2$ ,  $C_2 = 1,9$ . U odnosu na standardni  $k - \epsilon$  model, navedeni model uključuje dodatne uvjete i modifikacije koeficijenata za smanjenje osjetljivosti modela na rezoluciju mreže te poboljšanje točnosti predviđanja, posebno u složenim tokovima i kod većeg vrtloženja što je osobito bitno kod uzgonskih mlazova.

Dva najčešće korištena LES modela su model lokalne vrtložne viskoznosti (engl. *wall-adapting local eddy-viscosity*, WALE) i Smagorinsky. WALE se koristi kada je veći utjecaj stijenke zida. S obzirom da se uzgonski mlazovi u ovom istraživanju modeliraju bez utjecaja stijenke, korišten je Smagorinsky LES model kao i u prethodnim istraživanjima [54, 64, 128, 129]. U odnosu na RANS modele, LES ima prednost u tome što može prikazati točnija vrtloženja koja se pojavljuju. Jedna od praktičnijih upotreba LES-a je predviđanje prijelaza i naknadnog turbulentnog procesa miješanja koji se događa u tokovima koji se prostorno razvijaju. Navier-Stokes jednadžbe i jednadžba očuvanja mase se za LES mogu zapisati u sljedećem obliku [129]:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\mu \tilde{u}_i) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

gdje su  $u_i$  i  $u_j$  brzine u  $i$  i  $j$  smjeru [m/s],  $p$  tlak [Pa]. Tilda označava prostorno filtrirane varijable, a gornja linija vremenski usrednjene varijable. Varijabla  $\tau_{ij} = \bar{\rho} \widetilde{u_i u_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j$  predstavlja SGS Reynoldsovo naprezanje. SGS tenzor naprezanja se može izračunati na sljedeći način:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \widetilde{S_{ij}} \quad (2.11)$$

gdje je  $\tau_{kk}$  izotropni dio SGS naprezanja koji se obično može zanemariti za nestlačive tokove kakvi su prisutni kod podmorskih ispusta. Tenzor brzine deformacije može se izračunati kao  $\widetilde{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial u_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial u_i} \right)$ . Vrtložna viskoznost SGS može se izračunati temeljem  $\mu_t = \rho(C_S \Delta^2) \left| \widetilde{S} \right|$  i  $\left| \widetilde{S} \right| = \sqrt{2\widetilde{S_{ij}} \widetilde{S_{ij}}}$  gdje je  $\Delta$  širina LES filtera koja ovisi o dimenzijama mreže, a  $C_S$  Smagorinskijeva konstanta koja iznosi 0,17. Iako se većina prethodnih istraživanja bazirala na usporedbi dinamičkog i običnog Smagorinsky modela, dinamički model je maknut iz novijih verzija OpenFOAM-a, stoga će se ovdje promatrati običan Smagorinsky model prikazan s jednadžbama 2.9 - 2.11.

Kako bi se osigurala konvergencija numeričke tranzijentne simulacije vremenski korak najčešće se prilagođava na temelju CFL broja (engl. *Courant-Friedrichs-Lewy*). CFL broj je bezdimenzijska veličina koja osigurava stabilnost numeričkih simulacija i za trodimenzionalni slučaj se može definirati pomoću sljedeće jednadžbe:

$$CFL = \frac{u_x \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \Delta t}{\Delta y} + \frac{u_z \Delta t}{\Delta z} \quad (2.12)$$

gdje je  $u_x, u_y, u_z$  brzina fluida u smjerovima x, y i z, dok su  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  karakteristične veličina elemenata mreže, a  $\Delta t$  vremenski korak. Kako bi se osigurala stabilnost numeričke simulacije, uobičajeno je da vremenski korak bude prilagođen kriteriju  $CFL \leq 1$ .

Gustoća numeričke mreže može utjecati na rezultate, stoga je bitno osigurati konvergenciju rezultata povećanjem gustoće mreže. Naime kako bi se osigurala konstantna vrijednost CFL-a, smanjenjem veličina elementa mreže, vremenski korak se također smanjuje. Zbog toga bi se trebala pogreška diskretizacije smanjivati, odnosno ići prema nuli. Za provjeru i analizu konvergencije, najčešće se primjenjuje GCI metoda (engl. *Grid Convergence Index*) [93]. GCI daje mjeru koliko je dobivena vrijednost daleko od asimptotske vrijednosti i predstavlja indicaciju koliko bi se rezultati dalje mijenjali s daljnjim ugušćenjem mreže.

GCI se sastoji od nekoliko koraka. Prvi korak se bazira na prikupljanju rezultata za najčešće tri različite mreže s konstantnim omjerom ugušćivanja  $r$ , pri čemu područja dodatnih ugušćenja trebaju biti konzistentna. Također je potrebno odabrati specifičan parametar  $f$  karakterističan za tip problema koji se promatra. To može biti npr. brzina ili tlak u području od interesa. Potom se računa red konvergencije  $p$  pomoću sljedeće formule:

$$p = \ln\left(\frac{f_g - f_s}{f_s - f_f}\right) / \ln(r) \quad (2.13)$$

pri čemu se indeks  $g$  odnosi na grubu vrstu mreže,  $s$  na srednju, a  $f$  na finu. Na temelju Richardsonove ekstrapolacije predviđa se vrijednost veličine mreže za  $h = 0$  pomoću sljedeće jednadžbe:

$$f_{h=0} = f_f + \frac{f_f - f_s}{r^p - 1} \quad (2.14)$$

Potom slijedi računanje GCI indeksa na temelju sljedeće jednadžbe:

$$GCI = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (2.15)$$

gdje je  $\varepsilon$  relativna greška definirana kao  $\varepsilon = \frac{f_s - f_f}{f_f}$ , a  $F_s$  faktor sigurnosti koji za tri ili više mreža najčešće iznosi 3. Kod analize tri mreže GCI se računa posebno za omjer grube i srednje, a posebno za srednju i finu mrežu. Na kraju se provjerava asimptotski raspon konvergencije mreže na temelju sljedeće jednadžbe:

$$\frac{GCI_{s,g}}{r^p \cdot GCI_{f,s}} \simeq 1 \quad (2.16)$$

Kako bi se provjerila točnost numeričkih simulacija, potrebno je usporediti rezultate s eksperimentima. Da bi se kvantificiralo odstupanje između eksperimentalnih rezultata i simulacija najčešće se koristi korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error*, RMSE) i koeficijent determinacije (engl. *coefficient of determination*,  $R^2$ ) koji se mogu izračunati na sljedeći način:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_{i,eksp} - y_{i,sim})]^2} \quad (2.17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(y_{i,eksp} - y_{i,sim})]^2}{\sum_{i=1}^n [(y_{i,eksperiment} - \bar{y})]^2} \quad (2.18)$$

gdje je  $\bar{y}$  prosječna vrijednost, a  $n$  broj podataka.

### 2.3 Redukcija broja varijabli pri miješanju fluida različitih svojstava

Numeričko modeliranje uzgonskih mlazova u OpenFOAM-u prema prethodnoj literaturi uobičajeno se provodi na temelju dva pristupa korištenjem *twoLiquidMixingFoam* rješavača [60, 118, 120, 122, 128] ili rješavanjem diferencijalnih jednadžbi za salinitet i temperaturu [10, 16, 42, 59, 61, 62].

Prvi pristup je korištenje OpenFOAM rješavača *twoLiquidMixingFoam* za miješanje dvije nestlačive tekućine različite gustoće i viskoznosti. Rješavač modelira efekte uzgona i turbulencije, zbog čega se često primjenjuje za ovakav tip problema. Koristi VoF metodu (engl. *Volume of Fluid*) kako bi odredio interakciju između fluida različitih gustoća. Modeliranje se temelji na rješavanju sljedećih 3D nestacionarnih Navier-Stokes jednadžbi, jednadžbe očuvanja mase te fazne advekcijsko-difuzijske jednadžbe za miješanje dva različita fluida:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla \cdot (p_{rgh}) - gh \nabla \rho + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{\tau}) \quad (2.20)$$

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_2 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha_1) = \nabla \cdot \left( (D_{ab} + \frac{\nu_t}{S_c}) \nabla \alpha_1 \right) \quad (2.22)$$

gdje je  $p_{rgh}$  razlika statičkog i hidrauličkog tlaka [Pa],  $h$  visina vodnog stupca [m],  $\tau$  smično naprezanje [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ],  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  fazni udjeli fluida (ili koncentracija),  $D_{ab}$  molekularna difuznost [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $S_c$  turbulentni Schmidtov broj. Pri tome treba biti zadovoljeno da suma faznih udjela iznosi jedan ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ).

Drugi način bazira se na rješavanju diferencijalnih jednadžbi za salinitet i temperaturu gdje se modificiraju postojeći rješavači. Kod takvog pristupa, analiza se bazira na promatranju koncentracije saliniteta i temperature, a gustoća se naknadno dobiva pomoću UNESCO-ve jednadžbe stanja za morsku vodu [73], koja je definirana na sljedeći način:

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{3/2} + CS \quad (2.23)$$

$$A = 8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3}T + 7,6438 \cdot 10^{-5}T^2 - 8,2467 \cdot 10^{-7}T^3 + 5,3875 \cdot 10^{-9}T^4 \quad (2.24)$$

$$B = -5,72466 \cdot 10^{-3} + 1,0227 \cdot 10^{-4}T - 1,6546 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (2.25)$$

$$C = 4,8314 \cdot 10^{-4} \quad (2.26)$$

$$\rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2}T - 9,095290 \cdot 10^{-3}T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6}T^4 + 6,536336 \cdot 10^{-9}T^5 \quad (2.27)$$

gdje je  $\rho_0$  gustoća vode definirana za temperaturu  $T$  s mjernom jedinicom  $^{\circ}\text{C}$ , a  $S$  je salinitet. Ovaj pristup limitiran je za raspon temperature  $0^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$  i saliniteta  $0 < S < 70$  [72]. UNESCO-va jednadžba stanja također se koristi u drugim slučajevima, npr. kod eksperimentalnih mjerenja u kojima je puno lakše izmjeriti pojedinačno salinitet i temperaturu, a onda na temelju ove jednadžbe izračunati gustoću morske vode, zbog čega se često primjenjuje u oceanografiji.

S obzirom na karakteristike gustoća i temperatura recipijenta i efluenta kod uzgonskih mlazova možemo razlikovati tri glavna načina modeliranja uzgonskih mlazova. Kod veoma malih razlika u gustoći fluida, ponašanje se može opisati pomoću pasivnog skalara [38] pri čemu se pretpostavlja jednaka gustoća efluenta i recipijenta ( $\rho_e = \rho_r$ ). Kod veoma velikih i kompleksnih

problema uz značajno različite temperature efluenta i recipijenta, potrebno je rješavanje energetske jednadžbe kako bi se dobilo točno ponašanje izmjene topline i promjene temperature. Ovaj pristup je računski mnogo zahtjevniji od prvog, zbog dodatne diferencijalne jednadžbe koju je potrebno riješiti.

Treći pristup predstavlja kombinaciju navedena prethodna dva te se primjenjuje za nešto veće razlike gustoće, koje nisu rijetkost kod podmorskih ispusta, a bazira se na Boussinesqovoj aproksimaciji. Na ovaj način se gustoća tretira kao varijabla samo u gravitacijskim članovima u kojima ima najviše utjecaja na rezultate, umjesto u svim članovima diferencijalnih jednadžbi [126]. Boussinesqova aproksimacija je implementirana u prethodno opisani *twoLiquidMixingFoam* rješavač. Neki autori kod rješavanja diferencijalnih jednadžbi za salinitet i temperaturu također primjenjuju Boussinesqovu aproksimaciju. Međutim, za izračun promjene gustoće, kod ovakvog pristupa je potrebno izračunavati UNESCO-vu jednadžbu stanja za svaki korak i cijelu domenu.

Zbog toga se predlaže novi pristup, koji se temelji na računanju UNESCO-ve jednadžbe stanja u kombinaciji s korištenjem *twoLiquidMixingFoam* rješavača. Predlaže se zamjena rješavanja dviju advekcijsko-difuzijskih jednadžbi za salinitet i temperaturu s rješavanjem jedne jednadžbe za fazni udio (2.19-2.22), dok se UNESCO-va jednadžba stanja (2.23-2.27) računa samo na početku, što rezultira znatno manjim računalnim naporom. Navedeni pristup kombinira polja temperature i saliniteta u jedno polje gustoće koja se definira kao udio faze fluida  $\alpha$ . Prema tome, svakom elementu domene se dodjeljuje vrijednost faze  $\alpha$  prema sljedećoj jednadžbi:

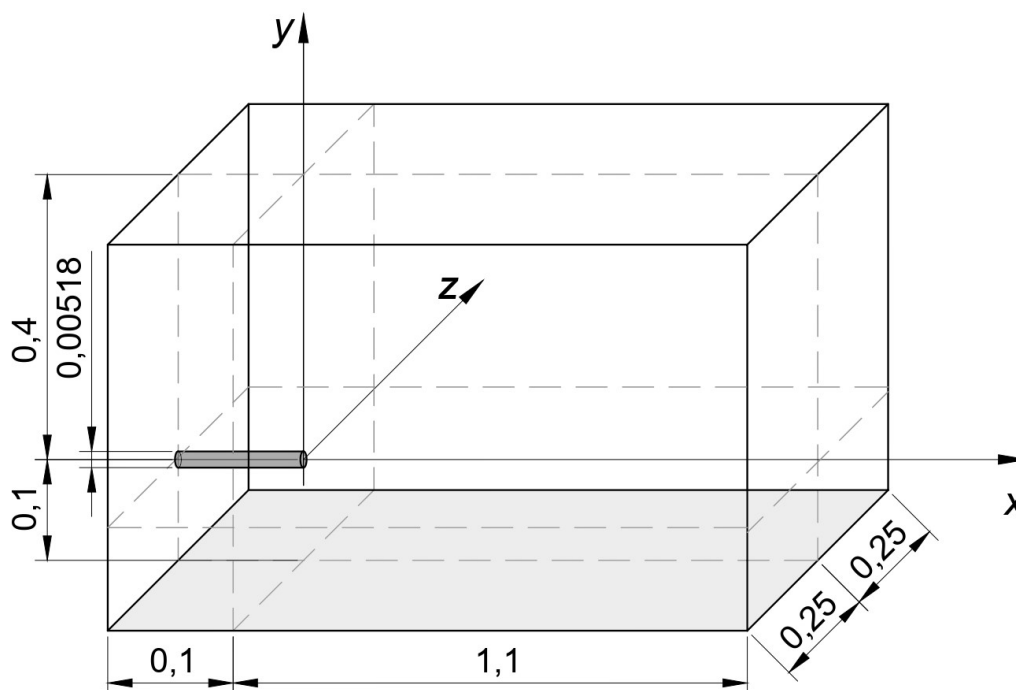
$$\alpha = \frac{\rho_{maks} - \rho}{\rho_{maks} - \rho_{min}} \quad (2.28)$$

gdje je  $\rho$  gustoća odgovarajućeg elementa domene izračunata na temelju temperature i saliniteta,  $\rho_{min}$  je minimalna, a  $\rho_{maks}$  maksimalna gustoća fluida u domeni. Kod pozitivnih uzgonskih mlazova  $\rho_{min}$  je jednaka gustoći efluenta  $\rho_e$ , a  $\rho_{maks}$  je jednaka gustoći recipijenta  $\rho_r$ , a kod negativnih mlazova je obrnuto. Prema tome za pozitivne uzgonske mlazove s uniformnom gustoćom recipijenta, u početnom trenutku  $\alpha$  će iznositi 1, osim na izlazu iz sapnice gdje će iznositi 0. Daljnjim miješanjem fluida, stvorit će se polja različitih faza koja će imati vrijednosti između 0 i 1.

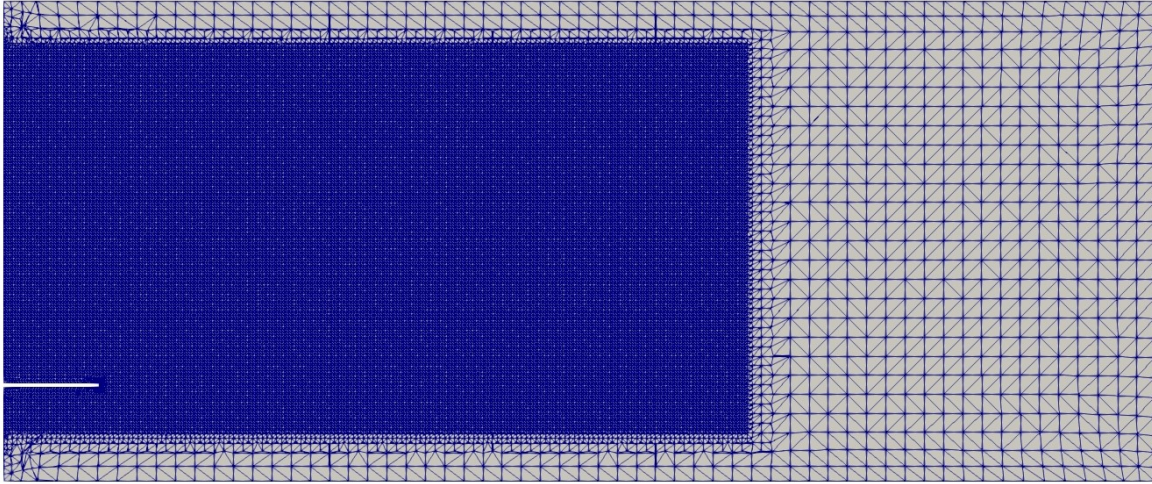
## 2.4 Opis numeričkih modela

### 2.4.1 Pozitivni uzgonski mlazovi

Podmorski ispusti kod kojih se pojavljuju pozitivni uzgonski mlazovi, najčešće imaju sapnice postavljene u horizontalnom smjeru, paralelne s morskim dnom. Eksperimentalno istraživanje za takav ispušt proveli su Alfaifi i sur. [10] i rezultati tog eksperimenta korišteni su za validaciju numeričkog modela u OpenFOAM-u i testiranje predložene metode smanjenja broja varijabli. Domena numeričkog modela je ista kao u eksperimentu i prikazana je na slici 2.4. Navedene dimenzije su u metrima. Sastoji se od spremnika dimenzija 1,2 x 0,5 x 0,5 m, sapnice promjera 5,18 milimetara postavljene 10 centimetara od dna i zida na sredini spremnika. Kako bi se ispitala ovisnost rezultata o numeričkoj mreži, analiza je provedena za tri različite gustoće mreže izrađene pomoću cfMesh programa [56] s ugušćenjima u blizini sapnice. Poprečni presjek mreže srednje gustoće prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.4: Prikaz trodimenzionalne numeričke domene za validaciju pozitivnih uzgonskih mlazova



Slika 2.5: Poprečni presjek numeričke mreže srednje veličine za validaciju pozitivnih uzgonskih mlazova

Provedeni eksperimenti [10] uključivali su analizu utjecaja saliniteta i temperature na ponašanje uzgonskih mlazova, stoga su analizirana dva različita modela kako bi se moglo provjeriti valjanost predložene metode redukcije broja varijabli. U prvom termalnom modelu, salinitet je 0 za oba fluida, dok je temperatura efluenta 38,6 °C, a recipijenta 21,5 °C. Na temelju jednadžbi (2.23-2.27) dobivene su vrijednosti gustoće efluenta 993 kg/m<sup>3</sup> i recipijenta 998 kg/m<sup>3</sup>. U drugom netermalnom slučaju, svojstva efluenta su jednaka svojstvima recipijenta iz termalnog slučaja, dakle temperatura 21,5 °C i gustoća 998 kg/m<sup>3</sup>. Recipijent ima salinitet 6,79 i jednaku temperaturu od 21,5 °C, što na temelju jednadžbi (2.23-2.27) dovodi do gustoće recipijenta od 1003 kg/m<sup>3</sup>. Dakle, oba slučaja imaju jednaku razliku u gustoći od  $\Delta\rho = 5 \text{ kg/m}^3$ .

Na svim površinama osim izlazne površine sapnice i gornje plohe koja predstavlja slobodno vodno lice, postavljen je rubni uvjet zida (*noSlip*) pri čemu je zadano da je brzina fluida uz zid jednaka nuli. S obzirom da je gornja ploha spremnika otvorena, postavljen je rubni uvjet tlaka okoline (engl. *environmental pressure*) i von Neumannov rubni uvjet nultog gradijenta (*zeroGradient* u OpenFOAM-u). Na ulazu sapnice postavljena je uniformna brzina 0,16 m/s kao što je u eksperimentu. Turbulentne varijable  $k$  i  $\epsilon$  računane su na izlaznoj površini mlaznice u početnom trenutku unutar domene na sljedeći način [49]:

$$k = 0,06 \cdot u^2 \quad (2.29)$$

$$\epsilon = 0,06 \cdot u^3/d \quad (2.30)$$

Brzina u cijeloj domeni u početnom trenutku iznosi 0 m/s, dok je fazni udio efluenta  $\alpha = 0$ . Na rubu domene koji odgovara ulazu/izlazu sapnice postavljena vrijednosti  $\alpha = 1$ . S obzirom da je *twoLiquidMixingFoam* tranzijentni rješavač koji opisuje promjenu u vremenu što je nužno kod pojave miješanja, vremenski korak određen je na temelju CFL broja te je u ovom slučaju zbog kompleksnosti postavljen uvjet  $CFL \leq 0,8$ . Simulacija je provedena za period od 100 sekundi. Vrijednosti kinematskog viskoziteta, turbulentnog Schmidtovog broja i difuzivnosti iznose  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, 0,7 i  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

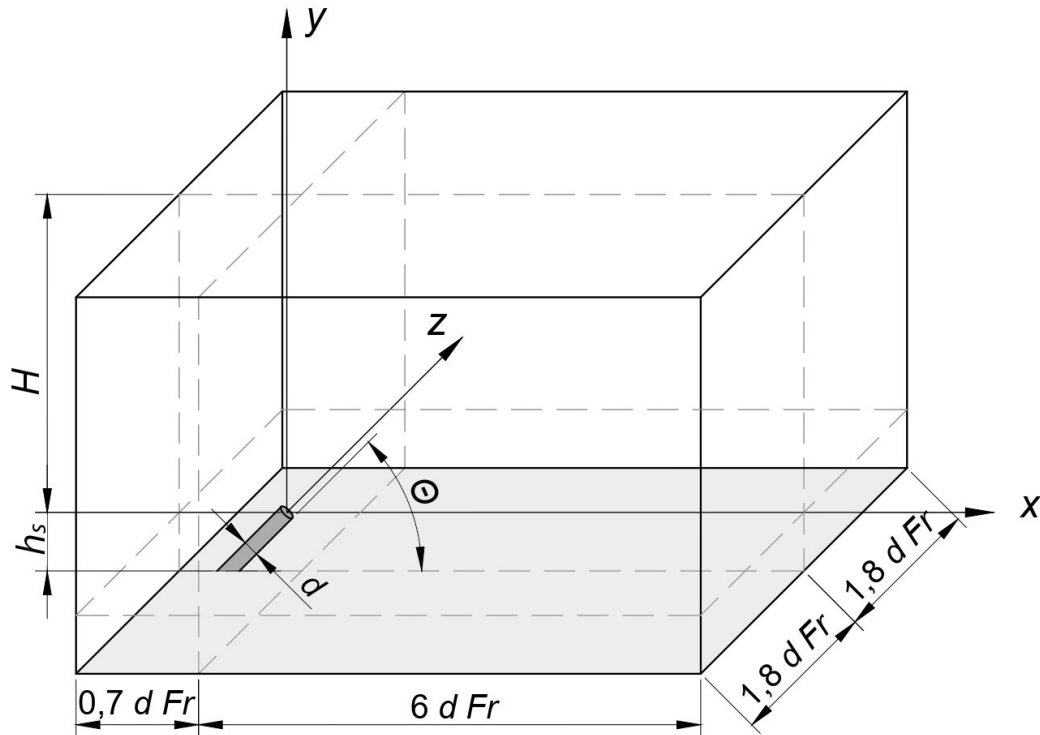
Za vremensku diskretizaciju korištena je implicitna Eulerova metoda drugog reda točnosti, a za Laplaceov diferencijalni operator korištena je Gaussova linearna shema s korekcijom. Gauss vanLeer shema i Gaussova linearna upwind metoda su primijenjeni za izračun  $\alpha$  i  $k$ , dok je Gaussova linearna i Gaussova upwind shema korištena za izračun  $U$  i  $\epsilon$ . Kriterij konvergencije za tlak i brzinu postavljen je na  $10^{-6}$ .

Kako bi se riješilo polje tlaka korištena je PCG metoda (engl. *Preconditioned Conjugate Gradient*) s DIC (engl. *Diagonal incomplete Cholesky*) predkondicionerom. Za rješavanje polja udjela  $\alpha$  korišten je *smoothSolver* uz *symGaussSeide smoother*. Za ostala polja uključujući  $U$ ,  $k$  i  $\epsilon$  primjenjeni su se *smoothSolver* metoda i *GaussSeidel smoother*. Zbog dugotrajnih i kompleksnih proračuna, simulacije su provedene u superračunalnom okruženju pri čemu je korišteno superračunalo Bura Centra za napredno računanje i modeliranje, Sveučilišta u Rijeci.

#### 2.4.2 Negativni uzgonski mlazovi

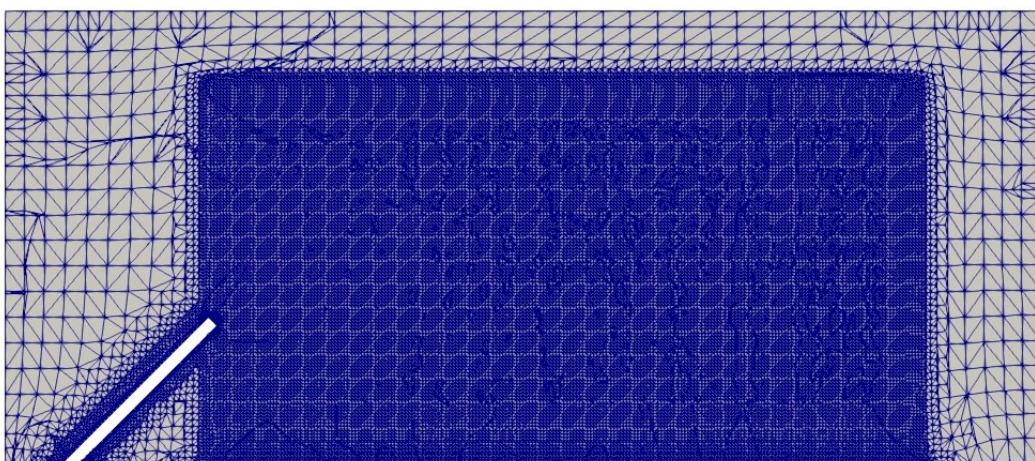
Validacija numeričke simulacije negativnih uzgonskih mlazova bazirana je na istraživanju autora Zhang [127] te Zhang i sur. [128]. Domena je prikazana na slici 2.6 i sastoji se od spremnika dimenzija 0,5 x 0,24 x 0,17 metar, pri čemu su dimenzije određene na temelju umnoška promjera sapnice i Froudovog broja koji u ovom slučaju iznosi 11,3. S obzirom da većina podmorskih ispusta s negativnim uzgonskim efektom ima sapnice postavljene pod određenim kutom, ovdje je analizirana sapnica nagnuta pod 45° promjera 5,8 milimetara. Udaljenost sapnice od dna i površine vode postavljena je tako da se zanemare utjecaji plitkih voda i Coanda efekta, stoga visina sapnice  $h_s$  iznosi 70 milimetara, a udaljenost između sapnice i površine vode  $H$  iznosi 150 milimetara.





Slika 2.6: Prikaz trodimenzionalne numeričke domene za validaciju negativnog uzgonskog mlaza [12]

Pomoću cfMesh programa napravljene su tri numeričke mreže različitih gustoća, pri čemu je ugušćenje postavljeno u blizini ulaza sapnice i očekivane putanje efluenta kako bi se adekvatno opisalo miješanje i kompleksno ponašanje efluenta u tom dijelu. Poprečni presjek srednje mreže prikazan je na slici 2.7.



Slika 2.7: Poprečni presjek numeričke mreže srednje veličine za validaciju negativnih uzgonskih mlazova

Brzina na izlazu iz sapnice postavljena je na 0,515 m/s, dok je početna brzina u domeni 0

m/s. Kako bi se osiguralo da nema utjecaja bočnih zidova, na bočne plohe domene postavljen je ulazno-izlazni rubni uvjet (u OpenFOAM-u *inletOutlet*). Ako fluid izlazi iz domene, *inletOutlet* rubni uvjet se ponaša kao von Neumannov, a kod povratka fluida ili ulaska u domenu kao Dirichletov, tj. ima konstantnu vrijednost brzine, koja je u ovom slučaju zadana kao 0 m/s.

Na gornjoj plohi je postavljen *freeSlip* rubni uvjet čime se omogućava gibanje fluida po toj plohi bez izlaska iz domene, dok su sapnice i dno tretirani kao zidovi rubnim uvjetom *noSlip* i standardnim turbulentnim funkcijama zida. Kao i kod pozitivnih uzgonskih mlazova, korišten je RANS *realizable k - ε* turbulentni model s intenzitetom turbulencije 10%. Osim navedenoga, primijenjen je LES Smagorinsky turbulentni model na istoj domeni i sa svim jednakim postavkama simulacije.

Kao i kod pozitivnih uzgonskih mlazova, primijenjen je rješavač *twoLiquidMixingFoam*, pri čemu je početni fazni udio  $\alpha$  u domeni jednak 0, dok je na izlazu iz sapnice postavljena vrijednost  $\alpha = 1$ . Gustoća efluenta iznosi  $1034 \text{ kg/m}^3$ , a recipijenta  $997 \text{ kg/m}^3$ . Vremenski korak prilagođen je zadanom uvjetu  $CFL \leq 1$ , kako bi se osigurala konvergencija i stabilnost numeričkog modela. Vrijednosti kinematskog viskoziteta, turbulentnog Schmidtovog broja i difuzivnosti iste su kao kod pozitivnih uzgonskih mlazova. Za  $U$  i  $k$  korištena je Gauss upwind shema. Za izračun polja  $U$ ,  $k$  i  $\epsilon$ , korištena je PBiCGStab metoda (engl. *preconditioned bi-conjugate gradient*) s DILU (engl. *diagonal incomplete LU*) predkondicionerom. Ostale postavke numeričkog modela jednake su kao kod simulacija pozitivnih uzgonskih mlazova. Simulacije su provedene za period od 120 sekundi dok su rezultati usrednjeni za vrijeme između 50 i 120 sekundi prema [128]. Za proračun modela, također je korišteno superračunalo Bura Centra za napredno računanje i modeliranje, Sveučilišta u Rijeci.

## 2.5 Rezultati numeričkih simulacija

### 2.5.1 Pozitivni uzgonski mlazovi

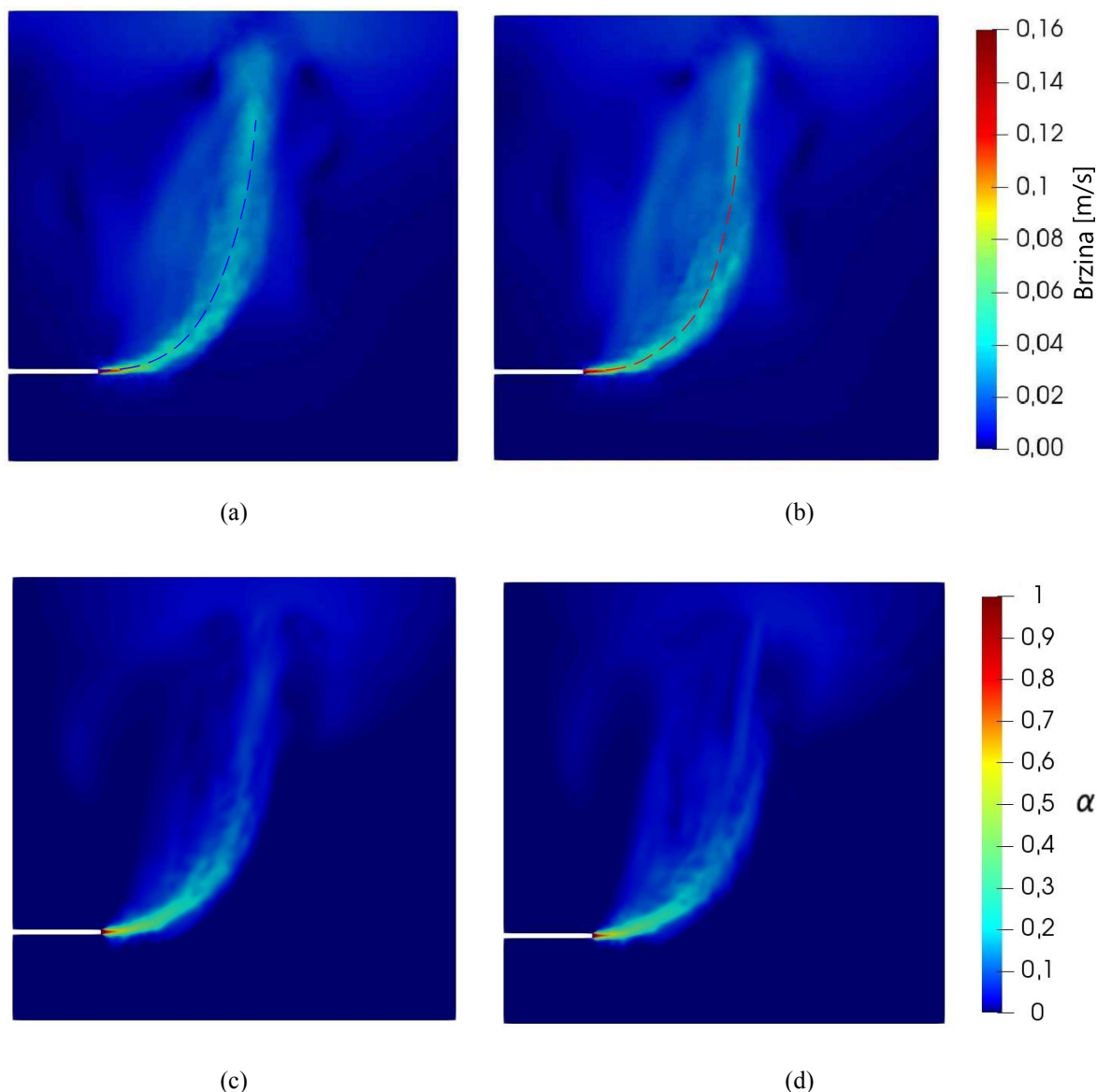
Kako bi se odredila adekvatna veličina mreže uspoređene su vrijednosti parametara mreža s tri različite gustoće od  $5,46 \cdot 10^5$ ,  $1,22 \cdot 10^6$  i  $2,61 \cdot 10^6$  elemenata, pri čemu je korištena GCI tehnika prethodno opisana jednadžbama (2.13-2.16). Uspoređivani parametar u ovom tipu problema je vremenski usrednjena magnituda brzine središnje linije na udaljenosti  $x = 20 \text{ mm}$  od središta sapnice i rezultati su prikazani u tablici 2.1. Središnja linija dobivena je na temelju maksimalnih vrijednosti brzina za različite poprečne presjeke. Rezultati su uspoređeni za termalni i netermalni

model. Može se uočiti konvergencija vrijednosti brzine, povećanjem broja elemenata prema asimptotskom rasponu za oba slučaja  $GCI_{s,f}/(r^p \cdot GCI_{g,s}) \sim 1$ . Iz opisanih rezultata može se zaključiti da se u nastavku za sva daljnja numerička ispitivanja može koristiti srednja gustoća numeričke mreže.

Tablica 2.1: Vrijednosti GCI za vremensku usrednjenu brzinu  $u$  na udaljenosti  $x = 20$  mm koja se nalazi na središnjoj liniji [11]

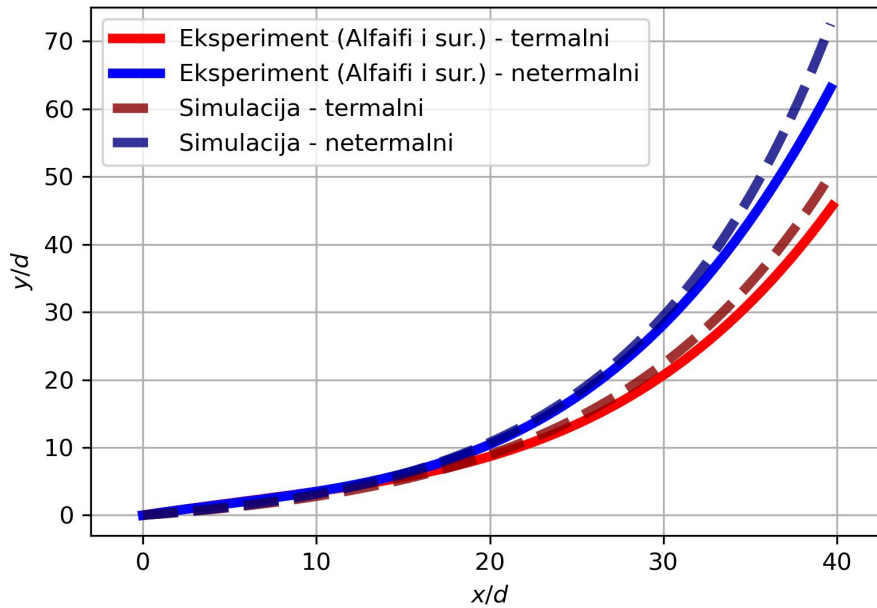
Vrsta mreže	Broj elemenata	Omjer ( $r$ )	Netermalni		Termalni	
			$u$ [m/s]	GCI [%]	$u$ [m/s]	GCI [%]
Gruba	546.337	-	0,000973	-	0,000968	-
Srednja	1.218.156	1,3	0,001415	9,17%	0,001262	29,99%
Fina	2.614.418	1,3	0,001506	1,96%	0,001416	14,98%

Rezultati raspodjele usrednjene brzine za netermalni i termalni model prikazani su na slikama 2.8 (a) i (b), dok su na slikama (c) i (d) prikazane vrijednosti faznog udjela  $\alpha$ . U početnom dijelu mlaza inercijalne sile su snažnije te je brzina veća. Udaljavanjem od sapnice uzgonske sile postaju dominantnije, stoga se mlaz kreće penjati prema površini dok ne dođe do nje. U netermalnom slučaju koji ima veću gustoću, udaljenost na kojoj uzgonske sile postaju dominantnije je manja u odnosu na termalni slučaj.



Slika 2.8: Konture brzine za (a) netermalni i (b) termalni slučaj te koncentracije za (c) netermalni i (d) termalni slučaj. Crtkana linija predstavlja trajektoriju.

Na slici 2.9 uspoređeni su eksperimentalni i numerički rezultati termalnog i netermalnog modela za vremenski usrednjene središnje linije dobivene na temelju brzina, kao u istraživanju [10] s kojim se uspoređuju rezultati. Vrijednosti su uspoređene u obliku bezdimenzijskih koordinata, pri čemu su vrijednosti središnje linije podijeljene s promjerom sapnice  $d$ . Razlike vrijednosti za termalni slučaj iznose  $RMSE = 1,63$ , a  $R^2 = 0,9823$ , dok za netermalni slučaj iznose  $RMSE = 2,2$  i  $R^2 = 0,9838$ . Iz navedenih rezultata može se uočiti dobro podudaranje numeričkih simulacija s eksperimentalnim vrijednostima te se može zaključiti da je pristup redukcije broja varijabli adekvatna za primjenjivanje na ovakvom tipu problema. Modeli mogu predvidjeti ponašanje mlazova, bez poznavanja vrijednosti gustoća.



Slika 2.9: Usporedba vremenski usrednjenih središnjih linija između eksperimentalnih rezultata [10] i numeričkih simulacija za termalni i netermalni slučaj

## 2.5.2 Negativni uzgonski mlazovi

Za odabir adekvatne gustoće mreže kod negativnih uzgonskih mlazova također je primijenjena GCI metoda. Uspoređene su horizontalne i vertikalne lokacije vrha središnje linije  $x_m$  i  $z_m$ , za tri različite gustoće mreže s  $5,76 \cdot 10^5$ ,  $1,43 \cdot 10^6$  u  $3,05 \cdot 10^6$  elemenata prikazane u tablici 2.2 za RANS simulaciju. Iz rezultata se može uočiti konvergencija vrijednosti lokacija povećanjem gustoće mreže prema  $GCI_{s,f} / (r^p \cdot GCI_{g,s}) \sim 1$  stoga je mreža srednje veličine odabrana kao adekvatna za daljnju analizu.

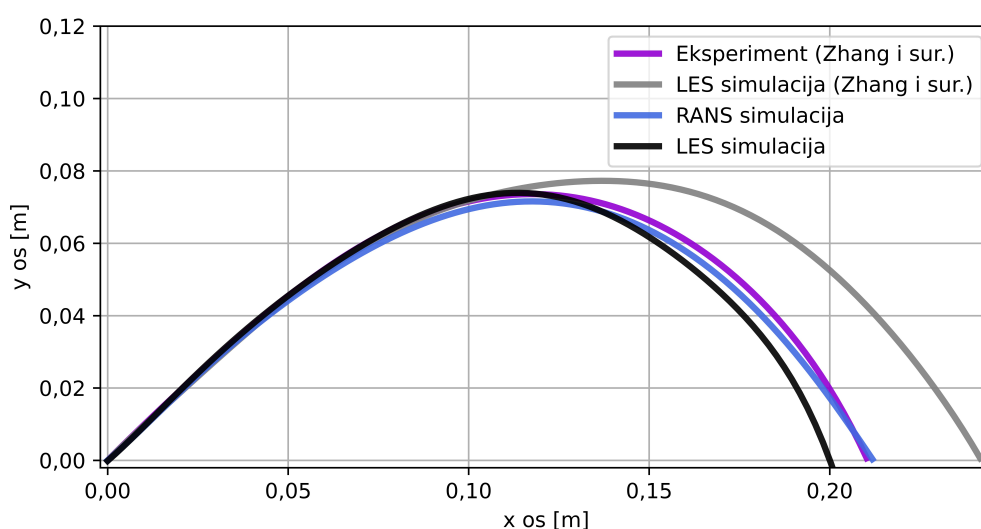
Tablica 2.2: GCI za vremenski usrednjenu horizontalnu i vertikalnu lokaciju vrha središnje linije  $x_m$  i  $z_m$  [12]

Vrsta mreže	Broj elemenata	Omjer ( $r$ )	$x_m$ [m]	$GCI_{x_m}$ [%]	$z_m$ [m]	$GCI_{z_m}$ [%]
Gruba	675.852	-	0,11197	-	0,0639	-
Srednja	1.431.118	1,3	0,11893	7,211	0,07153	3,676
Fina	3.047.282	1,3	0,12236	3,396	0,07315	0,746

Slika 2.10 prikazuje usporedbu rezultata RANS i LES simulacije sa srednjom gustoćom mreže te vrijednosti eksperimenta i prethodno provedene LES simulacije [128]. Središnja linija analizirana je na temelju usrednjenih vrijednosti koncentracije  $\alpha$  za različite vertikalne poprečne presjeke, kao u radu s kojim se uspoređuju rezultati. Vrijednosti RMSE između RANS simu-

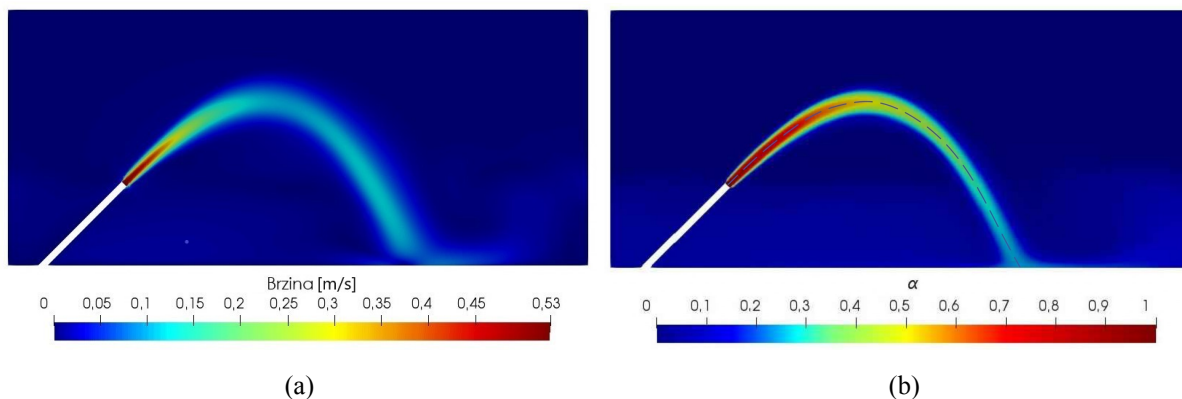
lacije i eksperimentalnih rezultata iznosi 0,0028, dok je  $R^2$  0,98.

Iz grafa se može uočiti da se s LES simulacijom provedenom u ovom istraživanju, dobivaju točniji rezultati u početnom dijelu mlaza gdje dominiraju uzgonske sile. Međutim, udaljavanjem od sapnice i povećanjem utjecaja uzgonskih sila, povećava se razlika između rezultata LES simulacije u odnosu na eksperimentalna istraživanja, što rezultira većim ukupnim odstupanjem u odnosu na RANS model. RMSE za rezultate LES simulacija i eksperimentalnih rezultata iznosi 0,01158, a  $R^2$  0,73. Stoga se može zaključiti da RANS model veoma dobro opisuje eksperimentalne uvijete te da se s ovakvim postavkama numeričkog modela mogu dobiti bolji rezultati u odnosu na LES simulaciju provedenu u sklopu ovog i prethodnog istraživanja [128].



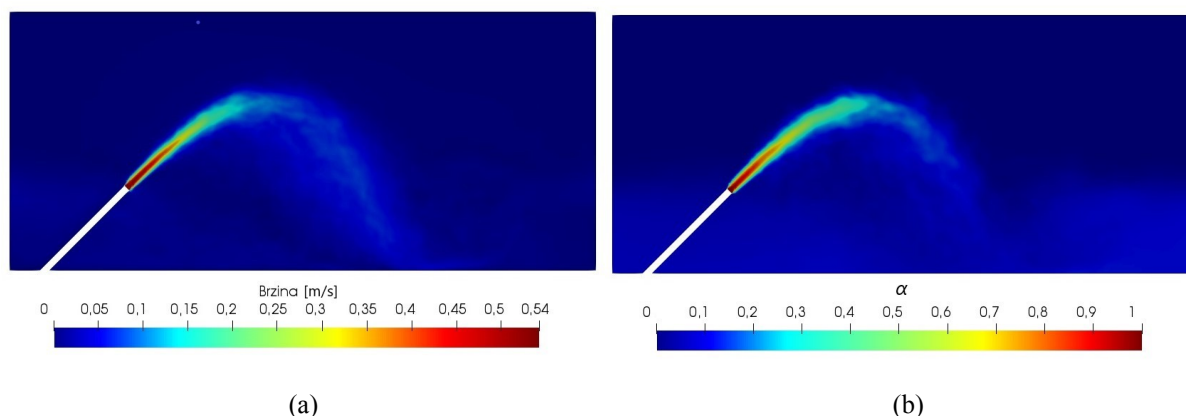
Slika 2.10: Usporedba središnje linije za RANS i LES simulacije s prethodno provedenim eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima [128]

Na slici 2.11 prikazane su konture vremenski usrednjene brzine i faznih udjela po središnjem presjeku RANS simulacija, pri čemu crtkana linija na slici (b) prikazuje središnju liniju mlaza sa slike 2.10. Može se uočiti da se mlaz penje u početnom dijelu zbog velike brzine, a potom pada na dno zbog utjecaja gravitacije. Zbog toga na dnu ostaje sloj s povećanom koncentracijom kao što je vidljivo na slici 2.11 (b). Udaljavanjem od presjeka sapnice, snažno se smanjuju fazni udio i brzina, stoga se najjače razrjeđivanje dešava u početnoj zoni prije nego što mlaz krene padati. Promatranjem područja dalje od središnje linije, smanjenje brzine je veće od razrjeđivanja.



Slika 2.11: Konture vremenski usrednjene (a) brzine i (b) udio koncentracije  $\alpha$  na središnjem presjeku RANS simulacije [12]

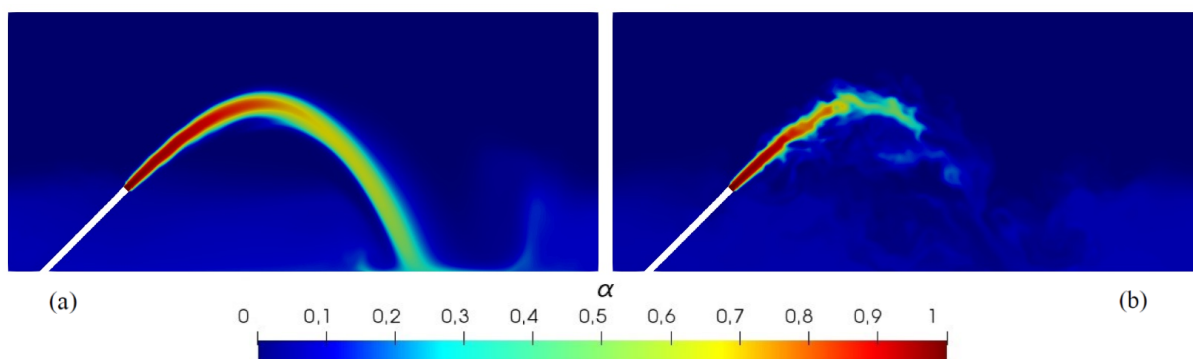
Slika 2.12 prikazuje konture vremenski usrednjenih faznih udjela  $\alpha$  i brzine za LES simulaciju. Može se uočiti slično ponašanje mlaza kao na slici 2.11, međutim kod LES-a je izraženije turbulentno ponašanje mlaza i vrtloženje koje pritom nastaje. Zbog toga su koncentracije manje što se mlaz više približava dnu u odnosu na RANS model.



Slika 2.12: Konture vremenski usrednjene (a) brzine i (b) udio koncentracije  $\alpha$  na središnjem presjeku LES simulacije

Na slici 2.13 prikazani su rezultati udjela koncentracije  $\alpha$  za RANS i LES model nakon 120 sekundi. Iz prikaza se može uočiti velika razlika u fluktuaciji mlaza kod LES simulacije u odnosu na RANS model. Kod RANS modela za navedeni trenutak, koncentracija efluenta od 0,5 se nalazi na lokaciji udarne točke, dok kod LES simulacije mlaz poprima navedenu koncentraciju poslije najviše lokacije središnje linije. Iz prethodnih eksperimentalnih istraživanja negativnih uzgonskih mlazova [16, 108, 128], može se uočiti da je stvarno ponašanje miješanja efluenta i recipijenta sličnije rezultatima dobivenima pomoću RANS nego LES simulacija.





Slika 2.13: Usporedba rezultata udijela koncentracije  $\alpha$  nakon 120 sekundi za (a) RANS i (b) LES simulaciju

Temeljem prikazanih rezultata, može se zaključiti da se rezultati OpenFOAM RANS simulacija veoma dobro podudaraju s eksperimentalnim vrijednostima, te da se mogu koristiti za predviđanje pozitivnih i negativnih uzgonskih mlazova. Osim toga, može se zaključiti da se pristup smanjenja broja varijabli korištenjem *twoLiquidMixingFoam* rješavača umjesto diferencijalnih jednadžbi za salinitet i temperaturu može uspješno primijeniti na uzgonske mlazove. Stoga se navedene postavke numeričkih modela mogu koristiti za daljnju analizu.



### 3 PRIMJENA STROJNOG UČENJA ZA MODELIRANJE UZGONSKIH MLAZOVA

Prilikom izgradnje i dimenzioniranja podmorskih ispusta nužna je analiza velikog broja uvjeta strujanja. S obzirom da pojedinačne eksperimentalne i numeričke analize mogu biti vremenski veoma zahtjevne, predlaže se primjena strojnog učenja (engl. *machine learning*, ML) za analizu ponašanja uzgonskih mlazova. Navedenom metodom moguće je u veoma kratkom vremenu predvidjeti karakteristike ispusta za velik broj geometrija sapnica i parametara strujanja.

Baze za modele strojnog učenja mogu se izvesti na dva osnovna načina: eksperimentalno i numerički. Eksperimentalni uvjeti daju točnije ponašanje mlazova, no imaju visoku cijenu i nije moguće varirati veliki broj parametara. Stoga se u ovom istraživanju predlaže izrada baze za model strojnog učenja na temelju velikog broja numeričkih simulacija prethodno validiranih s eksperimentom.

Primjena strojnog učenja napraviti će se za negativne uzgonske mlazove koji se javljaju kod desalinizacijskih postrojenja. To je posebice važno zbog nedostatka vode u obalnim dijelovima, stoga se prilikom proizvodnje pitke vode u morski okoliš vraća salamura, efluent s velikom koncentracijom soli i ostalih toksičnih spojeva koji se koriste tijekom procesa. Navedena tehnika strojnog učenja se može primijeniti i na pozitivne uzgonske mlazove.

Ovo poglavlje sadrži opis baze i algoritama modela strojnog učenja. Potom su prikazani rezultati modela strojnog učenja za predviđanje geometrijskih karakteristika negativnih uzgonskih mlazova te korelacijska analiza. Potom su predstavljene rezultati dodatnih modela strojnog učenja uz primjenu SHAP analize za specifične slučajeve.

#### 3.1 Izrada baze za model strojnog učenja

Kako bi se napravila baza za model strojnog učenja, ukupno je provedeno 500 trodimenzionalnih numeričkih simulacija nagnutih uzgonskih mlazova s različitim režimom strujanja.

Ulazni podatci modela strojnog učenja se sastoje od sljedećih parametara: nagiba mlaznice  $\theta$ , visine vode  $H$  i sapnice  $h_s$ , promjera sapnice  $d$ , brzine efluenta na izlazu iz mlaznice  $U_0$ , gustoće efluenta, tj. salamure  $\rho_e$  te gustoće recipijenta  $\rho_r$ . Ulazni parametri su nasumično dodijeljeni u 500 simulacija. Međutim, kako bi se opisao navedeni problem, zadano je nekoliko uvjeta koje su nasumične varijable trebale ispuniti. Da bi se modelirali negativni uzgonski mlazovi

zadano je da gustoća efluenta  $\rho_e$  bude veća od gustoće recipijenta  $\rho_r$  ( $\rho_e > \rho_r$ ). Visina vode je trebala biti najmanje duplo veća od visine cijevi kako središnja linija ne bi dotaknula vodno lice. Nadalje, vršila se provjera postavki kako se ne bi provodile simulacije za postavke za koje već postoje rezultati. Geometrije su napravljene na temelju slike 2.6 validiranog u poglavlju 2. Granice ulaznih podataka modela su prikazane u tablici 3.1, s velikim rasponom Reynoldsovog broja između 413 i 1.390.980 te Froudeovih brojeva od 1 do 94 izračunatih prema formuli (2.5).

Numeričke mreže za sve simulacije su imale između  $8 \cdot 10^5$  i  $2 \cdot 10^6$  elemenata. Ostale postavke numeričkog modela su jednake kao kod validiranog primjera negativnih uzgonskih mlazova prikazanog u poglavlju 2.

Tablica 3.1: Granične vrijednosti ulaznih varijabli modela strojnog učenja [12]

	$\theta$ [°]	$h_s$ [m]	$H$ [m]	$d$ [m]	$U_0$ [m/s]	$\rho_e$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_r$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Minimalno	5	0,02	0,11	0,002	0,059	1000	980
Maksimalno	80	5,89	9,8	0,39	4,96	1059	1030
Srednja vrijednost	51,2	1,39	5,04	0,15	2,37	1036	1006
Standardna devijacija	14,5	1,02	2,03	0,09	1,31	14,36	11,52

Osnovni parametar koji opisuje negativne uzgonske mlazove je trajektorija, linija koja povezuje maksimalne koncentracije ili brzine za različite poprečne presjeke. Kako bi se odredila putanja trajektorije definirane su geometrijske karakteristike koje su u ovom slučaju predstavljale izlazne varijable modela strojnog učenja. Pet geometrijskih karakteristika koje se predviđaju je prikazano na slici 2.2 uključujući horizontalni i vertikalni položaj najviše lokacije središnje linije  $x_m$  i  $z_m$ , terminalna visina uspona  $z_t$ , lokacija povratne točke  $x_r$  i lokacija udarne točke  $x_i$ .

Granične vrijednosti izlaznih varijabli očitane su pomoću Paraview programa i programskih skripti izvedenih u programskom jeziku Python za središnji poprečni presjek svake pojedine numeričke simulacije, a prikazane su u tablici 3.2. Sve dimenzije izlaznih varijabli zadane su u metrima.

Tablica 3.2: Granične vrijednosti izlaznih varijabli modela strojnog učenja [12]

	$x_m$	$z_m$	$z_t$	$x_r$	$x_i$
Minimalno	0,018	0,001	0,008	0,016	0,048
Maksimalno	9,046	5,619	7,350	11,662	12,036
Srednja vrijednost	2,042	1,514	2,267	3,676	4,194
Standardna devijacija	1,436	1,046	1,462	2,500	2,633

Dakle, ulazne varijable modela strojnog učenja predstavljaju parametri strujanja i geometrije, a izlazne varijable geometrijske karakteristike nagnutih uzgonskih mlazova. S obzirom da model

predviđa više izlaznih kontinuiranih varijabli, primjenjuje se multivarijatna regresija prema sljedećoj formuli:

$$x_m, z_m, z_t, x_r, x_i = f(\theta, h_s, H, d, U_0, \rho_e, \rho_r) \quad (3.1)$$

### 3.2 Algoritmi i parametri modela strojnog učenja

Kako bi se dobio uvid u ponašanje i sposobnost predviđanja, isprobano je više različitih algoritama strojnog učenja. Algoritmi strojnog učenja služe za pronalazak odnosa između podataka koji se ne baziraju na jednadžbama ili formulama, već na odnosima između ulaznih i izlaznih podataka, čime je omogućen brži izračun vrijednosti. U nastavku će biti opisano nekoliko algoritama strojnog učenja koji će se primijeniti u ovom radu.

Regresija potpornih vektora (engl. *Support Vector Regression*, SVR) predstavlja varijantu stroja potpornih vektora (engl. *Support Vector Machine*, SVM) za primjenu na regresijske probleme u kojima se promatraju kontinuirane varijable [34]. SVR algoritam se bazira na mapiranju ulaznih značajki u višedimenzionalnom vektorskom prostoru odvojen hiperravninom kako bi se smanjila pogreška i maksimizirala margina pomoću kernel funkcije.

Stabla odlučivanja (engl. *Decision tree*) predstavljaju vrstu algoritma u kojem se podatci dijele na manje segmente kako bi se odredio njihov odnos. Da bi se poboljšala sposobnost predviđanja, posebice kod kompleksnijih problema sve češća je primjena ansambl (engl. *ensemble*) tehnika koje se baziraju na kombinaciji više jednostavnijih modela stabla odlučivanja, da se stvori pouzdaniji model predviđanja.

Jedna od najpopularnijih metoda ansambla temeljena na stablu odlučivanja je slučajna šuma (engl. *Random Forest*, RF) koja sadrži više stabala te se primjenjuje usrednjavanje na nekoliko neovisno izgrađenih procjenitelja za poboljšanje modela i smanjenje prekomjernog prilagođavanja [26].

Kako bi se dodatno povećala točnost predviđanja, primjenjuju se stabla s podizanjem gradijenta (engl. *Gradient Boosted Trees*) koja spadaju u kategoriju ansambl metoda temeljenih na stablu koje sekvencijalno izgrađuju procjenitelje, zajedno sa smanjenjem pristranosti kombiniranih procjenitelja. Primjeri navedenih vrsta algoritama koji će se primijeniti u ovom radu su XGBoost (engl. *eXtreme Gradient Boosting*, XGB), CatBoost (engl. *Categorical Boosting*, CB), LightGBM (engl. *Light Gradient-Boosting Machine*, LGB).

XGBoost [27] je algoritam strojnog učenja koji se bazira na stablima odlučivanja uz pojačani gradijent. Koristi algoritam koji poboljšava računsku brzinu i performanse modela uz paralelnu izgradnju stabla. Catboost [90] se bazira na poboljšanju performansi stabla odlučivanja uz primjenu algoritma vođenog permutacijom te nove algoritme za obradu kategoričkih značajki. LightGBM algoritam [58] je vrsta stabla s podizanjem gradijenta koji se temelji na jednostranom uzorkovanju na gradijentu te grupiranju značajki za smanjenje složenosti prostora.

Umjetna neuronska mreža (engl. *Artificial Neural Network*, ANN) je algoritam strojnog učenja izrađen prema strukturi biološke neuronske mreže. U ovom radu primijenjena je višeslojna perceptronska umjetna neuronska mreža (engl. *Multi-Layer Perceptron*, MLP). Osnovna struktura se sastoji od tri vrste slojeva: ulazni, skriveni i izlazni s neuronima koji su povezani vezama. Svaki neuron ima aktivacijsku funkciju izračunatu iz ulaznih podataka koji rezultiraju težinama, dodatno prilagođenim na temelju točnosti predviđanja [80]. Prethodna istraživanja pokazala su dobre rezultate kod primjene ANN-a za predviđanje različitih parametara u sustavima za desalinizaciju [21].

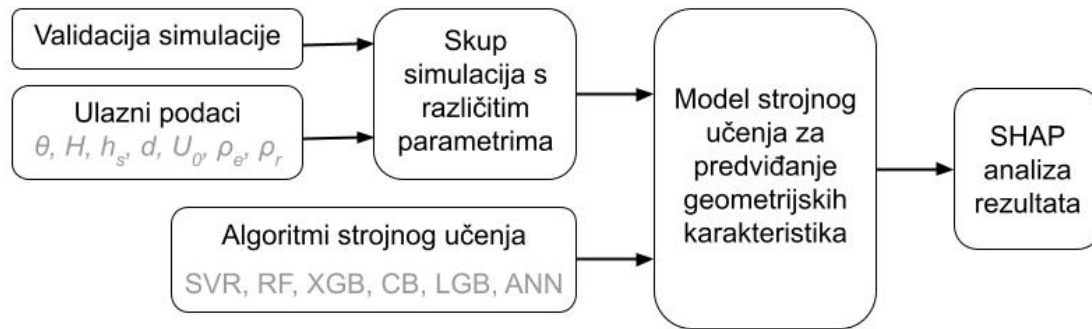
Svi algoritmi implementirani su u programskom jeziku Python 3.8.. SVR, RF i ANN algoritmi korišteni su iz *scikit-learn* Python modula [87], CB iz *catboost* modula, XGB iz *xgboost* modula i LGB iz *lightgbm*. Ulazni podaci za SVR i ANN standardizirani su između 0 i 1 pomoću funkcije *MinMaxScaler* iz modula *scikit-learn*. Ovaj postupak standardizacije nije utjecao na metode ansambla uključujući RF, XGB, CB i LGB. Za izradu regeresijskih modela geometrijskih karakteristika, korištena je funkcija *MultiOutputRegressor* iz *scikit-learn* modula za SVR, RF, CB i LGB algoritme. S obzirom da XGB i ANN podržavaju multivarijatnu regresiju, dodatna funkcija nije bila potrebna. Hiperparametri svih algoritama ML-a odabrani su pomoću unakrsno validiranog algoritma pretraživanja mreže (engl. *cross-validated grid search algorithm*) i prikazani su u tablici 3.3. Ostali parametri postavljeni su kao zadani.

Tablica 3.3: Hiperparametri za algoritme strojnog učenja

ML algoritmi	Hiperparametri
SVR	Kernel funkcija: rbf, $C$ : 1000, $\epsilon$ : 0.005, $\gamma$ : 0.5
RF	Broj stabala: 250, maksimalna dubina stabla: 90
XGB	Broj stabala: 300, maksimalna dubina stabla: 2
CB	Broj stabala: 300, maksimalna dubina stabla: 5
LGB	Broj stabala: 250, maksimalna dubina stabla: 25, broj listova: 7
ANN	Broj skrivenih slojeva: 3, broj neurona: 25, rješavač: lbfgs, aktiviranje: tanh, $\alpha=0.05$

Slika 3.1 prikazuje dijagram toka pri izradi modela strojnog učenja za predviđanje ponašanja negativnih uzgonskih mlazova. Prvi korak je validacija numeričke simulacije s eksperimen-

talnim podacima prikazana u poglavlju 2. Drugi korak je izrada baze podataka za model na temelju velikog broja numeričkih simulacija definiranih na prethodno opisani način. Potom slijedi primjena algoritama strojnog učenja. Nakon dobivanja modela, primijenjena je SHAP tehnika za analizu ponašanja negativnih uzgonskih mlazova.



Slika 3.1: Dijagram toka za izradu modela strojnog učenja negativnih uzgonskih mlazova

### 3.3 Rezultati modela strojnog učenja

Kako bi se modeli rigorozno validirali baza od 500 podataka, nasumično je podijeljena za treniranje/testiranje i validaciju. Prvo se na setu treniranje/testiranje izračunao srednji RMSE i  $R^2$  te njihova standardna devijacija (std), pri čemu se koristila K-struka unakrsna validacija (engl. *K-fold cross validation*) s vrijednosti  $K = 5$ , čiji su rezultati prikazani u tablici 3.4. Navedenom metodom se od seta treniranje/testiranje napravilo pet različitih kombinacija za testiranje, pri čemu je 80% podataka korišteno za treniranje, a 20% za testiranje. Konačna točnost je izračunata na temelju prosjeka svih pet kombinacija setova.

Zatim je provedena druga vrsta validacije modela u kojem se 90% podataka koristilo za treniranje modela, a preostalih 10% za validaciju. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 3.5. Oznaka  $A$  predstavlja srednju vrijednost rezultata izračunatu za točnost predviđanja svih geometrijskih karakteristika pojedinog modela strojnog učenja. Podebljane vrijednosti predstavljaju najbolje rezultate za svaku geometrijsku karakteristiku, pri čemu je u svim slučajevima najbolje predviđanje dobiveno s ANN modelom uz prosječnu vrijednost  $R^2$  0,975 te RMSE 0,279. Metode ansambla temeljene na stablima odlučivanja predviđaju rezultate s manjom točnošću, osobito RF. Najbolji rezultati temeljeni na stablu odlučivanja postignuti su pomoću CB-a što ukazuje na poboljšane performanse stabla s podizanjem gradijenta u odnosu na uobičajene metode. Relativni RMSE za predikciju korištenjem ANN modela za pojedinu varijablu

iznosi:  $x_m = 12,68\%$ ,  $z_m = 10,3\%$ ,  $z_t = 8,82\%$ ,  $x_r = 7,89\%$ ,  $x_i = 11,71\%$ .

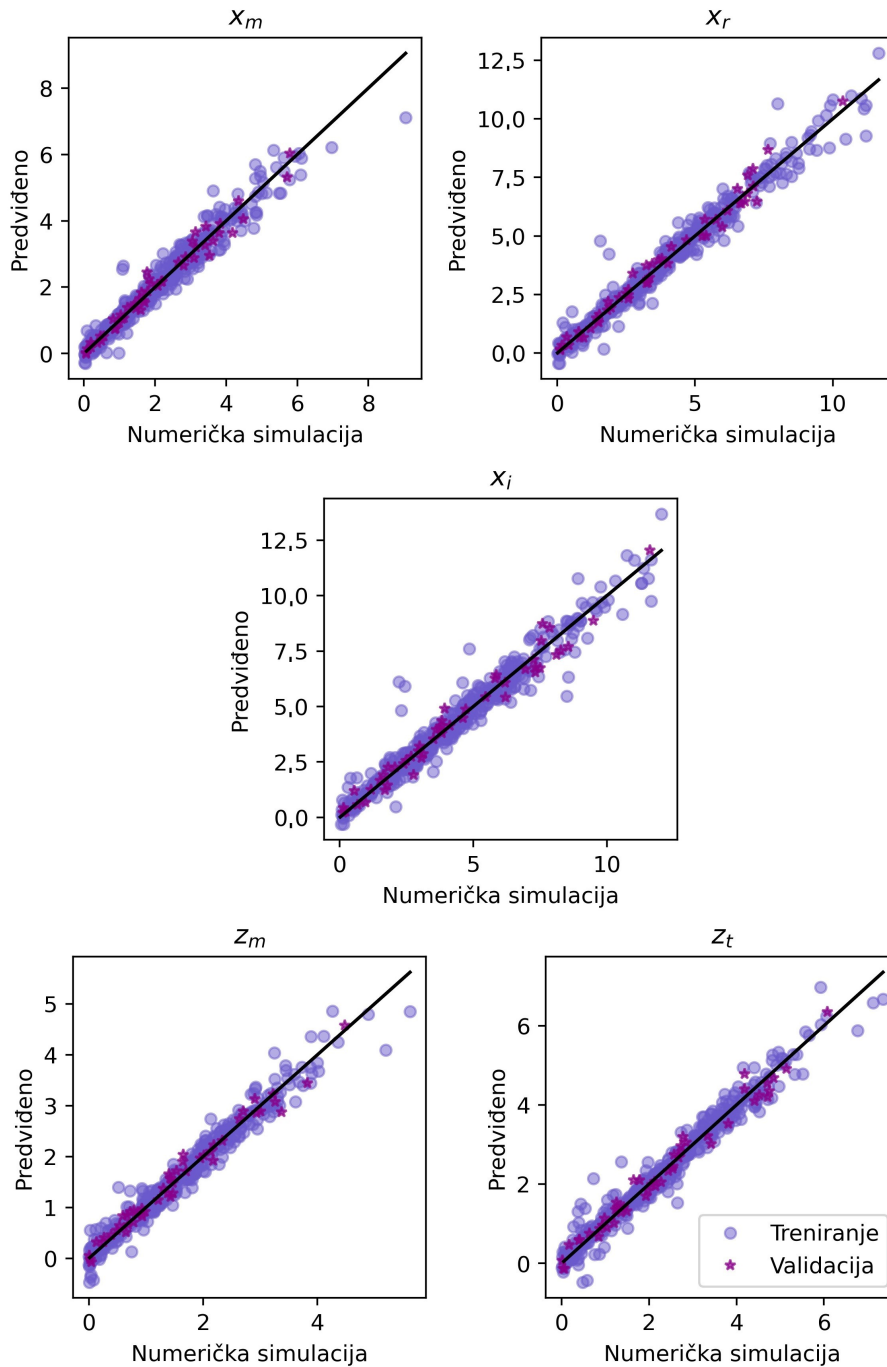
Tablica 3.4: Prosječne vrijednosti  $R^2$  i RMSE te njihove standardne devijacije za modele strojnog učenja na bazi treniranja/testiranja uz K-struku unakrsnu validaciju [12]

		SVR	RF	XGB	CB	LGB	ANN
$x_m$	$R^2 \pm \text{std}$	0,944±0,016	0,883±0,418	0,911±0,027	0,932±0,011	0,923±0,022	<b>0,955±0,011</b>
	RMSE±std	0,337±0,035	0,481±0,055	0,423±0,069	0,365±0,019	0,397±0,059	<b>0,298±0,053</b>
$z_m$	$R^2 \pm \text{std}$	0,962±0,004	0,855±0,007	0,917±0,024	0,928±0,026	0,925±0,013	<b>0,971±0,004</b>
	RMSE±std	0,208±0,022	0,393±0,025	0,295±0,027	0,278±0,052	0,281±0,022	<b>0,176±0,012</b>
$z_t$	$R^2 \pm \text{std}$	0,956±0,009	0,861±0,010	0,926±0,012	0,941±0,014	0,926±0,016	<b>0,971±0,007</b>
	RMSE±std	0,311±0,021	0,537±0,036	0,394±0,012	0,352±0,052	0,380±0,039	<b>0,246±0,037</b>
$x_r$	$R^2 \pm \text{std}$	0,959±0,013	0,894±0,026	0,921±0,021	0,941±0,012	0,930±0,006	<b>0,973±0,006</b>
	RMSE±std	0,501±0,069	0,825±0,112	0,702±0,095	0,590±0,086	0,656±0,048	<b>0,402±0,049</b>
$x_i$	$R^2 \pm \text{std}$	0,946±0,014	0,902±0,011	0,915±0,020	0,941±0,020	0,935±0,010	<b>0,956±0,009</b>
	RMSE±std	0,606±0,067	0,826±0,071	0,761±0,065	0,619±0,076	0,673±0,083	<b>0,540±0,019</b>

Tablica 3.5: Prosječne vrijednosti  $R^2$  i RMSE za validacijski set [12]

	SVR		RF		XGB		CB		LGB		ANN	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
$x_m$	0,960	0,291	0,890	0,488	0,924	0,374	0,936	0,352	0,924	0,413	<b>0,963</b>	<b>0,259</b>
$z_m$	0,971	0,160	0,868	0,331	0,930	0,277	0,932	0,241	0,948	0,241	<b>0,980</b>	<b>0,156</b>
$z_t$	0,962	0,255	0,880	0,498	0,926	0,390	0,957	0,271	0,935	0,364	<b>0,984</b>	<b>0,200</b>
$x_r$	0,969	0,482	0,910	0,715	0,934	0,644	0,951	0,557	0,948	0,679	<b>0,987</b>	<b>0,290</b>
$x_i$	0,951	0,635	0,902	0,853	0,924	0,737	0,951	0,587	0,935	0,652	<b>0,962</b>	<b>0,491</b>
A	0,962	0,364	0,890	0,577	0,928	0,484	0,945	0,402	0,938	0,470	<b>0,975</b>	<b>0,279</b>

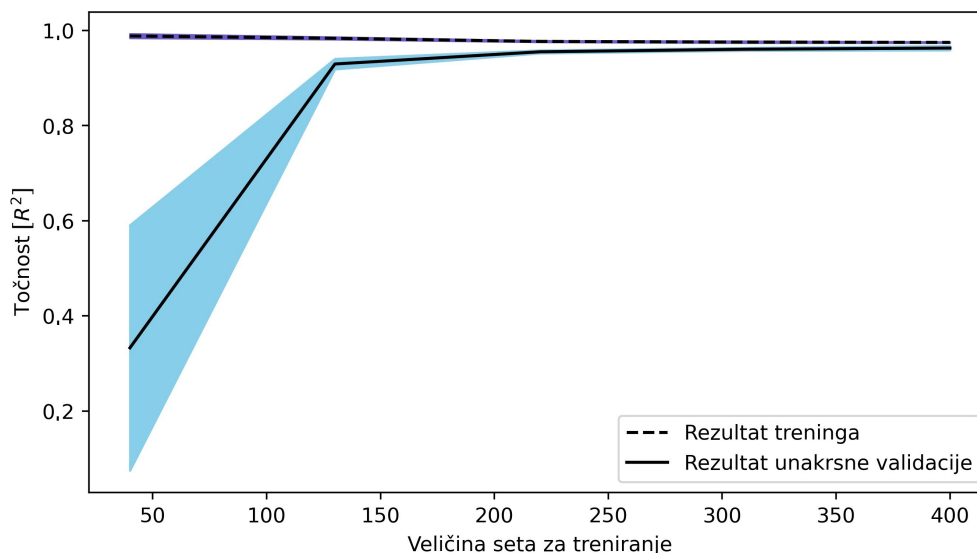
S obzirom da je najbolja vrijednost dobivena pomoći ANN modela za sve geometrijske karakteristike, navedeni model strojnog učenja je dalje korišten za detaljniju analizu. Slika 3.2, prikazuje usporedbu između podataka iz numeričke simulacije i predviđenih vrijednosti. Crna linija predstavlja lokacije idealnog predviđanja vrijednosti dobivenih numeričkim simulacijama. Može se uočiti da se većina podataka nalazi u blizini te linije, što indicira dobro predviđanje svih geometrijskih karakteristika.



Slika 3.2: Usporedba predviđenih podataka i podataka iz numeričkih simulacija za ANN model strojnog učenja

Kako bi se odredio potreban broj podataka za model strojnog učenja, analizirana je točnost s obzirom na povećanje broja podataka za testiranje i unakrsnu validaciju. Na slici 3.3 prikazana je krivulja učenja (engl. *learning curve*) za ANN model. Točnost se promatrala za vrijednost  $R^2$ . Osjenčani plavi ljubičasti dio prikazuje standardnu devijaciju rezultata. Može se uočiti da točnost K-puta unakrsne validacije značajno raste sve dok veličina skupa za treniranje ne

dosegne 150, dok se nadalje postiže stagnirajući rast do oko 300 podataka. Za cijeli skup, točnost unakrsne validacije i treninga je konvergirala. Stoga se može zaključiti da je ova veličina baze dovoljna za analizu i nije potrebno generirati više podataka jer se točnost modela ne bi povećala.



Slika 3.3: Krivulja učenja za ANN model

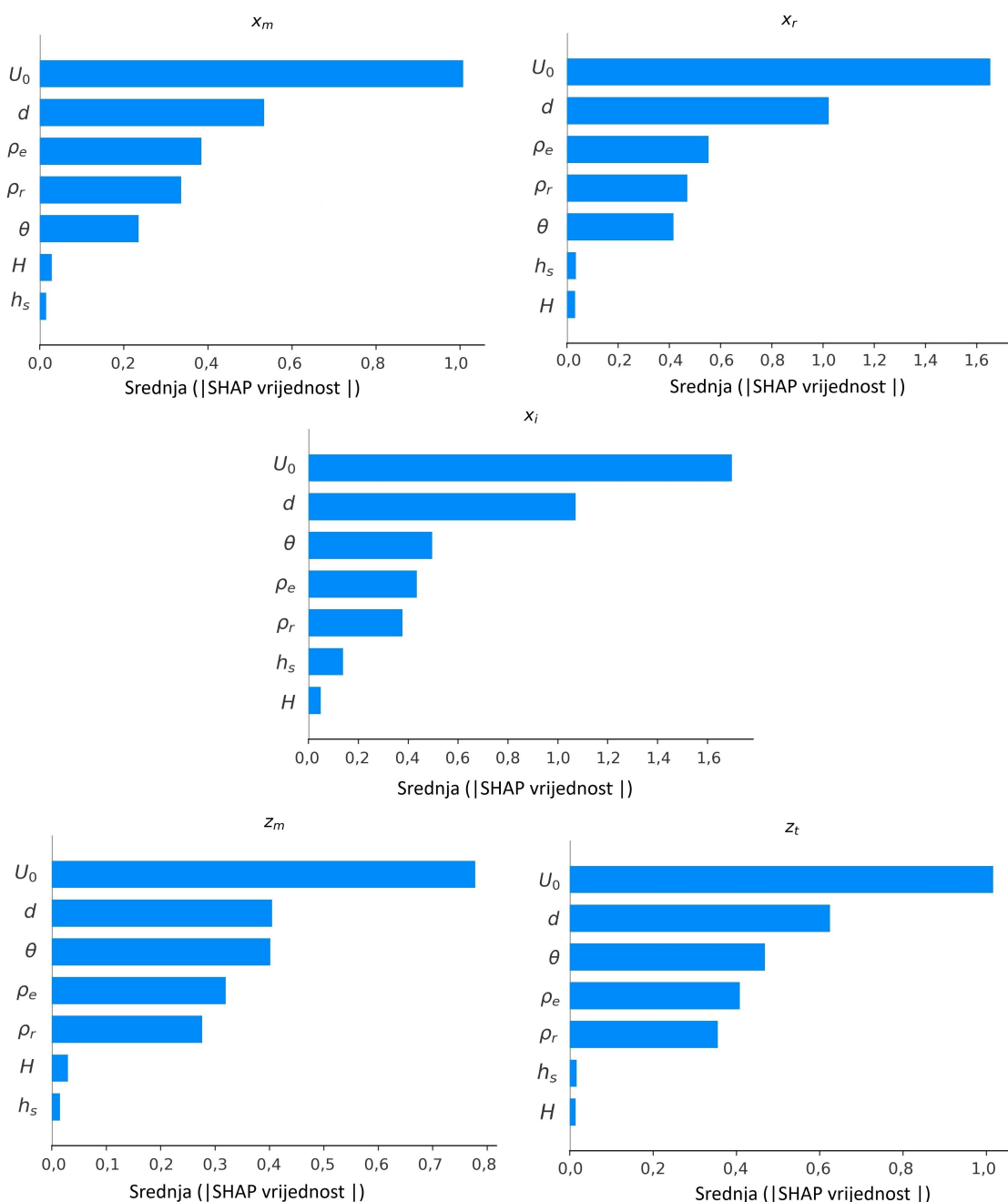
### 3.4 Korelacijska analiza

Kako bi se analizirao odnos između ulaznih i izlaznih varijabli te bolje razumjelo ponašanje uzgonskih mlazova, primijenit će se korelacijska analiza. Jedan od najčešćih vrsta korelacijske analize je Pearsonov koeficijent korelacije koji pruža uvid u linearnu ovisnost na neprekidnoj normalnoj distribuciji vrijednosti. Koeficijenti su izračunati pomoću *seaborn* Python modula. Na slici 3.4 prikazane su dobivene vrijednosti pomoću korelacijske toplinske karte (engl. *Correlation heatmap*) dobivene na temelju Pearsonovog koeficijenta. Vrijednost koeficijenta korelacije 0 označava da nema povezanosti između varijabli, 1 predstavlja pozitivnu povezanost, odnosno korelaciju, a -1 negativnu korelaciju. Može se zaključiti da sve ulazne varijable imaju pozitivnu korelaciju osim  $\theta$  i  $\rho_r$ . Prema ovom grafu najveći utjecaj na ulazne varijable ima brzina efluenta  $U_0$ , no radi detaljnije analize primijenit će se SHAP metoda interpretacije obilježja. Također se može uočiti povezanost između izlaznih varijabli.



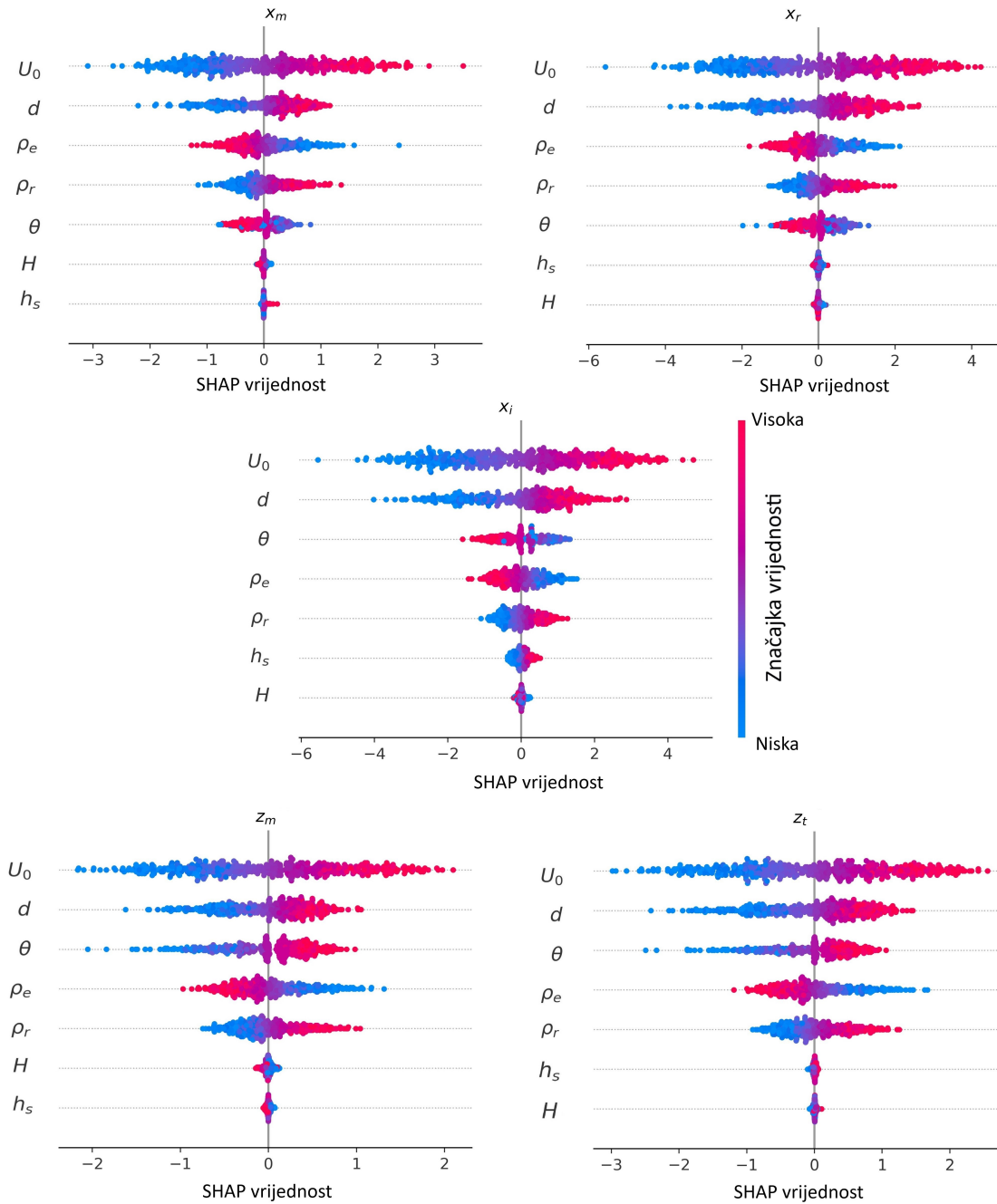


hovoj važnosti u silaznom redoslijedu na temelju njihovog doprinosa. X os prikazuje srednju apsolutnu vrijednost Shapley koeficijenta za pojedinu ulaznu varijablu, odnosno prosječni apsolutni utjecaj na izlaznu veličinu modela. Visoke Shapleyjeve vrijednosti označavaju veći utjecaj na ishod modela, dok niže vrijednosti imaju manji utjecaj. Može se uočiti da najveću važnost ima  $U_0$ , a potom  $d$  kao što je bilo prikazano na slici 3.4 za sve geometrijske karakteristike. Ostali redoslijed važnosti prema SHAP-u je različit u odnosu na Pearsonovu korelaciju, što implicira postojanje nelinearne veze između varijabli koja se nije mogla uočiti na prethodni način.



Slika 3.5: SHAP trakasti dijagram važnosti značajke za geometrijske karakteristike

Na slici 3.6 prikazan je SHAP graf sažetka (engl. *summary plot*) kako bi se dobio potpuni uvid u učinke ulaznih varijabli, koji pokazuje pozitivne i negativne utjecaj na geometrijske karakteristike. Na x osi prikazan je utjecaj ulaznih varijabli na vrijednosti geometrijskih karakteristika, odnosno izlaznih varijabli. Boja točaka prikazuje vrijednosti značajke (engl. *feature value*) za svaku ulaznu varijablu. Crvena boja predstavlja visoku Shapley vrijednost ulaznih karakteristika, a plava niže vrijednosti.

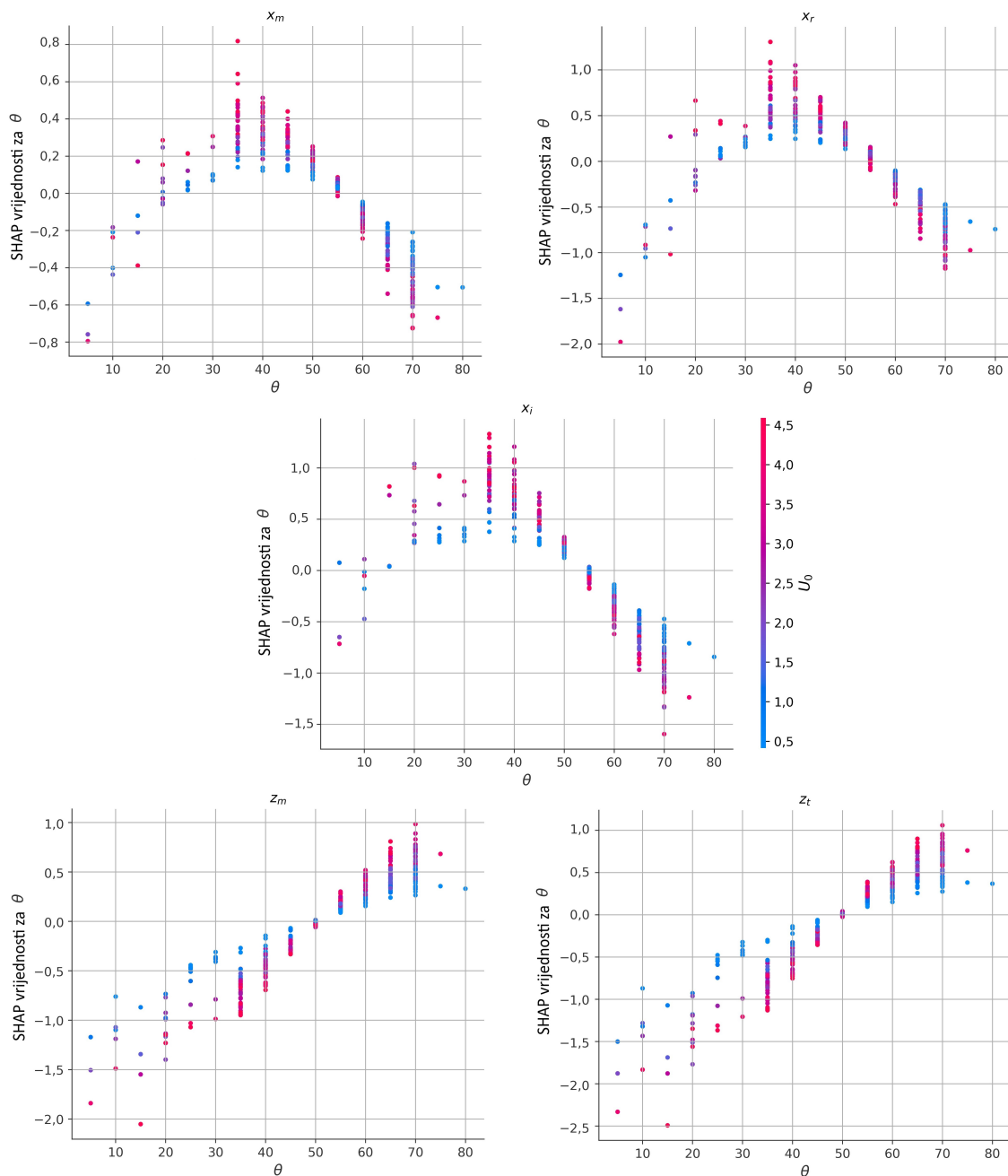


Slika 3.6: SHAP graf sažetka za geometrijske karakteristike

Većina ulaznih podataka pokazuje pozitivnu korelaciju, što znači da se primjerice povećan-

jem  $U_0$ , vrijednost geometrijskih karakteristika povećava. Negativna korelacija se može uočiti za  $\rho_r$  odnosu na sve geometrijske karakteristike, dakle povećanje gustoće recipijenta do smanjenja uzgonskog mlaza, tj. njegovih geometrijskih karakteristika. Visine  $H$  i  $h_s$  imaju veoma niske Shapley vrijednosti, što implicira mali utjecaj na predviđanje geometrijskih karakteristika. Kut  $\theta$  ima drugačiju korelaciju za horizontalne i vertikalne varijable.

Kako bi se detaljnije analizirali utjecaj kuta  $\theta$  i brzine mlaza  $U_0$  na Shapley vrijednost, na slici 3.7 prikazan je graf djelomične ovisnosti (engl. *partial dependence plots*).



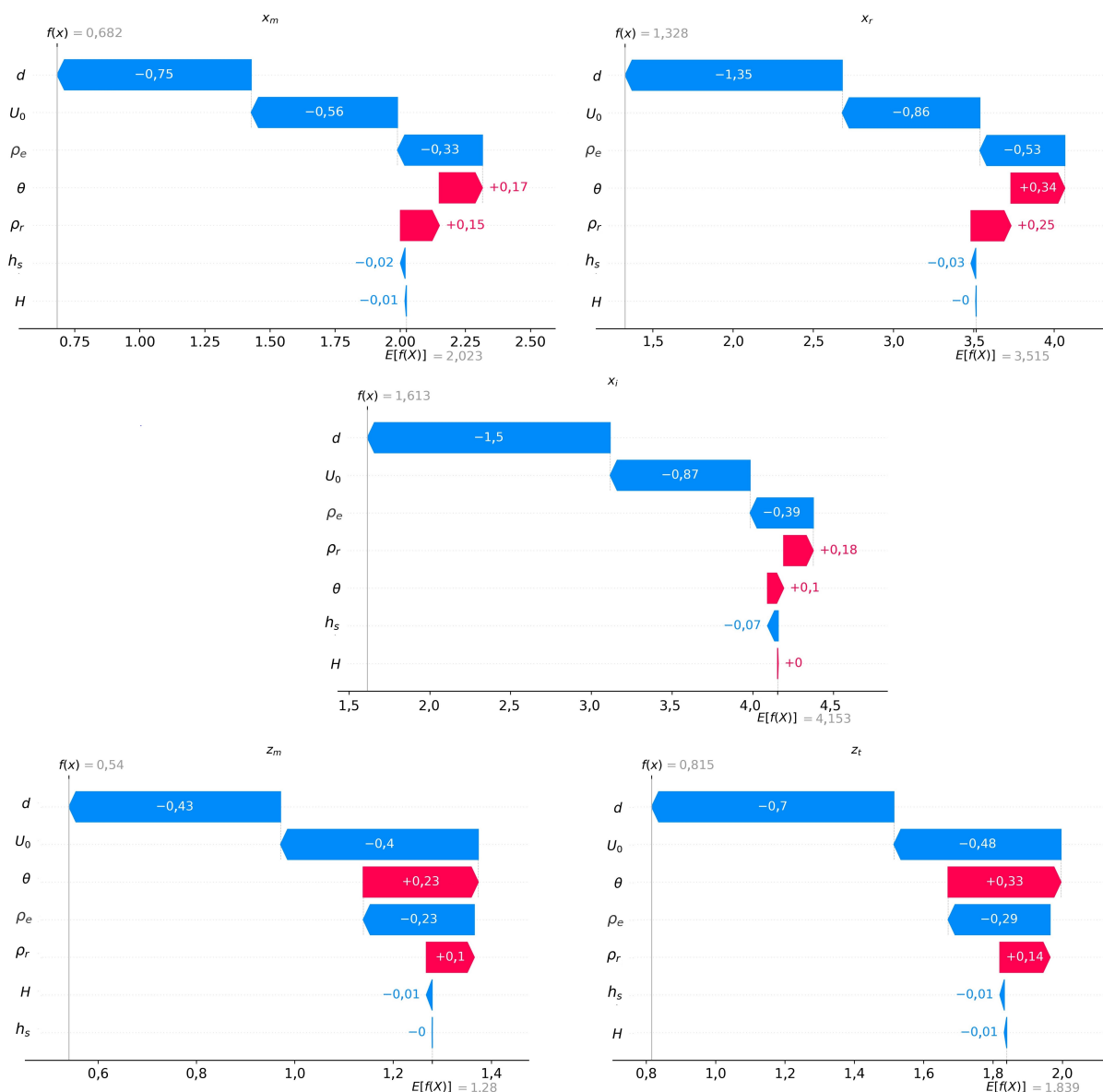
Slika 3.7: SHAP graf djelomične ovisnosti za  $\theta$  i  $U_0$

U velikom broju prethodnih istraživanja se diskutiralo oko postavljanja najboljeg kuta kod negativnih uzgonskih mlazova kako bi se dobilo što veće razrjeđenje i što veće dimenzije mlaza, odnosno geometrijskih karakteristika. U većini slučajeva su odabrani kutovi sapnice iznosili  $45^\circ$  i  $60^\circ$ . Prema SHAP analizi, može se uočiti da će horizontalne udaljenosti geometrijskih karakteristika najviše biti pod utjecajem kuta od  $35^\circ$ , dok se vertikalne udaljenosti povećavaju s kutem. Za kut od  $50^\circ$  utjecaj brzine će biti najmanji. Iz navedenoga se može uočiti kompleksnost ponašanja mlazova te nemogućnost odabira jednog odgovarajućeg kuta. Stoga je potrebno uzeti u obzir i ostale parametre strujanja, kako bi se odabrala odgovarajuća geometrija ispusta i uvjeti rada.

### 3.5 Analiza graničnih slučajeva pomoću SHAP metode

Iz prethodnih rezultata sa slika 3.5 i 3.6 može se uočiti niska važnost ulaznih vrijednosti visine vode  $H$  i sapnice  $h_s$ . Kako bi se promatrali specifični slučajevi, prikazani su SHAP vodopad dijagrami (engl. *waterfall diagrams*) za specifične slučajeve da bi se istražio utjecaj  $h_s$  i  $H$  na ponašanje uzgonskih mlazova. Vodopad dijagrami prikazuju pozitivne i negativne Shapley vrijednosti, slično kao prethodno prikazane točke na slici 3.6, međutim ovdje su rezultati prikazani za jedan slučaj, dok je prethodno bila prikazana cjelokupna baza podataka. Stoga, ovaj postupak omogućava analizu posebnih slučajeva.

Za učinak Coande, granična varijabla prema prethodnim istraživanjima [99, 91] je  $h_s/L_M$  računata na temelju jednadžbe (2.6). Rezultati iz prethodnih istraživanja su prikazali da se učinak Coanda pojavljuje za  $h_s/L_M < 0,2$  pri sapnicama nagnutim pod  $30^\circ$ . Za sapnice nagnute pod  $45^\circ$ , granica ima veću vrijednost  $h_s/L_M$ . Kako bi se detaljnije analizirala ova pojava, na slici 3.8 prikazan je SHAP vodopadni dijagram. Analiziran je model s vrijednostima  $h_s/L_M = 0,038$  i  $50^\circ$ . Na dnu dijagrama vrijednost za  $E(f(x))$  predstavlja prosječni predviđeni rezultat za svaki izlazni podatak iz baze, dok na vrhu  $f(x)$  predstavlja predviđenu vrijednost izlaznih varijabli za ovaj specifični slučaj.

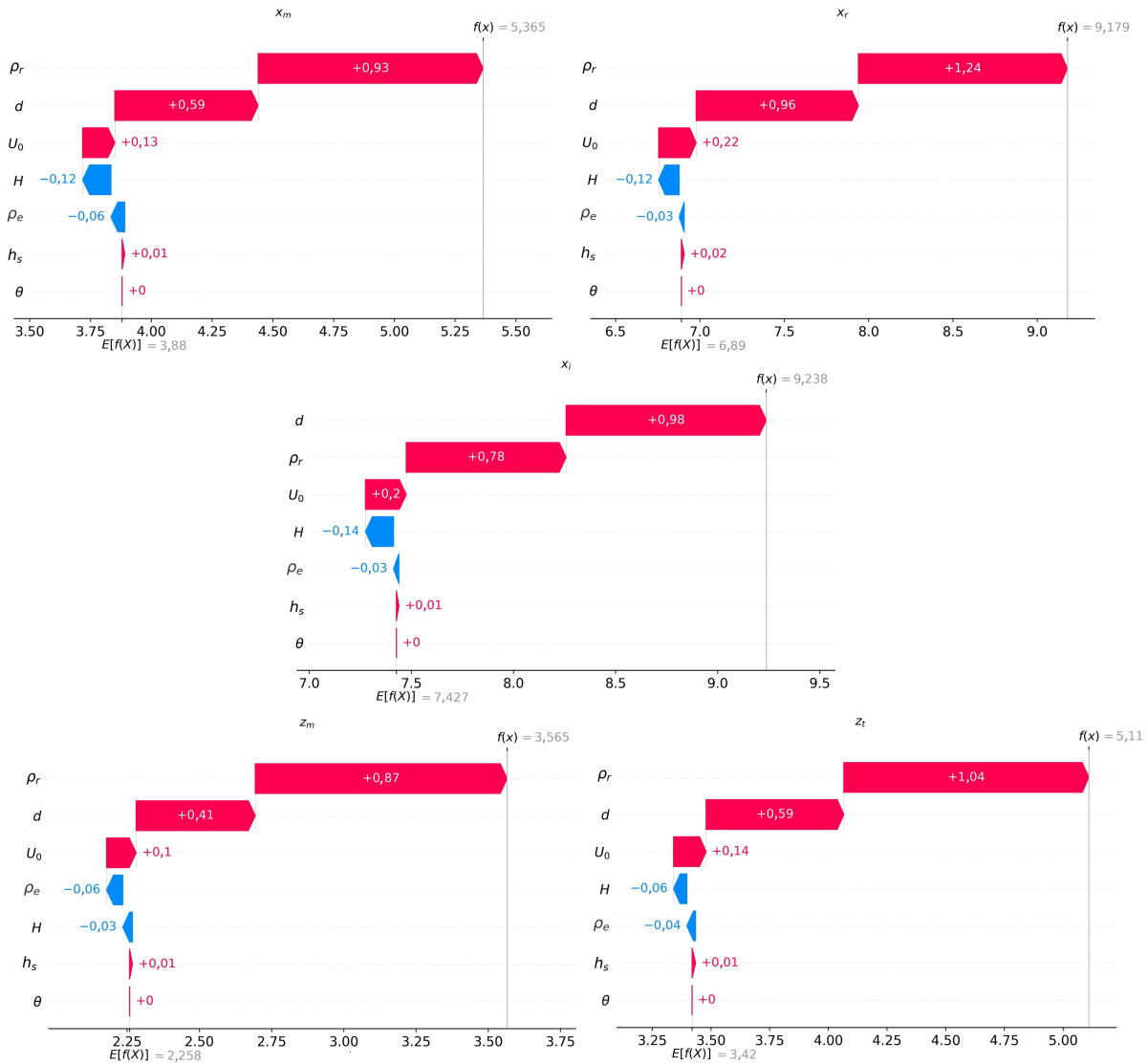


Slika 3.8: SHAP vodopadni dijagram za  $h_s/L_M = 0,038$  i  $\theta = 50^\circ$

Može se uočiti da varijable  $d$  i  $U_0$  imaju najveći utjecaj na rezultate, dok visina cijevi  $h_s$  ima veći utjecaj nego u prethodnim rezultatima prikazanim na slikama 3.5 i 3.6. Dosadašnja literatura [99] ukazuje na veći utjecaj učinka Coanda na horizontalne varijable, prevodeći ih nizvodno, dok nije bilo utjecaja na vertikalne varijable, što se može potvrditi iz ovih rezultata.  $\theta$  i  $\rho_r$  pokazuju pozitivan utjecaj na izlazne vrijednosti, dok ostale varijable imaju negativan utjecaj. Međutim, u navedenom slučaju utjecaj visine sapnice je i dalje malen, stoga se može zaključiti da navedena visina sapnice neće negativno utjecati na okoliš i smanjiti razrjeđivanje i domet mlaza.

Za pojavu učinka plitkih voda najvažniji parametar je  $dFr/H$  [7], pri čemu se Froudeov broj

računao prema formuli (2.5). Efekt se pojavljuje za vrijednosti  $dFr/H$  od 0,95 i 0,65 za nagibe sapnica od  $30^\circ$  te  $45^\circ$  [53]. Veći kutovi daju jači učinak na plitke vode. Za istraživanje utjecaja plitkih voda analiziran je slučaj s vrijednošću  $dFr/H = 0,65$  i nagibom sapnice  $45^\circ$  prikazan na slici 3.9. Za ovu vrijednost postoji promjena od režima potpuno potopljenog mlaza do režima u kojem uzgonski mlaz dodiruje površinu vode.



Slika 3.9: SHAP vodopadni dijagram za  $dFr/(H) = 0,65$  i  $\theta = 45^\circ$

Može se uočiti da u odnosu na prethodne rezultate prikazane na slici 3.6,  $H$  ima puno veći utjecaj. Najveći utjecaj je na  $x_m$ ,  $x_r$  i  $x_i$ , pomičući ih nizvodno zbog pričvršćivanja mlaza za površinu vode, kao što je bilo dokazano u prethodnoj literaturi [53]. Za razliku od učinka Coanda, efekt plitke vode stvara negativan utjecaj  $H$ , tj. njegovo smanjenje povećava vrijednost izlazne varijable. Za kut od  $45^\circ$ , SHAP analiza dala je najmanju važnost varijabli  $\theta$ , što ukazuje da navedena vrijednost kuta nema pozitivan ili negativan utjecaj na rezultate.

### 3.6 Integrirani model strojnog učenja s rezultatima iz prethodnih istraživanja

Kako bi se napravio sveobuhvatni model negativnih uzgonskih mlazova, rezultati iz prethodnih istraživanja korišteni su za dopunu baze podataka modela strojnog učenja te su korišteni za predikciju geometrijskih karakteristika i SHAP analizu. Upotrijebljeni su eksperimentalni podaci i rezultati geometrijskih karakteristika iz nekoliko studija [7, 18, 29, 53]. Navedeni skup predstavlja sve dostupne podatke iz prošlih laboratorijskih eksperimenata koji sadrže sve ulazne informacije korištene u ovom ML modelu. Naime većina prethodnih istraživanja je izostavila vrijednosti kao što su visine ili gustoća recipijenta, stoga ih nije moguće primijeniti za ovakvu analizu.

S obzirom da su se u svakom istraživanju proučavale različite geometrijske karakteristike, broj podataka za geometrijsku karakteristiku je različit i prikazan je u tablici 3.6. Budući da većina tih točaka uključuje vrijednosti s nagibom od  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $60^\circ$  i iste vrijednosti nekih parametara kao što je  $\rho_r$ , za ML modele i SHAP analizu, podaci dobiveni iz numeričkih simulacija nadopunjeni su podacima iz tih eksperimenata.

Rezultati su izračunati na istom principu kao u tablicama 3.4 i 3.5, pri čemu su podaci također bili podijeljeni 90/10 za treniranje/testiranje (tren./test.) pri čemu je prvo provedena 5-struka unakrsna validacija, a potom dodatna validacija na cijelom setu podataka. Broj izlaznih varijabli je različit, stoga u ovom slučaju nije korištena multivarijantna regresija. Za izračun je korišten isti ANN model kao u prethodnoj analizi s postavkama prikazanim u tablici 3.3. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.6. Može se uočiti da je točnost rezultata slična kao u prethodnim primjerima gdje je baza bila napravljena samo od numeričkih simulacija.

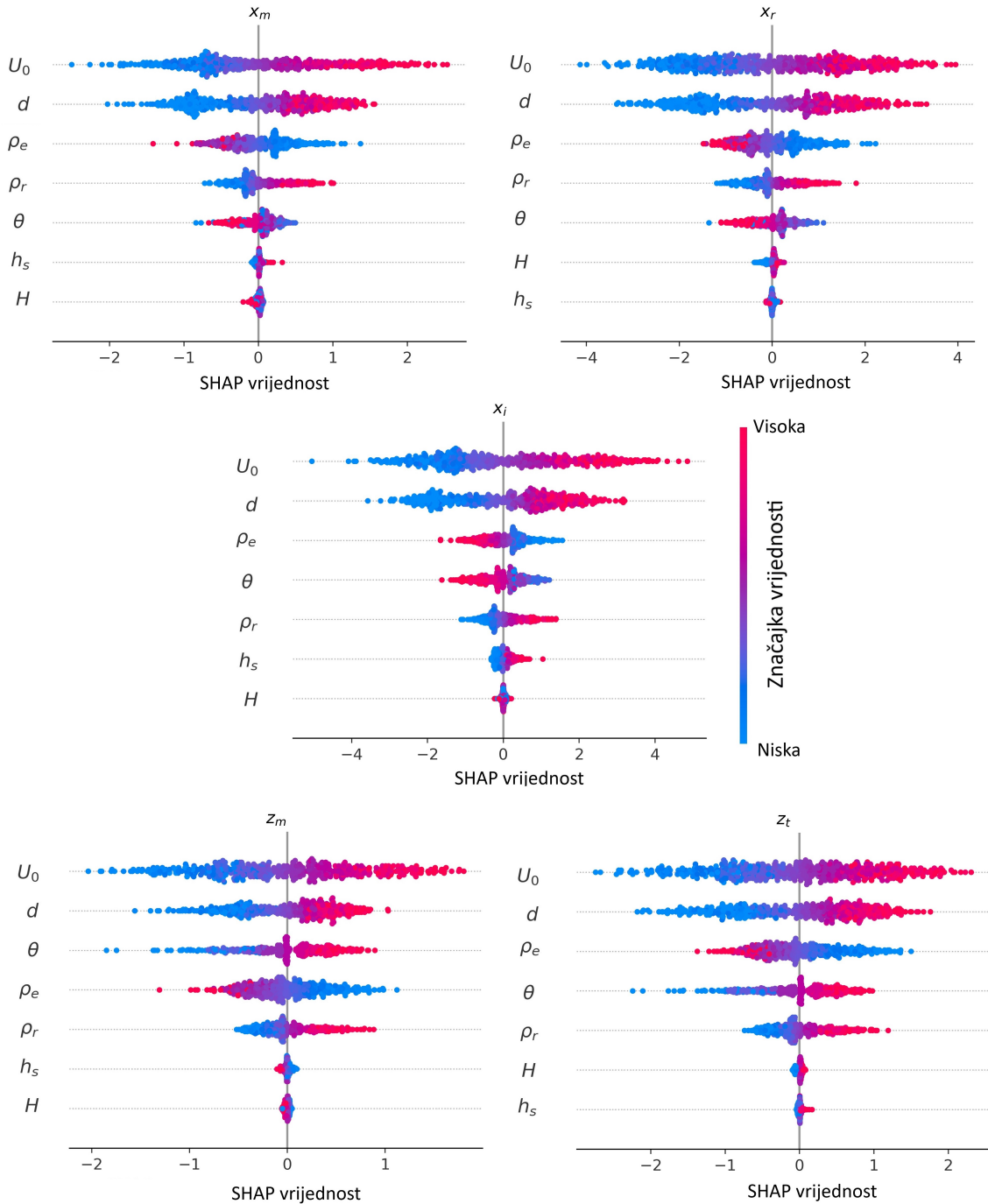
Tablica 3.6: Rezultati ML modela za bazu podataka uključujući vrijednosti iz prethodnih eksperimenata [12]

	Dodatni broj podataka	$R^2$		RMSE	
		Tren./test.	Val.	Tren./test.	Val.
$x_m$	500 + 130	0,965±0,007	0,977	0,278±0,022	0,203
$z_m$	500 + 44	0,972±0,004	0,977	0,177±0,009	0,185
$z_t$	500 + 80	0,977±0,002	0,981	0,232±0,016	0,215
$x_r$	500 + 124	0,981±0,006	0,988	0,355±0,055	0,301
$x_i$	500 + 88	0,971±0,006	0,977	0,470±0,053	0,471

Na slici 3.10 prikazan je SHAP graf sažetka za kombinirani skup podataka. Redoslijed važnosti varijabli sličan je kao na slici 3.6. Za izlazne varijable  $x_i$  i  $z_t$ , kut  $\theta$  ima manju važnost



što se može pripisati većem broju slučajeva sa sapnicom nagnutom pod  $45^\circ$ . Također se može uočiti drugačija važnost visina  $H$  i  $h_s$  zbog skupa podataka u kojima veću važnost imaju plitke vode ili učinak Coande, ovisno o geometrijskim karakteristikama. Važnost ostalih ulaznih parametara ista je kao u početnom skupu podataka. Iz navedenog se može zaključiti da je kod SHAP analize veoma bitno odabrati podatke s velikim rasponom vrijednosti jer baza može utjecati na SHAP rezultate što može dovesti do nepravilnog tumačenja odnosa i važnosti varijabli.



Slika 3.10: SHAP graf sažetka za kombinirani skup podataka o geometrijskim karakteristikama

### 3.7 Primjena strojnog učenja na reducirani broj varijabli

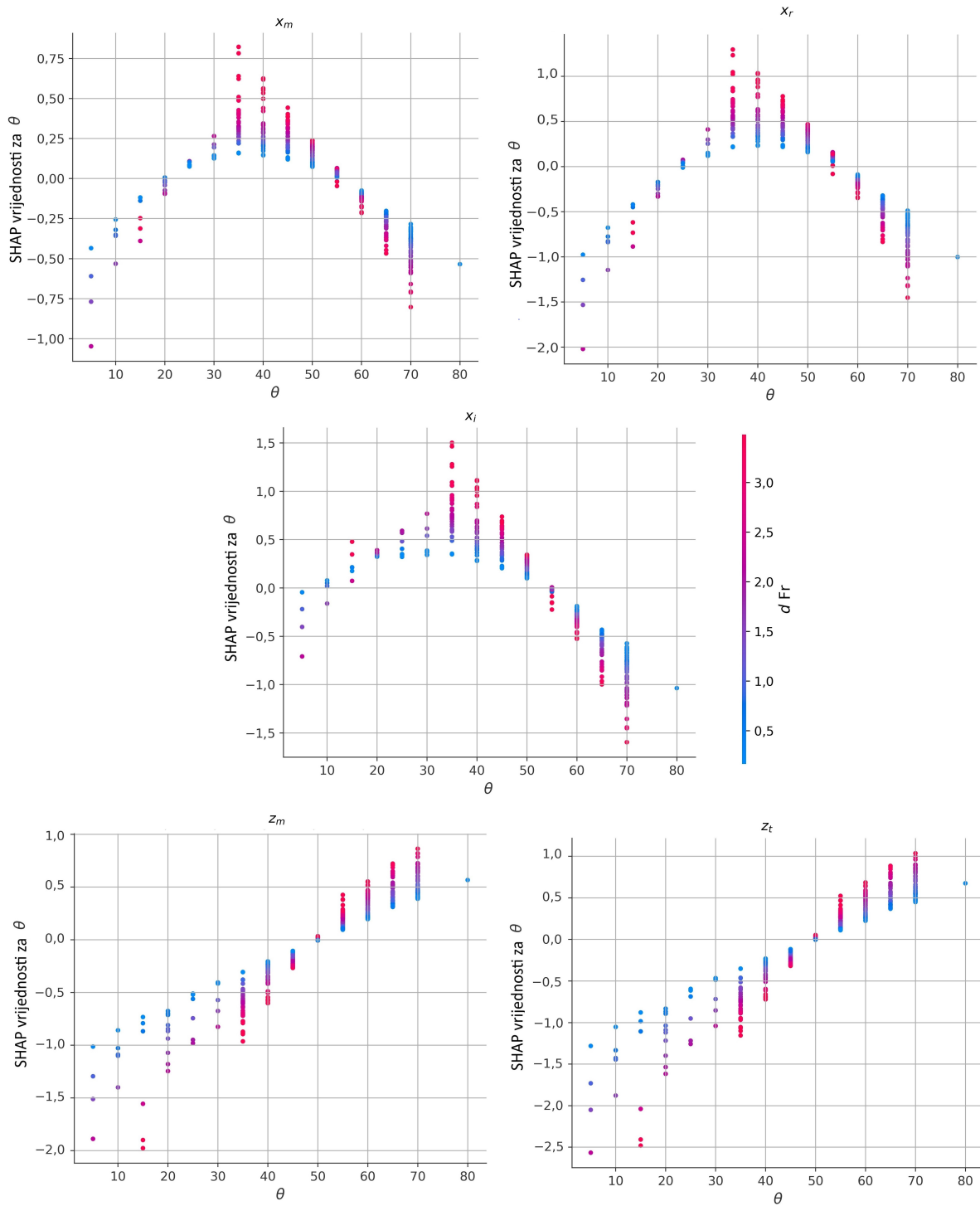
Većina prethodnih istraživanja geometrijskih karakteristika nagnutih uzgonskih mlazova se bazirala na analizi tri parametra:  $\theta$ ,  $Fr$  i  $d$ , stoga je napravljen ANN model baziran na predikciji ta tri ulazna podatka, kako bi se usporedili rezultati s modelom koji obuhvaća više varijabli. Korišteni model je isti kao u prethodnim analizama. Baza podataka je izrađena na temelju istih numeričkih simulacija, pri čemu su ulazne varijable komprimirane u tri navedena parametra. Postavke ANN modela su jednake kao u prethodnom slučaju osim što se koristi 20 neurona u svakom od 3 skrivena sloja, umjesto 25 neurona (kako je navedeno u tablici 3.3).

Rezultati modela strojnog učenja su prikazani u tablici 3.7 za treniranje/testiranje (tren./test.) i validaciju (val.). Vidljivo je da je točnost rezultata slična kao u tablici 3.5, stoga se može zaključiti da je korištenje smanjenog broja varijabli na ML modele opravdano. Prikazani rezultati imaju nešto lošiju sposobnost predviđanja. Pri tome se prosječna vrijednost  $R^2$  smanjila s 0,975 na 0,957, a RMSE se povećao s 0,279 na 0,369. Navedena razlika se može pripisati utjecaju preostalih varijabli koje nisu uzete u obzir i specifičnosti svakog slučaja.

Tablica 3.7: Rezultati modela strojnog učenja za treniranje/testiranje i validaciju na primjeru reduciranog broja ulaznih varijabli [12]

	$R^2$		RMSE	
	Tren./test.	Val.	Tren./test.	Val.
$x_m$	0,939±0,014	0,946	0,351±0,057	0,310
$z_m$	0,952±0,013	0,966	0,232±0,041	0,164
$z_t$	0,965±0,009	0,968	0,276±0,046	0,241
$x_r$	0,960±0,019	0,975	0,477±0,084	0,413
$x_i$	0,930±0,021	0,931	0,669±0,121	0,719

Slika 3.11, prikazuje SHAP graf djelomične ovisnosti za sve geometrijske karakteristike negativnih uzgonskih mlazova. Može se uočiti da su prikazani odnosi između Shapley vrijednosti,  $\theta$  i  $d$   $Fr$  slični kao prethodno prikazani grafovi djelomične ovisnosti s izlaznom brzinom  $U_0$  na slici 3.7. Iz navedenog se može zaključiti da najveći utjecaj na ponašanje mlazova ima izlazna brzina mlaza  $U_0$ , čiji je utjecaj značajan za vrijednosti  $Fr$ . Navedeno je pokazalo snažan utjecaj varijabli  $\theta$ ,  $Fr$  i  $d$  na ponašanje uzgonskih mlazova kao što je napravljeno u prethodnim analitičkim analizama. Iz toga se može zaključiti da se mogu koristiti modeli strojnog učenja sa smanjenim brojem varijabli, no to će rezultirati i nešto nižom točnosti u odnosu na modele s više varijabli.



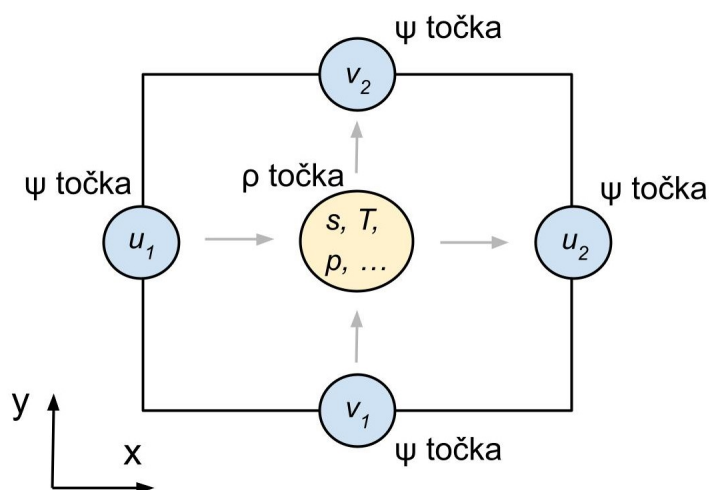
Slika 3.11: SHAP graf djelomične ovisnosti s reduciranim brojem varijabli  $\theta$  i  $d Fr$

## 4 MODELIRANJE PODMORSKOG ISPUSTA U REALNIM UVJETIMA STRUJANJA

Kako bi se dobio uvid u ponašanje podmorskih ispusta u realnim uvjetima, u ovom poglavlju je predstavljena OpenFOAM-ROMS tehnika jednosmjernog ugnježdivanja, te su prikazani rezultati navedene tehnike na podmorski ispust u Rijeci.

### 4.1 ROMS modeli

ROMS je trodimenzionalni numerički hidrodinamički model otvorenog koda, koji se temelji na jednadžbi kontinuiteta, primitivnim jednadžbama gibanja te na jednadžbama očuvanja topline, saliniteta i na jednadžbi stanja [45]. Model primjenjuje prethodno opisanu Boussinesqovu aproksimaciju te hidrostatsku aproksimaciju (engl. *hydrostatic assumption*), pri čemu se pretpostavlja ravnoteža uzgona i vertikalnog gradijenta tlaka [35]. Unutar ROMS domene, donja ploha predstavlja morsko dno, a gornja ploha je slobodna površina mora. Jednadžbe u ROMS-u se računaju u ortogonalnom krivolinijskom koordinatnom sustavu temeljenom na Arakawa C-mreži [15] prikazanoj na slici 4.1. Oznake  $u$  i  $v$  predstavljaju brzine u  $x$  i  $y$  smjeru, dok su  $s$ ,  $T$  i  $p$  varijable saliniteta, temperature i tlaka. Kod takvog tipa mreže vektori se računaju na plohama mreže umjesto u središtima ćelija i nazivaju se  $\psi$  točke. Točke u sredini ćelija se zovu  $\rho$  točke.

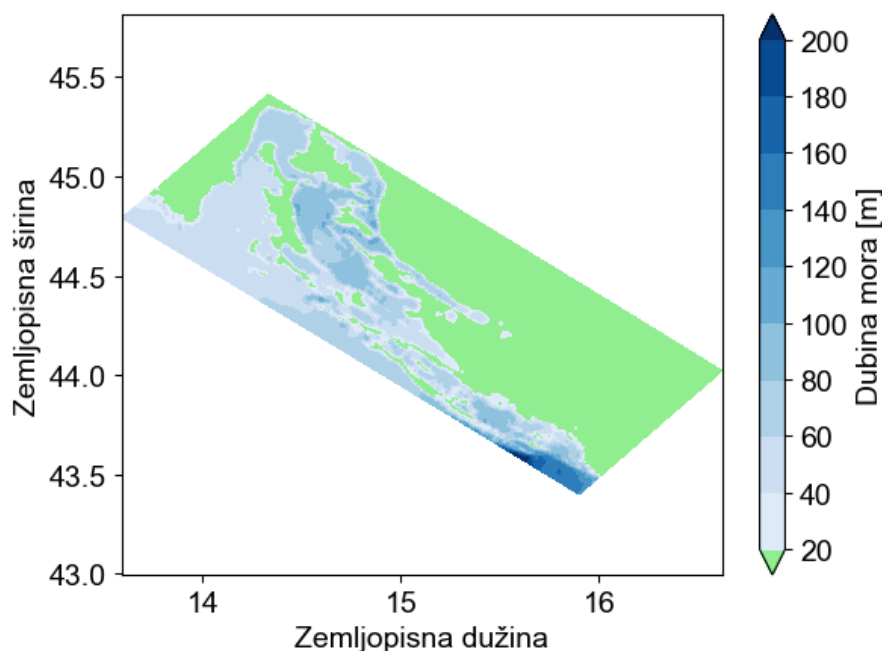


Slika 4.1: Prikaz Arakawa C-mreže

ROMS koristi ortogonalnu mrežu sa  $\sigma$  koordinatama [105] koja sadrži povećanu gustoću u blizini površine i povećanu diskretizaciju nad promjenjivom topografijom. Vertikalne funkcije

istežanja (engl. *Vertical Stretching Functions*) koje prate vertikalni teren koriste se za izračunavanje točaka okomite mreže za  $\psi$  i  $\rho$  točke.

U ovom istraživanju korišten je ROMS model segmenta Jadranskog mora s visokom rezolucijom (481 točka x 181 točka) čija je udaljenost između točaka 500 metara i  $20 \sigma$  slojeva u vertikalnom smjeru. Izlazna datoteka ROMS modela spremljena je u netCFD obliku [95] za svaka 3 sata. Navedeni ROMS model je ugniježđen u model cijelog Jadranskog mora prethodno opisanog i validiranog u radovima [51, 113]. Validacija je provedena pomoću NAdEx 2015 eksperimenta [112] kako bi se točno opisala Jadranska obala i veliki broj uvala. U radu autora Pranić i sur. [89] pokazano je da velika rezolucija ROMS modela adekvatno opisuje temperaturu, salinitet i morske struje, posebice u dijelu sjevernog Jadrana. Na slici 4.2 prikazano je promatrano područje. ROMS domena je pravokutnog oblika, pri čemu se granica obale definira s maskom “kopno-more” (engl. *masked points*). Dakle, zbog pravokutnog oblika domene, dio točaka modela se nalazi na kopnu, no imaju drugačiju vrijednost i na slici su prikazane zelenom bojom. x os je nagnuta za  $50^\circ$  u odnosu na istok. ROMS model je spojen s WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) modelskim sustavom za numeričko modeliranje i prognozi-ranje stanja atmosfere kako bi se u obzir uzela interakcija mora i atmosfere.



Slika 4.2: ROMS domena Kvarnerskog zaljeva

S obzirom da ROMS ima ortogonalnu zakrivljenu mrežu, nije u mogućnosti rješavati i promatrati kompleksne geometrije kao što je podmorski ispust. ROMS se bazira na hidrostatskoj

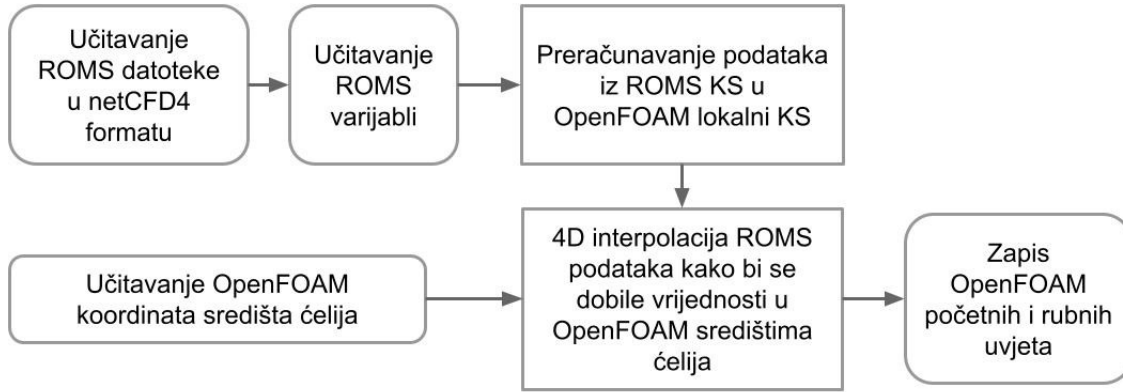
aproksimaciji stoga nije adekvatan za modeliranje širenja efluenta u bliskom području [79], pa su potrebne druge metode za modeliranje rada podmorskih ispusta u bliskoj zoni i zoni tranzicije. Zbog toga je u nastavku predložena jednosmjerna tehnika ugnježdivanja OpenFOAM-a u ROMS.

## 4.2 OpenFOAM-ROMS tehnika jednosmjernog ugnježdivanja

Prethodno provedena istraživanja kod izrade numeričkih modela uglavnom nisu uzimala u obzir promjenu gustoće po dubini, tj. stratifikaciju. Kod ispusta u plitkim vodama (manje od 10 metara dubine), stratifikacija nema značajniji učinak. Međutim, kod ispusta postavljenih na većim dubinama može znatno utjecati na rezultate, posebice u ljetnom periodu kada se morska površina značajno grije pa postoji velika razlika u temperaturi i gustoći između slojeva. Zbog toga pozitivni uzgonski mlaz ne dolazi do površine već ostaje zarobljen na nižim slojevima. Stoga je kod modeliranja uzgonskih mlazova potrebno uzeti u obzir podatke o strujanju mora i njegovim svojstvima.

Dvije osnovne vrste spajanja modela bliske i daleke zone su aktivno i pasivno [81]. Kod pasivnog spajanja rezultati bliske zone se koriste kao ulazni podaci daleke zone, pri čemu modeli uzgonskih mlazova u bliskoj zoni najčešće ne obuhvaćaju strujanje mora. Aktivno spajanje odnosi se na dva spojena numerička modela koja tijekom proračuna izmjenjuju informacije. S obzirom da je ovakav tip proračuna veoma kompleksan, prethodna istraživanja su se bazirala na spajanju pojednostavljenih integralnih [79, 75, 55] i sličnih modela bliske zone te oceanografskih modela za daleke zone. Nedostatak takvog pristupa je pojednostavljeni model bliske zone i nemogućnost uvida u kompleksno ponašanje efluenta u bliskoj zoni i zoni tranzicije. Navedene zone su pod najvećim utjecajem čovjeka, stoga će se u nastavku prikazati pasivno, jednosmjerno spajanje modela ispusta, pri čemu će se u oceanografski ROMS model ugnježditi OpenFOAM model bliske zone. Navedeni postupak je univerzalan te se na sličan način može primijeniti i na spajanje ostalih numeričkih modela.

Na slici 4.3, prikazan je dijagram toka za jednosmjerno ugnježdivanje OpenFOAM-a u ROMS (kratica "KS" odnosi se na koordinatni sustav) implementiran u Pythonu. Prvi korak je čitanje podataka iz izlazne ROMS datoteke zapisane u netCDF4 formatu pomoću *netcdf4-python* modula [116]. Potom slijedi učitavanje potrebnih varijabli uključujući dubinu mora, vertikalne i horizontalne koordinate, brzinu, salinitet, temperaturu i tlak.



Slika 4.3: Dijagram toka za OpenFOAM-ROMS ugnježdivanje

S obzirom da ROMS i OpenFOAM koriste drugačije koordinatne sustave, potrebna je konverzija koordinata. ROMS modeli računaju se u Zemljopisnom koordinatnom sustavu, definiranom zemljopisnom dužinom, širinom i elevacijom, dok se OpenFOAM modeli računaju u lokalnom pravokutnom Kartezijevom koordinatnom sustavu. Budući da je orijentacija OpenFOAM modela često prilagođena promatranom problemu, navedeni koordinatni sustavi mogu biti zaokrenuti za neki kut  $\theta$  stoga je potrebno računati i rotaciju koordinata. Navedena pretvorba može se izvršiti prema sljedećim formulama:

$$x_k = (x_R - x_0) \cdot \cos(\theta) + (y_R - y_0) \cdot \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$$y_k = -(x_R - x_0) \cdot \sin(\theta) + (y_R - y_0) \cdot \cos(\theta) \quad (4.2)$$

gdje su  $x_R$  i  $y_R$  globalne koordinate ROMS domene preračunate u metre,  $x_0$  i  $y_0$  koordinate središta ROMS koordinatnog sustava u metrima,  $\theta$  je kut između x osi ROMS i OpenFOAM koordinatnog sustava.

Umjesto učitavanja brzina u  $x$  i  $y$  smjeru ROMS koordinatnog sustava, preračunate brzine je moguće učitati u smjeru istoka i sjevera zapisane u središtu ćelija. U tom slučaju je jedino za brzine u  $z$  smjeru potrebno preračunavanje zbog zapisa u  $\psi$  točkama, pri čemu se primijenila linearna interpolacija kako bi se dobila vrijednost u središtu ćelije.

Kako bi se izračunale brzine u zaokrenutom lokalnom koordinatnom sustavu, brzine u smjeru  $x$  i  $y$  lokalnog koordinatnog sustava mogu se izračunati na temelju brzina u smjeru istoka i sjevera  $v_i$  i  $v_s$  putem sljedećih jednadžbi:

$$v_x = v_i \cdot \cos(\theta) + v_s \cdot \sin(\theta) \quad (4.3)$$

$$v_y = -v_i \cdot \sin(\theta) + v_s \cdot \cos(\theta) \quad (4.4)$$

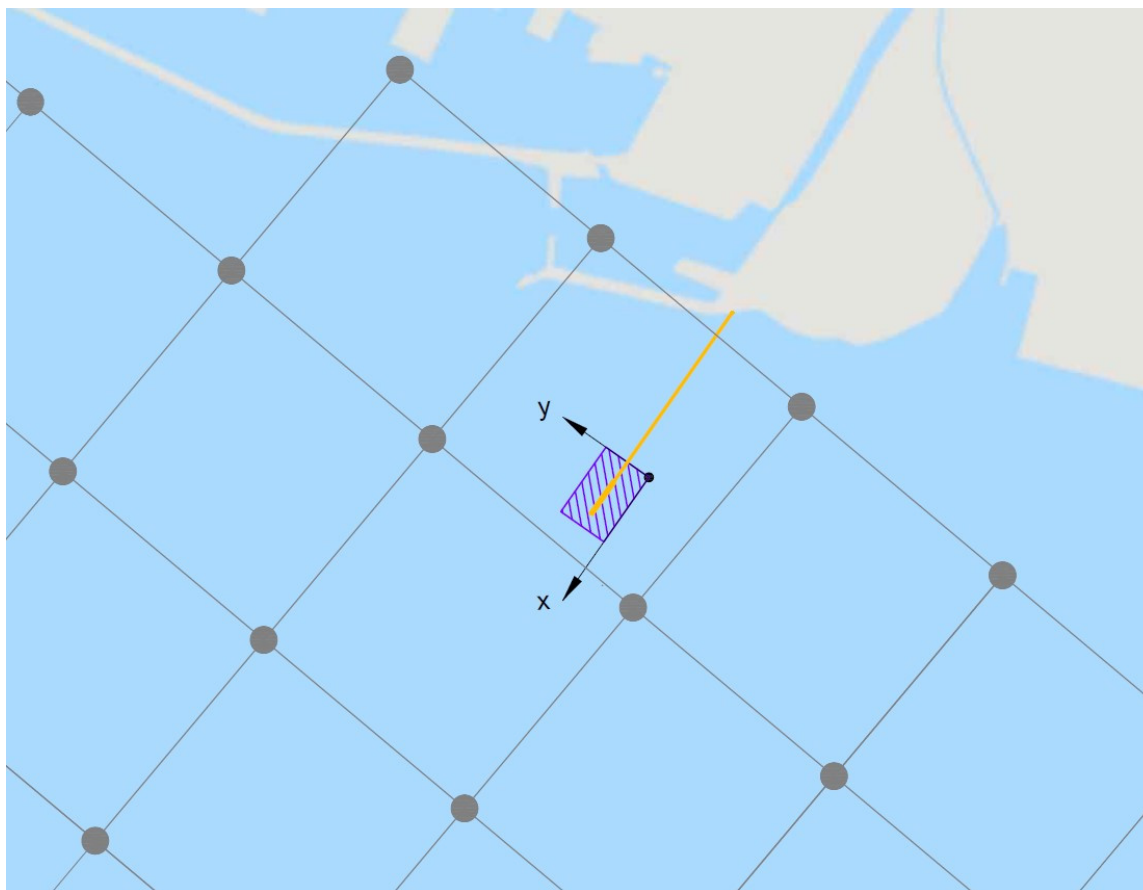
Zatim se na temelju jednadžbi (2.23-2.26) izračunava gustoća iz temperature i saliniteta u ROMS točkama. Potom je potrebno učitati središte elemenata OpenFOAM mreže. ROMS se bazira na metodi konačnih razlika (engl. *finite difference method*), a OpenFOAM-ov rješavač koji će se koristiti na metodi konačnih volumena (engl. *finite volume method*). S obzirom da je rezolucija OpenFOAM numeričke domene puno veća u odnosu na ROMS domene, posebice u horizontalnom smjeru, potrebna je interpolacija podataka. U sklopu *scipy.interpolate* podmodula, korištenjem funkcije *griddata* radi se 4D interpolacija za brzinu, gustoću i tlak u ROMS točkama kako bi se obuhvatile promjene u trodimenzionalnom prostoru. Zatim se na temelju jednadžbe (2.28) računa  $\alpha$  u pojedinoj točki OpenFOAM domene. S obzirom da će se u nastavku promatrati turbulentno strujanje, kao rubni i početni uvjeti zadane su turbulentne varijable  $k$  i  $\epsilon$  izračunate na temelju ROMS brzina. Interpolirani podatci se potom zapisuju u OpenFOAM datoteku i predstavljaju rubne i početne uvjete numeričke simulacije.

### 4.3 Testni primjer - podmorski ispust u Rijeci

Kako bi se validiralo i primijenilo prethodno opisano jednosmjerno ugnježđivanje OpenFOAM modela u ROMS, postupak je primijenjen za analizu rada podmorskog ispusta u Rijeci. S obzirom da se većina podmorskih ispusta s kojima se otpuštaju komunalne i oborinske vode nalaze u blizini centra grada te plaža nužna je adekvatna konstrukcija i analiza rada takvih ispusta. Jedan takav primjer je podmorski ispust u Rijeci koji se nalazi u blizini ušća rijeke Rječine i centra grada. Širenje onečišćenja u dalekoj zoni iz navedenog podmorskog ispusta, prethodno je analizirano u doktorskoj disertaciji autorice Mrša Haber [76] na velikoj skali Riječkog zaljeva pomoću MIKE3 programa. U ovom radu će se primijeniti OpenFOAM-ROMS tehnika ugnježđivanja te tehnike redukcije varijabli za navedeni testni primjer u bliskoj zoni te zoni tranzicije u blizini ispusta na koje čovjek ima puno veći utjecaj.

Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delta (UPOV Delta) je središnji uređaj za pročišćavanje otpadnih voda s kojim se otpadne vode iz Rijeke i okolice obrađuju i ispuštaju u more, a sastoji se od mehaničkog predtretmana s podmorskim ispustom. Na slici 4.4 prikazana je lokacija podmorskog ispusta u Rijeci s OpenFOAM i ROMS domenama.



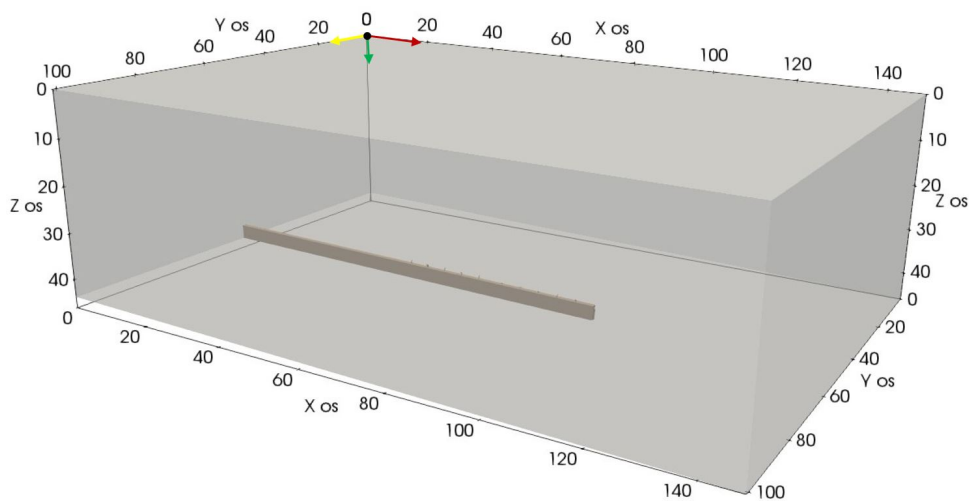


Slika 4.4: Prikaz ROMS i OpenFOAM domene [11] za promatrani slučaj. Sive točke prikazuju ROMS domenu, dok je ljubičasti pravokutnik OpenFOAM domena koja se nalazi oko narančaste linije podmorskog cjevovoda.

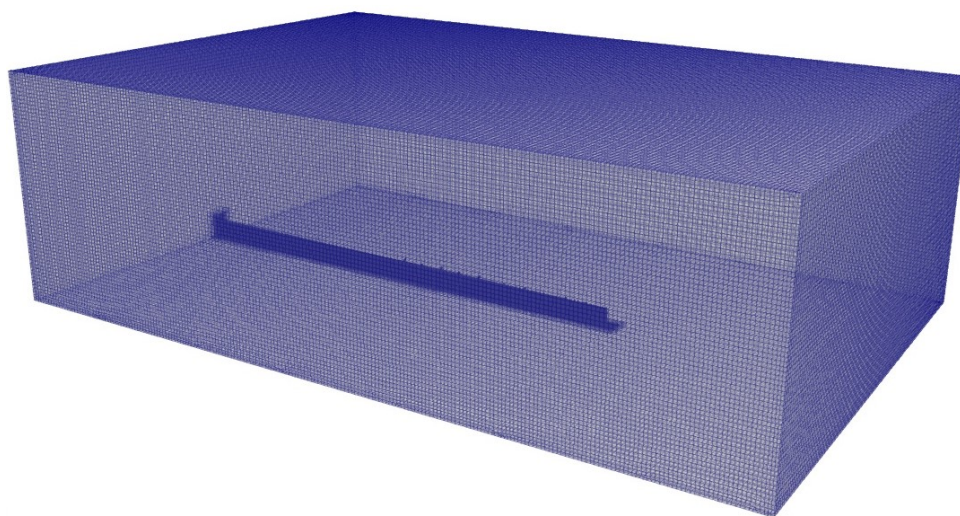
Kod većeg protoka kao što imaju komunalne otpadne vode većih naselja, primjenjuju se difuzori s više sapnica kako bi se povećalo miješanje i smanjila koncentracija onečišćenja. Zbog toga se riječki podmorski ispust sastoji od 11 sapnica. Udaljenost između sapnica je uniformna i iznosi 4,5 metara, osim sapnica kod kojih se mijenja poprečni presjek glavnog cjevovoda, a koje su udaljene 6 metara. Ukupna dužina podmorskog ispusta je 500 metara, dok je dužina između prvog i zadnjeg difuzora 48 metara. Deset sapnica je postavljeno s izmjeničnom konfiguracijom unutrašnjeg promjera 250 milimetara paralelno s morskim dnom, dok je zadnja sapnica nagnuta pod  $45^\circ$  u odnosu na morsko dno s unutrašnjim promjerom od 350 milimetara. Ispust je podignut za 2 metra od morskog dna. Maksimalna dubina podmorskog ispusta je 46 metara.

Dimenzije OpenFOAM domene su  $148 \times 100,75$  metara. Dubina mora iznosi između 43,8 i 46,2 metara s nagnutim dnom u smjeru ispusta. Domena predstavlja područje udaljeno 50 metara od krajnjih rubova difuzora. x os je paralelna sa smjerom podmorskog ispusta nagnuta pod  $55^\circ$  u odnosu na jug. Pozitivan smjer z osi je okrenut prema morskom dnu, a središte koordinatnog sustava se nalazi na morskoj površini. Slika 4.5 prikazuje OpenFOAM domenu i srednju gustoću

mreže. Mreža je također izrađena pomoću cfMesh-a i ugušćena u zoni blizu ispusta kako bi se uzele u obzir promjene geometrije i miješanje. Geometrija cjevovoda podmorskog ispusta je pojednostavljena u donjem dijelu cijevi uz morsko dno, kako bi se povećala kvaliteta numeričke mreže, bez utjecaja na rezultate. ROMS podatci su prebačeni u OpenFOAM koordinatni sustav pomoću prethodno opisane metodologije.



(a)



(b)

Slika 4.5: Prikaz 3D OpenFOAM (a) domene i (b) srednje mreže testnog primjera podmorskog ispusta u Rijeci [11]

Protok iz podmorskog ispusta je odabran na temelju prosječne vrijednosti UPOV Delte za određeni mjesec. Za siječanj 2019. godine je iznosio 515 l/s, a za srpanj 2019. godine 444 l/s. Pretpostavljeno je da je protok jednoliko raspoređen između 11 sapnica. Prema prethodnoj literaturi [77], gustoća otpadnih voda ( $\rho_e$ ) za zimske uvjete iznosi 999,03 kg/m<sup>3</sup> i 997,31 kg/m<sup>3</sup> za ljetni period.

Rubni uvjeti za brzinu i fazni udio  $\alpha$  u domeni su izračunati na temelju ROMS vrijednosti i prethodno opisane procedure prikazane na slici 4.3. Kao u prethodnim numeričkim modelima, primijenjen je *twoLiquidMixingFoam* rješavač. Izračun faznog udjela vršio se na temelju jednadžbe (2.28) gdje je minimalna gustoća  $\rho_{min}$  gustoća otpadnih voda, a  $\rho_{maks}$  maksimalna gustoća iz ROMS domene. Gustoća iz ROMS domene preračunata je na temelju podataka o salinitetu i temperaturi te jednadžbama (2.23-2.27).

Na bočnim stranama OpenFOAM domene, koje prikazuju otvorene plohe kroz koje struji more postavljen je ulazno-izlazni rubni uvjet za brzine [65]. Na taj način je omogućeno fluidu da slobodno izađe iz domene, a ako ulazi u domenu zadane su brzine iz ROMS datoteke. Time se osigurava poštovanje zakona očuvanja mase s obzirom da OpenFOAM model u odnosu na ROMS ima veći protok, stoga na rezultate može utjecati i otpadna voda koja izlazi iz domene. Ovo je također nužno zbog različitih smjerova strujanja mora po dubini posebice u blizini obale.

Za tlak na bočnim ploham OpenFOAM modela je postavljen izlazni-ulazni rubni uvjet (u OpenFOAM-u *outletInlet*) s obrnutim ponašanjem, odnosno fiksnim vrijednostima kod izlaza fluida iz domene i von Neumannov rubni uvjet pri ulasku fluida. Na gornjoj plohi koja predstavlja vodnu površinu, korišten je Dirichletov rubni uvjet za brzinu. Dno i stijenke cjevovoda tretirani su kao zidovi s *no-slip* rubnim uvjetom i turbulentnim funkcijama zida. Ostale postavke numeričkog modela jednake su kao kod modela pozitivnih uzgonskih mlazova opisanih u potpoglavlju 2.4. Rubni uvjeti za turbulentne varijable  $k$  i  $\epsilon$  zadane su na izlazu iz sapnice prema formulama (2.29) i (2.30), dok su u inicijalnom trenutku izračunate na temelju brzina u domeni. Numerički modeli su napravljeni za dvije različite vrste uvjeta: zimu (20. siječnja 2019. u 21 sat) i ljeto (14. srpnja 2019. u podne).

Kako bi se razlikovalo područje onečišćenja od područja domene s istom gustoćom i faznim udjelom, rezultati su naknadno izračunati s OpenFOAM tranzijentnim rješavačem *scalarTransportFoam* nakon jednog sata rezultata simulacije. Rješavač računa transportnu jednadžbu navedenu u nastavku za pasivni skalar  $T$  na postojećem polju brzina:

$$\frac{\partial}{\partial t}(T) + \nabla \cdot (UT) - \nabla \cdot (D_T \nabla T) = S_T \quad (4.5)$$

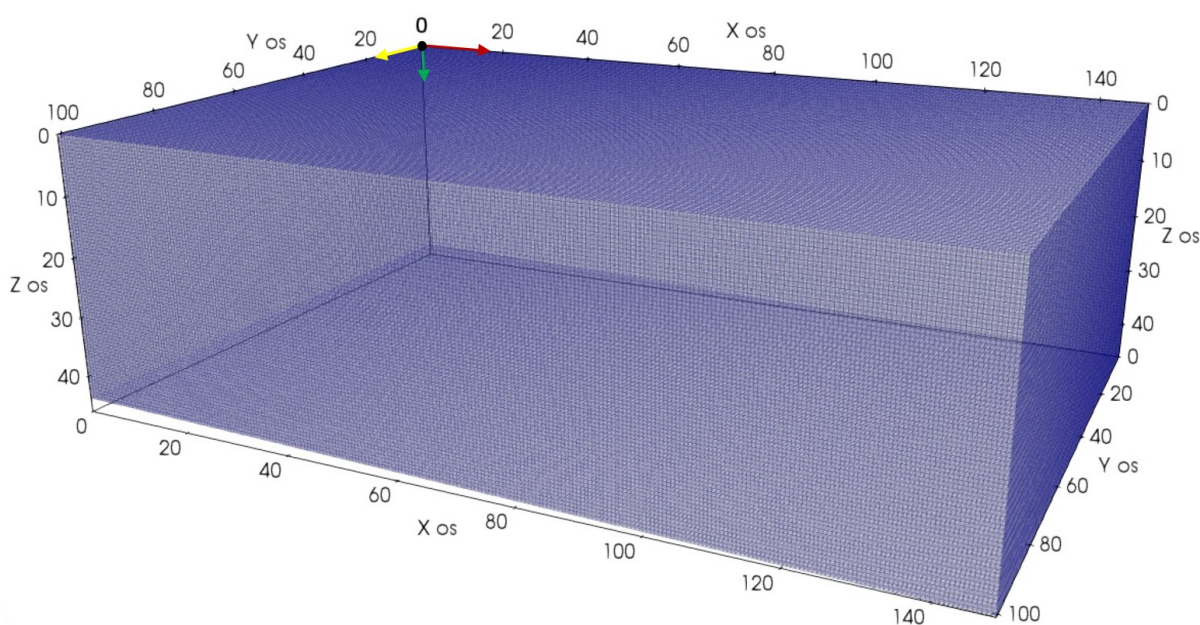
gdje je  $D_T$  koeficijent difuzije [ $m^2/s$ ], a  $S_T$  izvorni član skalara, koji se odnosi na stvaranje ili ponor skalara u transportnoj jednadžbi. S obzirom da različiti dijelovi domene imaju različite gustoće, posebice po dubini u ljetnim uvjetima, u nekim slučajevima se pojavljuje ista vrijednost koncentracije  $\alpha$  za čistu morskou vodu i pomiješanu onečišćenu vodu, stoga je ovaj korak nužan

za razdvajanje onečišćene i čiste morske vode. Ovaj postupak je potrebno koristiti i kod računanja diferencijalnih jednadžbi za temperaturu i salinitet jer također imaju različite vrijednosti u domeni koje se ne mogu jednoznačno povezati s efluentom.

Početna vrijednost skalara  $T$  u domeni iznosi nula, zbog pretpostavke čiste morske vode u domeni. Na ulaznim plohama cjevovoda, postavljena je vrijednost skalara 1 koja predstavlja onečišćenu otpadnu vodu koja izlazi direktno iz uređaja za pročišćavanje. Poznavanjem količine onečišćenja kao što su bakterije ili mikroplastika koje izlaze iz ispusta može se modelirati njihovo širenje u moru. Koeficijent difuzije je postavljen na  $0,002 \text{ m}^2/\text{s}$  i primijenjena je *Gauss limited linear* shema. Za rješavanje polja skalara, korišteni su PBiCGStab metoda i DILU predkondicioner.

#### 4.4 Validacija tehnike ugnježdivanja

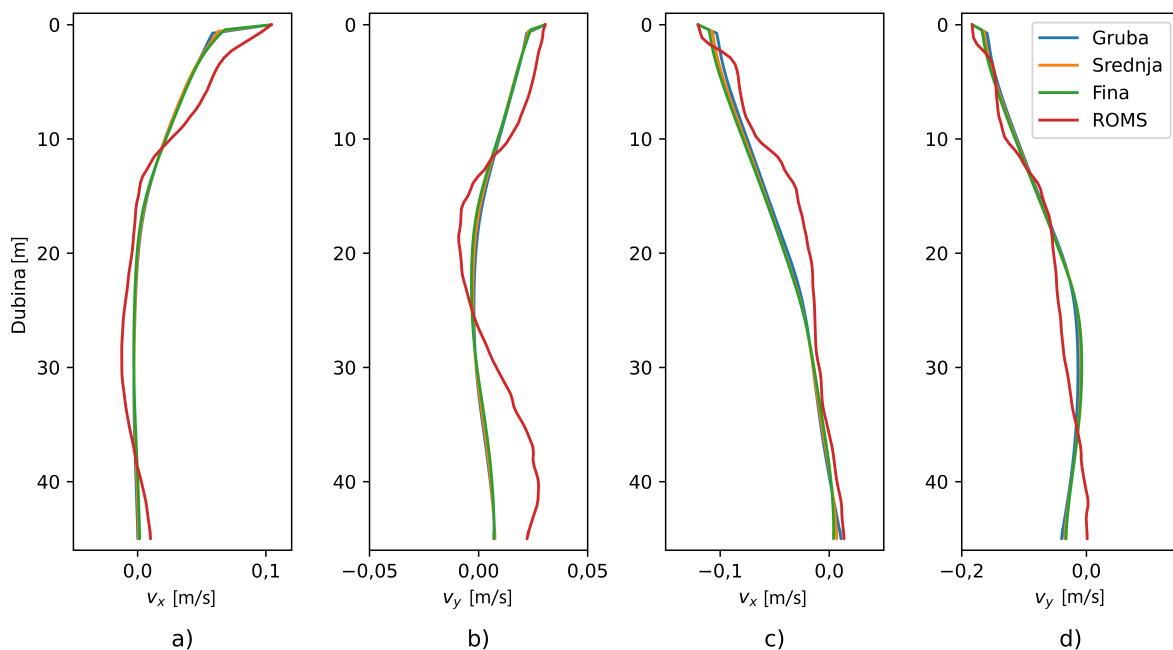
Kako bi se validirala prethodno opisana tehnika jednosmjernog ugnježdivanja, uspoređeni su rezultati za različite numeričke mreže na domeni kao u prethodnom slučaju, no bez ispusta. Vrijednosti su uspoređene nakon 1 sata simulacije s početnim uvjetima iz ROMS-a za lokaciju podmorskog ispusta u Rijeci. Domena i srednja veličina mreže, zajedno sa središtem koordinatnog sustava prikazani su na slici 4.6. Dimenzije domene jednake su kao kod testnog primjera s uključenim nagibom morskog dna. Zbog pojednostavljenog tipa geometrije, mreža se sastoji samo od heksaedara.



Slika 4.6: Prikaz domene i mreže srednje veličine za validaciju tehnike ugnježdivanja [11]

Postavke numeričke simulacije uključujući numeričke sheme, rješavač, tolerancije, kinematički viskozitet, turbulentni Schmitov broj, difuzivnost i graničnu vrijednost CFL-a jednake su kao u testnom primjeru. Rubni uvjeti su također isti, osim što su vrijednosti  $k$  i  $\epsilon$  varijable računane za intenzitet turbulencije 2% na gornjoj plohi. Dakle, manje u odnosu na testni primjer zbog očekivane manje turbulencije u domeni u odnosu na uzgonske mlazove.

Na slici 4.7 prikazane su uspoređene vrijednosti, pri čemu su analizirane komponente brzine u  $x$  i  $y$  smjeru po dubini za središnju točku domene s koordinatama  $x = 74$  m i  $y = 50,375$  m. Numeričke simulacije su provedene za ljetne i zimske rubne uvjete te su rezultati uspoređeni za tri različite gustoće mreže grubu, srednju i finu s  $1,5 \cdot 10^6$ ,  $3,3 \cdot 10^6$ ,  $7,24 \cdot 10^6$  elemenata, pri čemu se pazilo da broj elemenata bude približan broju elemenata testnog primjera. Iz prikazanih rezultata se može uočiti da se kod svih gustoća mreža dobivaju približno jednaki rezultati. ROMS brzine imaju veću razliku u vrijednostima između pojedinih slojeva, dok je kod OpenFOAM simulacije nakon jednog sata, ta krivulja zaglađenija i razlika između slojeva je nešto manja, pri čemu se i dalje prati očekivani smjer i magnituda brzine. Prosječna RMSE vrijednost za sve prikazane rezultate između ROMS i OpenFOAM rezultata iznosi 0,000198, dok je prosječan  $R^2$  0,71.



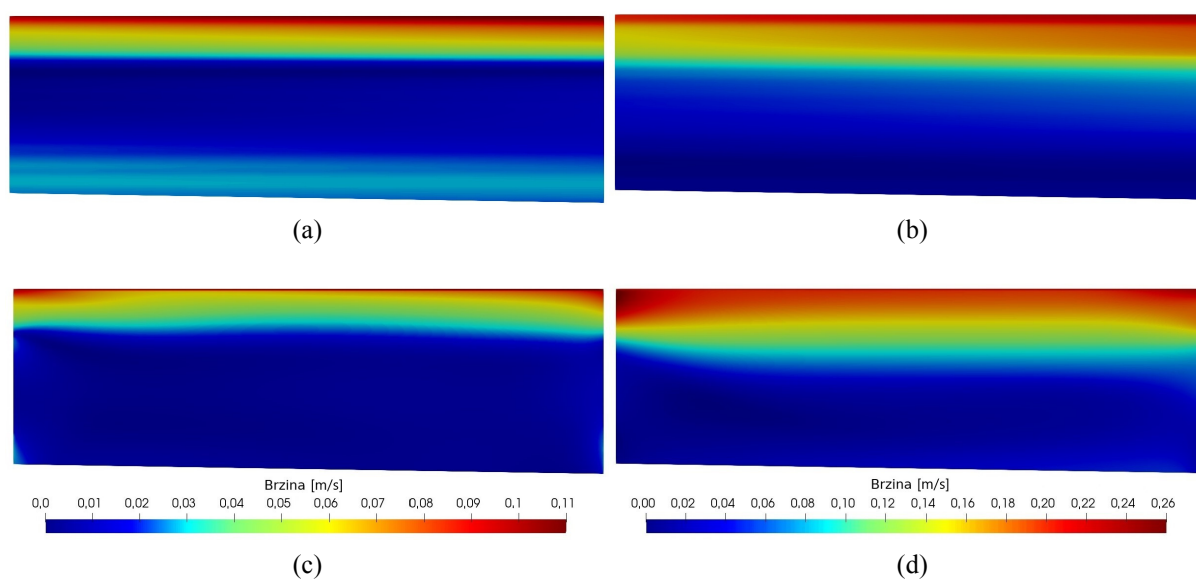
Slika 4.7: Usporedba smjera i magnituda brzine između OpenFOAM simulacija s različitim gustoćama mreže i ROMS podataka za a) zimske uvjete u  $x$  smjeru, b) zimske uvjete u  $y$  smjeru, c) ljetne uvjete u  $x$  smjeru i d) ljetne uvjete u  $y$  smjeru po dubini za točku s koordinatama  $x = 74$  m i  $y = 50,375$  m [11]

Najveća razlika je dobivena za brzinu u  $y$  smjeru u zimskim uvjetima zbog snažnih promjena



u različitim smjerovima koji se mijenjaju po dubini. Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da opisani postupak za obalno modeliranje s većom rezolucijom koji se bazira na jednosmjernom ugnježđivanju primijenjen na praznoj OpenFOAM domeni pokazuje prihvatljivo slaganje, stoga se može koristiti u daljnjoj analizi.

Na slici 4.8 prikazani su rezultati magnitude brzina središnjeg presjeka po y osi za srednje mreže prazne domene za ljetne i zimske uvjete. Gornje slike (a) i (b) prikazuju početne ROMS magnitude brzine, dok donji rezultati (c) i (d) prikazuju vrijednosti nakon jednog sata proračuna. Mogu se uočiti različite magnitude brzine po dubini, pri čemu su najveće vrijednosti u blizini morske površine te je brzina veća za ljetne uvjete u odnosu na zimske. Slično kao i na slici 4.7 veće varijacije u smjerovima brzina za zimske uvjete iz ROMS modela, smanjuju se nakon jednog sata proračuna. Prema tome, dobiveni rezultati sugeriraju da se navedena tehnika može dalje primijeniti za numeričko modeliranje podmorskih ispusta i drugih obalnih struktura.



Slika 4.8: Konture brzine za (a) zimske i (b) ljetne uvjete iz ROMS-a te (c) zimske i (d) ljetne uvjete nakon 1 sata simulacije u vertikalnom presjeku [11]

## 4.5 Rezultati numeričkih modela

U nastavku su prikazani rezultati numeričkih modela testnog primjera podmorskog ispusta u Rijeci u koje su implementirane metode redukcije varijabli i OpenFOAM ugnježđivanja. Pri tome su vrijednosti izračunate za period od jednog sata za jedan ljetni i zimski uvjet. Kako bi se odabrala odgovarajuća mreža, korištena je GCI metoda opisana jednadžbama (2.13-2.16). Us-

poređena je maksimalna visina podizanja uzgorskog mlaza  $h_{uzg}$  pri 0,5% koncentracije onečišćenja prikazanog s pasivnim skalarom za ljetne uvjete. Uspoređene vrijednosti za tri različite mreže prikazane su u tablici 4.1.

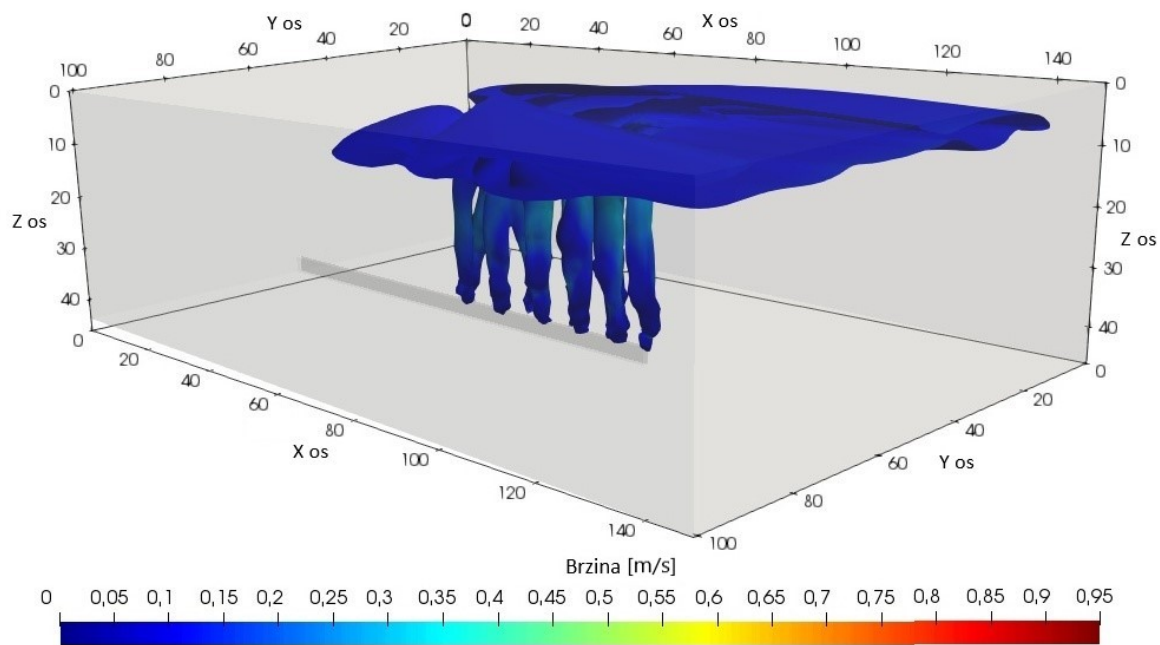
Tablica 4.1: GCI za maksimalnu visinu podizanja uzgorskog mlaza  $h_{uzg}$  pri 0,5% koncentracije onečišćenja za ljetne uvjete [11]

Vrsta mreže	Broj elemenata	Omjer ( $r$ )	$h_{uzg}$ [m]	GCI [%]
Gruba	1.513.063	-	6,73	-
Srednja	3.140.826	1,3	4,92	14,82%
Fina	7.140.178	1,3	4,55	2,61%

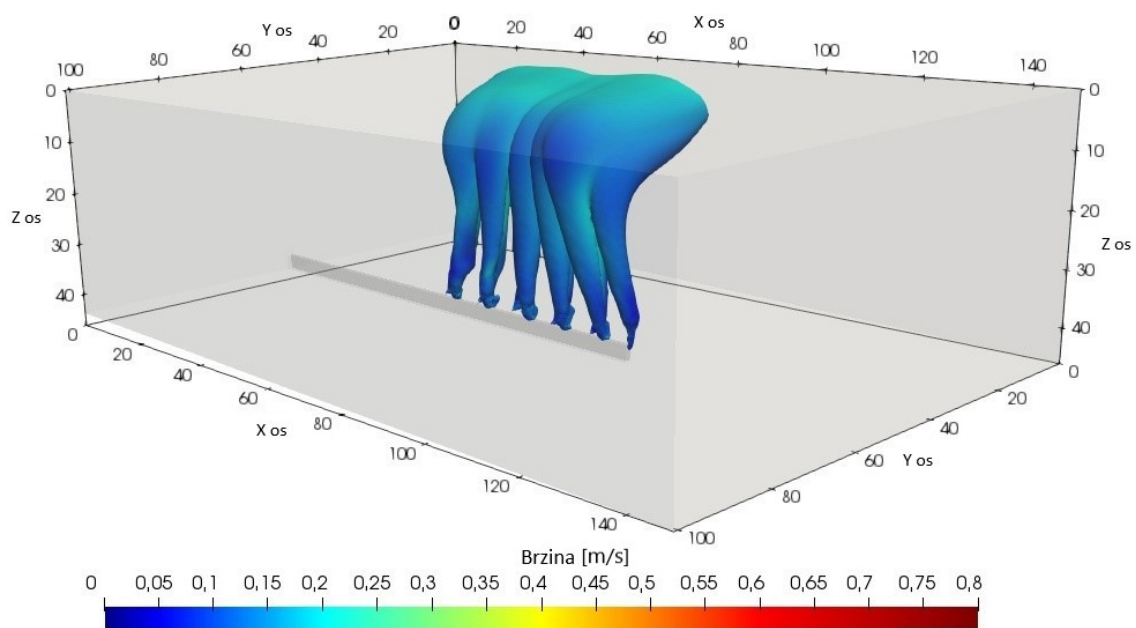
Može se uočiti da se povećavanjem broja elemenata smanjuje vrijednosti  $h_{uzg}$  s asimptotskim rasponom konvergencije prema  $GCI_{s,f}/(r^p \cdot GCI_{g,s}) \sim 1$ , stoga je srednja mreža adekvatna za daljnje korištenje i detaljniju analizu. Povećanje broja elemenata mreže dovodi do veće maksimalne visine podizanja uzgorskog mlaza  $h_{uzg}$  zbog toga što gruba mreža nema dovoljan broj elemenata po dubini da bi adekvatno opisala pojave. Gruba mreža kod višefaznog strujanja uzrokuje veću numeričku difuziju koja rezultira netočnom visinom.

Tijekom izrade mreže, uočeno je da je maksimalni omjer stranica elemenata mreže (engl. *maximum aspect ratio*) veoma bitan parametar kod ovog tipa problema te može imati snažan utjecaj na stabilnost mreže. U slučaju strujanja mora uz obalu, snažne promjene smjera strujanja se dešavaju u svim smjerovima, stoga kod velike vrijednosti omjera stranica elemenata numeričke mreže, promjene u smjeru rastezanja se ne mogu adekvatno opisati. Zbog toga je u ovom istraživanju zadano da njegova vrijednost mora iznositi manje od 5 za sve gustoće mreže.

Slika 4.9 prikazuje izopovršine koncentracije skalara od 0,5 % s konturama magnitude brzine u bliskoj zoni i zoni tranzicije. Može se uočiti da će pri prikazanim ljetnim uvjetima efluent ostati zarobljen pri nižim slojevima zbog snažnog utjecaja stratifikacije gustoće kao što je očekivano [77]. Pri prikazanim zimskim uvjetima skalar će doseći površinu mora, no uz značajno razrijeđenu koncentraciju. Potom će se onečišćenja dalje širiti uglavnom horizontalno uz dominantan utjecaj morskih struja. Pri ljetnim uvjetima daljnje širenje će biti dominantno u negativom smjeru  $y$  osi, a za zimske uvjete u pozitivnom smjeru  $x$  osi što je pod utjecajem strujanja mora. Stoga se može zaključiti da će se efluent nastaviti udaljavati od obale 20. siječnja 2019. u 21 sat. i krenuti prema obali 14. srpnja 2019. u podne. S obzirom da je smjer strujanja mora različit za pojedini dan, nije moguće jednoznačno odrediti ponašanje efluenta, stoga su tu prikazani primjeri za odabrana dva slučaja.



(a)



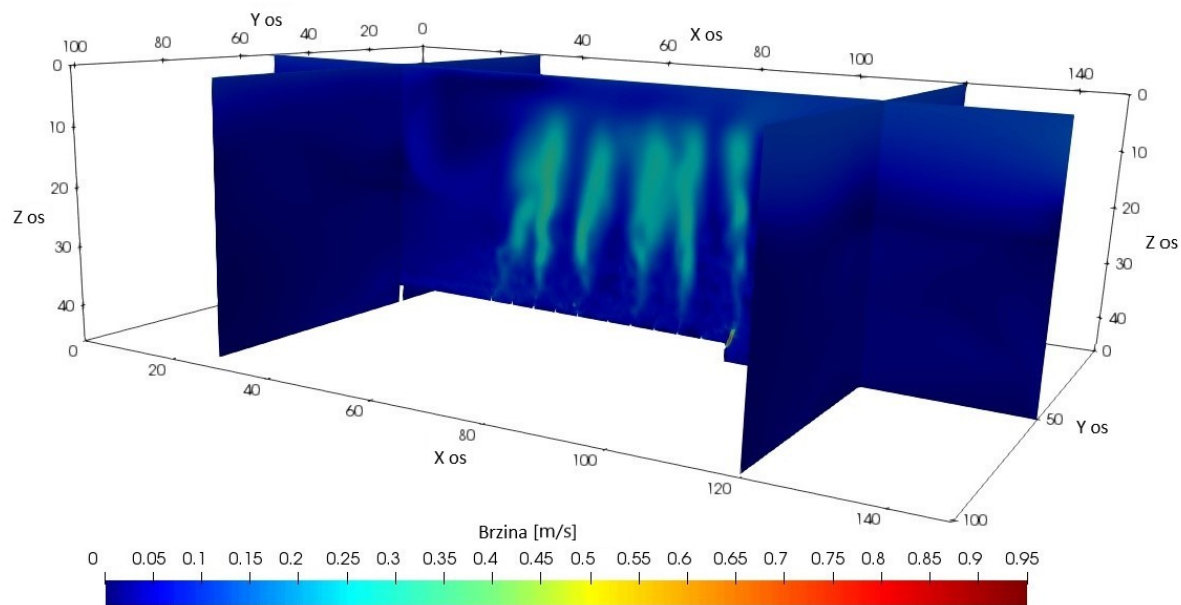
(b)

Slika 4.9: Izopovršine za koncentraciju pasivnog skalara 0,5% obojane prema magnitudi brzina pri odabranim (a) zimskim i (b) ljetnim uvjetima [11]

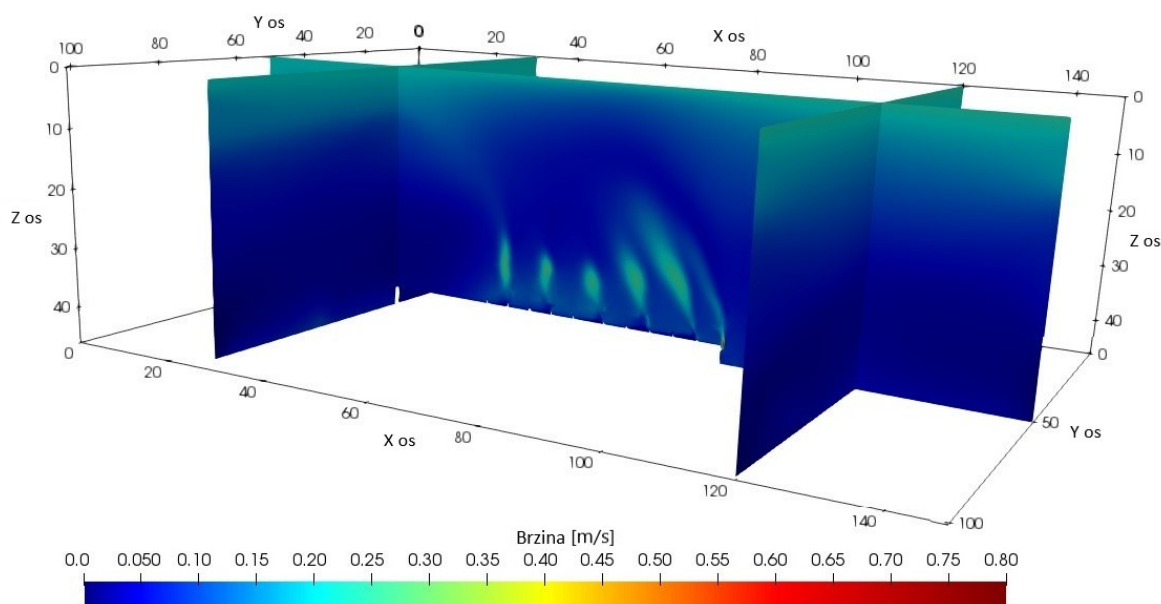
Na slici 4.10 prikazana je magnituda brzine za različite poprečne presjeke. Pri promatranom ljetnom uvjetu, brzine u blizini površine vode su uglavnom usmjerene u negativnom  $y$  smjeru, dok se po dubini smanjuju i uglavnom imaju smjer prema pozitivnom dijelu osi  $y$ . Tijekom zimskog uvjeta, brzine imaju manje magnitude. Pri površini mora su uglavnom usmjerene u



pozitivnom  $x$  smjeru, dok su po dubini dominantno usmjerene prema pozitivnom dijelu  $y$  osi. Iz prikazanih rezultata, može se uočiti da je magnituda brzine strujanja mora pri ljetnim uvjetima veća, stoga ima veći utjecaj na ponašanje efluenta i miješanja, posebice pri nižim dubinama.



(a)

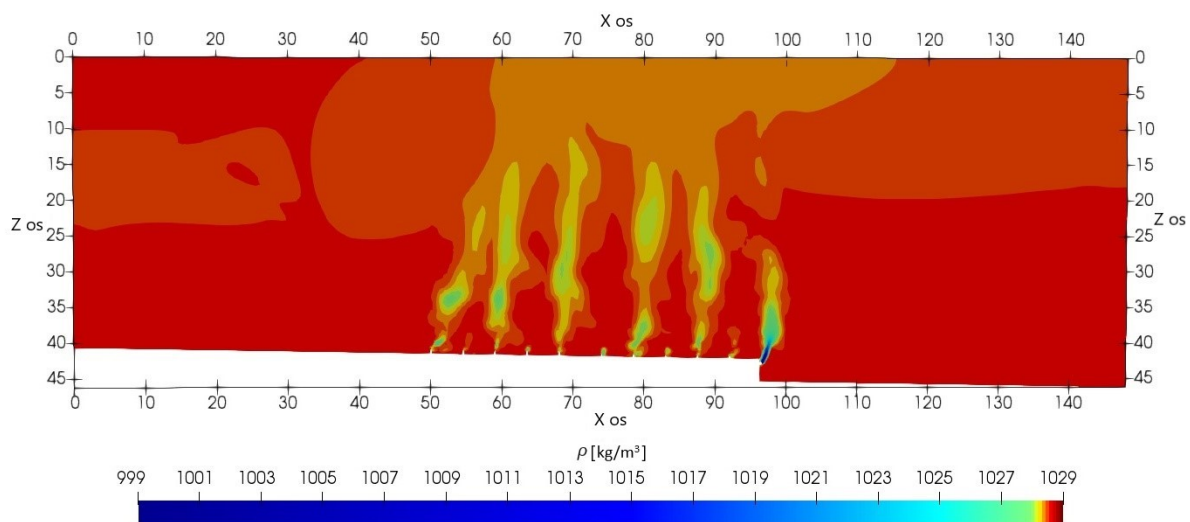


(b)

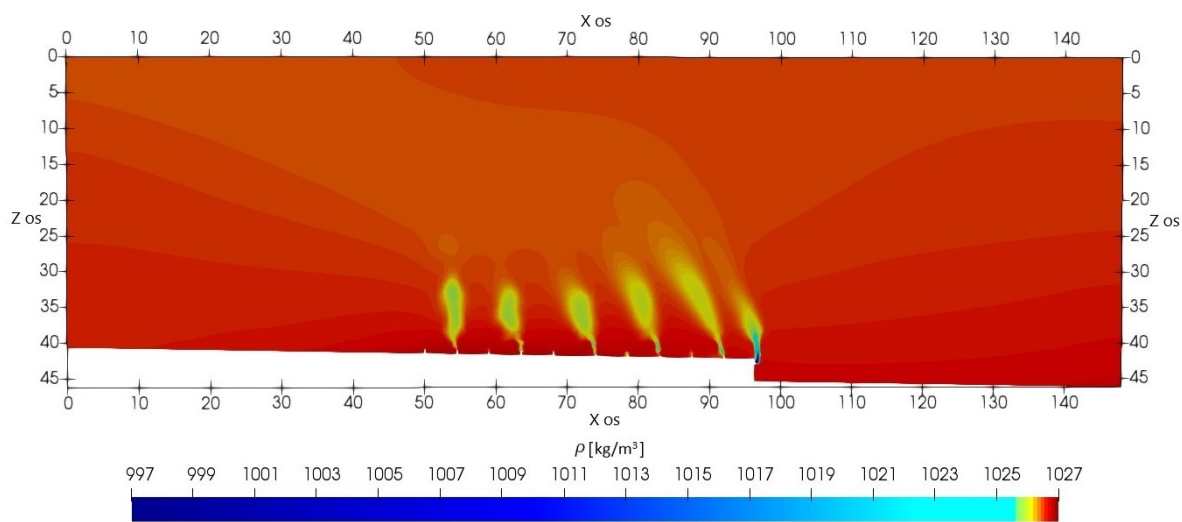
Slika 4.10: Magnitude brzine za središnji presjek po  $y$  osi i presjeke za  $x = 30$  m i  $x = 120$  m pri (a) zimskim i (b) ljetnim uvjetima [11]

Na slici 4.11 prikazane su konture gustoće izračunate na temelju jednadžbe (2.28) za središnji presjek po  $y$  domeni za zimske i ljetne uvjete. Pri ljetnim uvjetima gustoća je veća zbog grijanja

površine i veće razlike u temperaturi između slojeva, stoga su konture efluenta vidljive na nižim dubinama u odnosu na zimske uvjete. Također se može uočiti snažan utjecaj morskih struja pri nižim slojevima za ljetne uvjete, pri čemu uzgonski mlazovi iz podmorskih ispusta imaju izraženije gibanje prema bočnim stranama.



(a)



(b)

Slika 4.11: Konture gustoće na središnjoj plohi po  $y$  smjeru za (a) zimske i (b) ljetne uvjete [11]

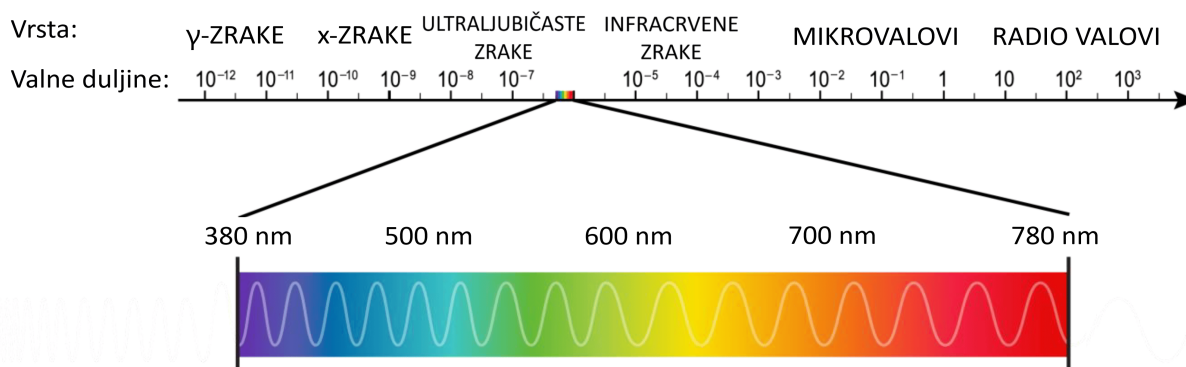
## 5 PRIMJENA SATELITA ZA ANALIZU ONEČIŠĆENJA IZ PODMORSKIH ISPUSTA

U ovom poglavlju dan je pregled tehnika za analizu onečišćenja korištenjem daljinskog očitavanja s posebnim fokusom na satelitske snimke. Prikazan je pregled predobrade snimki, dostupnih baza te preuzimanje podataka. Potom je prikazan postupak analize podmorskog ispusta korištenjem satelitskih snimki te su prikazani rezultati za analizu ispusta u Rijeci. Zatim su uspoređeni rezultati obrade satelitske snimke s rezultatima numeričkog modela.

### 5.1 Daljinsko očitavanje

Daljinsko očitavanje (engl. *remote sensing*) predstavlja skup metoda za dobivanje informacija o površini ili objektu bez direktnog kontakta. Navedeni pristup omogućava analiziranje relativno velikih, udaljenih, opasnih i nedostupnih područja na ekonomičan i brz način bez narušavanja analizirane površine. Daljinsko očitavanje ima raznovrsnu primjenu kao što je praćenje klimatskih promjena, geologija, hidrologija, meteorologija, urbano planiranje, traganje i spašavanje, analiza erozije, šuma i poljoprivrednih zemljišta pri čemu se dobiveni podatci mogu koristiti za kalibraciju, detekciju te kao podrška u odlučivanju.

Elektromagnetsko zračenje predstavlja širenje valova prostorom koji su definirani s frekvencijom, valnom duljinom i amplitudom. Daljinsko očitavanje se bazira na otkrivanju i bilježenju elektromagnetskih valova koji se odbijaju od površine. Pri međudjelovanju elektromagnetskog zračenja s površinom mogu se pojaviti transmisija, refleksija, refrakcija i apsorpcija. Pojava ovisi o vrsti i svojstvima promatrane površine kao što je hrapavost ili glatkost, difuznost ili zrcalnost, nagib površine, stanje i slično. Na slici 5.1 prikazane su vrste elektromagnetskog zračenja. Od navedenih vrsta kod primjene beskontaktnih metoda kod analize okoliša najčešće se koristi vidljivi dio spektra, mikrovalovi, infracrvene i ultraljubičaste zrake.



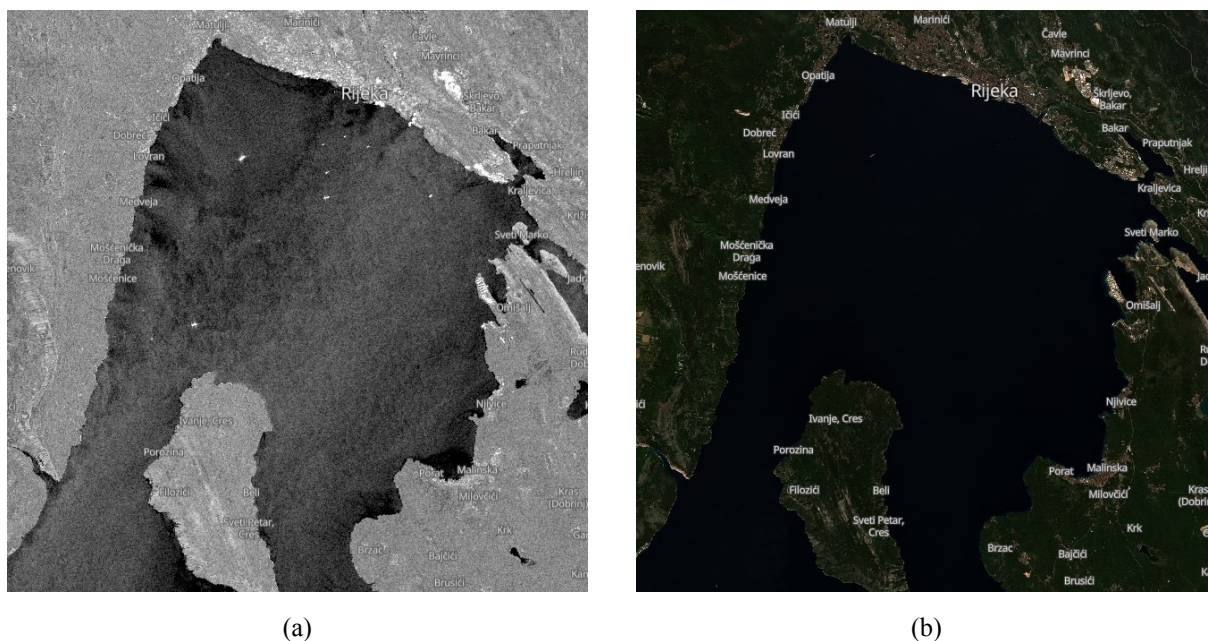
Slika 5.1: Vrste elektromagnetskog zračenja [57]

Prema istraživanju [106] instrumenti, odnosno senzori za daljinska istraživanja se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije prema načinu na koji se energija koristi i odašilje: aktivni i pasivni.

Aktivni senzori stvaraju vlastite signale i bilježe količinu energije raspršene s terena. Pri tome prolaze kroz plinove i oblake prikupljajući jasne podatke bez obzira na dostupnost svjetla i vremenske uvjete, što je velika prednost u usporedbi s pasivnim sensorima. Uglavnom se baziraju na analizi mikrovalnog dijela spektra, koristeći npr. LiDAR (engl. *Light Detection And Ranging*) i radar sa sintetskom aperturom (engl. *Synthetic-aperture radar*, SAR). LiDAR analizira uski raspon frekvencija kako bi se odredila nadmorska visina tla ili dubina vode. SAR je vrsta radarskog sustava koji koristi Dopplerov efekt i princip pokretne antene. Bazira se na odašiljanju više mikrovalova s različitim valnim duljinama, pri čemu se mjeri raspršenost i odbijanje signala.

Pasivni senzori se baziraju na mjerenju zračenja koja se prirodno reflektiraju ili emitiraju od Zemljine površine, atmosfere i oblaka. Uglavnom se baziraju na analizi vidljivog, infracrvenog i mikrovalnog zračenja. Među pasivne senzore spadaju pankromatske, multispektralne i hiperspektralne snimke. Pankromatski senzori (engl. *panchromatic*) snimaju u jednom širokom spektralnom pojasu u vidljivom rasponu, stoga daju crno-bijele ili slike u sivim tonovima visoke rezolucije. Multispektralni senzori (engl. *multispectral*) snimaju slikovne podatke unutar više raspona valnih duljina u elektromagnetskom spektru te se često koriste za praćenje vegetacije, oceanografiju, praćenje okoliša te analizu korištenja zemljišta. Hiperspektralni senzori (engl. *hyperspectral*) imaju više stotina različitih spektralnih pojaseva, što omogućava detaljnu analizu sastava materijala i identifikaciju. Neke podjele također uključuju i superspektralne senzore (engl. *superspectral*) koji imaju broj spektralnih pojaseva između deset i sto, dakle više od multispektralnih, a manje od hiperspektralnih senzora.

Na slici 5.2 prikazani su primjeri korištenja pasivnih i aktivnih senzora na području Riječkog zaljeva. Slika 5.2 (a) prikazuje SAR snimku snimljenu Sentinel 1 satelitom koji nosi aktivni senzor, dok je na slici 5.2 (b) prikazana snimka Sentinel-2 satelita vidljivog zračenja snimljena pasivnim multispektralnim/hiperspektralnim senzorom.



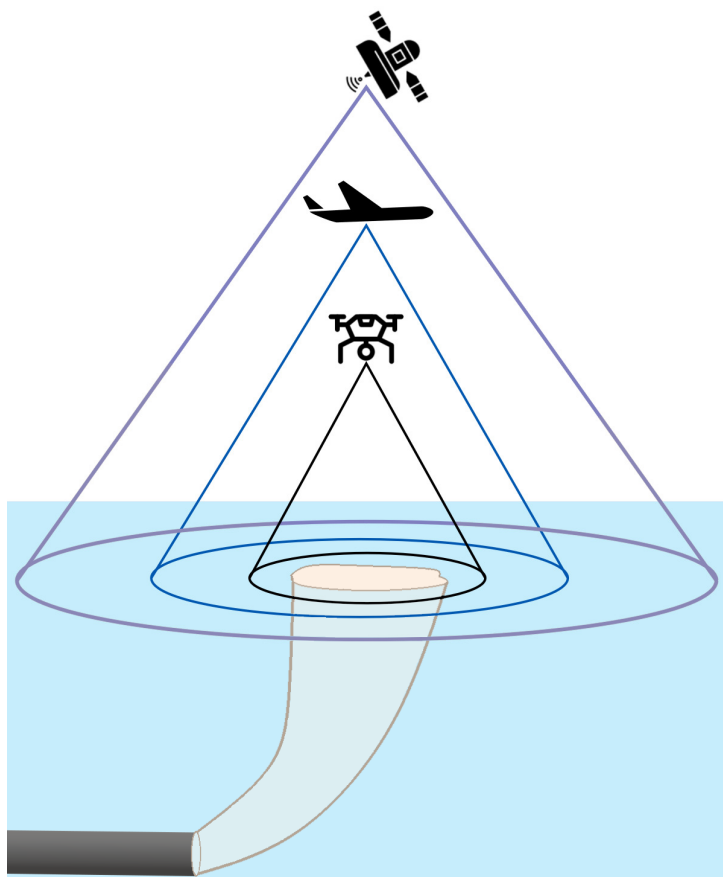
Slika 5.2: Satelitske snimke (a) aktivnih i (b) pasivnih senzora za područje Riječkog zaljeva preuzete iz Sentinel Hub EO Browsera [4]

Kod analize onečišćenja u moru najčešće se koriste tri vrste uređaja koji nose senzore za daljinsko očitavanje prikazani na slici 5.3 [37]. Glavne kategorije uređaja za daljinsku detekciju uključuju bespilotne letjelice (dronove), helikoptere i avione te satelite. Uz to, senzori se mogu postaviti na balone, bove, brodove te se daljinsko očitavanje može izvršiti i s površine zemlje ili mora.

Bespilotne letjelice se danas sve češće koriste za detaljnija daljinska očitavanja zbog fleksibilnosti i mobilnosti snimanog područja, mogućnosti dobivanja podataka u stvarnom vremenu, sve niže cijene te mogućnosti snimanja podataka visoke razlučivosti. Međutim, imaju nekoliko nedostataka uključujući ograničeno trajanje leta zbog kapaciteta baterije ili goriva, ograničena nosivost, osjetljivost na vremenske uvjete, obrada podataka, visoki operativni troškovi i potrebne dozvole za snimanje područja.

Helikopteri i avioni se nalaze na većoj visini u odnosu na bespilotne letjelice stoga omogućavaju analizu većeg područja duži period, najčešće s manjom rezolucijom. Imaju veću nosivost u odnosu na dronove, stoga se može postaviti veći broj raznovrsnih senzora. Međutim imaju veće

troškove, uključujući nabavu opreme, održavanje te pilota. Za takve letove nužno je detaljno planiranje snimanja te usklađenost s zrakoplovnim propisima i pravilima.



Slika 5.3: Shema uređaja za daljinsko očitavanje

Sateliti omogućavaju analizu velikog područja uz najčešće manju vremensku i prostornu rezoluciju. Nedostatak navedenog postupka je veliki utjecaj atmosfere i oblaka te pojava geometrijske distorzije zbog Zemljinog oblika koji utječe na snimke. Prednost navedenog pristupa je što satelitske misije često omogućavaju besplatno dostupne podatke široj javnosti te je isplativiji način dobivanja snimki daljinske detekcije. Osim toga, dostupan je niz programa koji omogućavaju analize snimki za različiti set potreba. Mnogi satelitski senzori su dobro kalibrirani i provjereni kako bi se osigurala točnost podataka. Navedeni pristup omogućava snimanje udaljenih i nedostupnih područja. Podatci se mogu dobiti povijesno te nije nužno planiranje snimanja, stoga se mogu analizirati pojave kroz duži vremenski period. Upravo će se zbog navedenih prednosti u ovom doktorskom radu detaljnije istražiti primjena satelitskih snimki kao tehnike za daljinsko očitavanje i analiziranje rada podmorskih ispusta.

Ovisno o rotaciji i kretanju sateliti se mogu podijeliti u više kategorija. Geostacionarni sateliti kruže oko Zemlje istom brzinom kojom Zemlja rotira, stoga su nepomični s obzirom na Zemlju



koja rotira, a koriste se za komunikaciju i praćenje vremena. Sateliti niske orbite oko Zemlje (engl. *Low Earth Orbit*, LEO) kruže na relativno niskim visinama, obično u rasponu od nekoliko stotina kilometara do 2000 kilometara. Koriste se za promatranje Zemlje, komunikaciju i znanstvena istraživanja. Sateliti srednje Zemljine orbite (engl. *Medium Earth Orbit*, MEO) kruže na srednjim visinama, obično između LEO i geostacionarnih orbita, a koriste se npr. za GPS sustave. Sunčevi sinkroni sateliti imaju orbite koje prolaze iznad istog područja Zemlje u približno isto lokalno vrijeme svaki dan, što omogućuje dosljedne uvjete osvjetljenja, pa se koriste za promatranje Zemlje i misije daljinskog istraživanja. Sateliti u polarnoj orbiti prolaze preko Zemljinih polova i pružaju potpunu globalnu pokrivenost sa svakom orbitom, stoga se koriste za promatranje Zemlje i daljinsko detektiranje. Sateliti s visokom eliptičnom orbitom (engl. *High Earth Orbit*, HEO) zbog oblika orbite omogućuju pokrivenost u regijama gdje to geostacionarni sateliti ne mogu, a primjenjuju se za specifične primjene poput komunikacije na velikim geografskim širinama i praćenja vremena. Osim toga postoje sateliti u orbiti Tundra te satelit u orbiti Molniya koji imaju visoko eliptične orbite te različitu namjenu.

Ovisno o rezoluciji satelitske snimke se mogu razlikovati na temelju: spektralne, prostorne, vremenske i radiometrijske rezolucije [71]. Spektralna rezolucija se odnosi na širinu pojasa snimki i njihov broj. Veći broj pojasa najčešće označava bolje mogućnosti za interpretaciju snimki. Ovisno o širini pojasa elektromagnetskog zračenja i broju pojasa snimke se mogu podijeliti u ranije spomenute kategorije pasivnih senzora: pankromatske, multispektralne, super-spektralne i hiperspektralne.

Prostorna rezolucija se odnosi na razlučivost snimke, odnosno prostor koji predstavlja jedan piksel na slici. Postizanje visoke prostorne rezolucije često dolazi po cijenu smanjene pokrivenosti ili područja snimanja. Suprotno tome, senzori s nižom prostornom rezolucijom mogu pokriti veća područja u jednom prolazu. Ovisno o prostornoj rezoluciji snimke se mogu podijeliti na niske, srednje, visoke i vrlo visoke [92]. Niska rezolucija ima veličinu piksela iznad 500 metara, srednja u rasponu između 50 i 500 metara, visoka između 5 i 50 metara, a vrlo visoka rezolucija ima veličinu piksela između 5 metara i 30 centimetara koliko je trenutno maksimalno moguće kod korištenja komercijalnih satelita.

Vremenska rezolucija definira vrijeme koje je potrebno senzoru da se vrati na prethodno slikano mjesto [17]. Dakle, učestalost snimanja, što se još naziva period ponovne posjete te period u danu kada se snima. Snimke napravljene u isto doba dana mogu olakšati uspoređivanje zbog sličnih uvjeta i osvjetljenja. Vremenska rezolucija pasivnih senzora može ovisiti o stanju

atmosfera, dakle u slučaju potpune prekrivenosti oblacima podatci neće biti dostupni. Osim toga, satelitske misije u privatnom vlasništvu mogu imati nejednoliku vremensku rezoluciju jer se snimanje vrši na zahtjev. Zbog određenog stupnja preklapanja susjednih orbita satelita, dijelovi Zemlje na višim geografskim širinama se češće snimaju u odnosu na ekvator. imaju tendenciju ponovnog snimanja slika češću od drugih.

Radiometrijska rezolucija odnosi se na sposobnost senzora da razlikuje različite razine svjetline ili refleksije u elektromagnetskom spektru. Svakom pikselu na slici dodijeljen je digitalni broj (engl. *digital number*, DN) ili vrijednost piksela, koja odgovara intenzitetu zračenja koje prima senzor za tu određenu lokaciju na površini Zemlje. Kvantificira se kao digitalna vrijednost koju senzor može zabilježiti za svaki piksel na slici, a najčešće iznosi između 8 i 32 bita. Viša radiometrijska rezolucija daje više detalja, ali također zahtijeva više resursa za pohranu i obradu, stoga je potrebno odabrati adekvatnu rezoluciju ovisno o primjeni.

## 5.2 Analiza onečišćenja temeljem satelitskih snimki

Geofizička istraživanja poput kvalitete vode i dinamike onečišćenja ovise o svojstvima vode [96]. Bistra i čista voda apsorbira svjetlost dok pomiješana s drugim komponentama raspršuje svjetlosne zrake. Voda, odnosno more je miješana otopina koja sadrži organske i anorganske tvari u suspendiranom ili otopljenom obliku. Interakcija između sunčevog zračenja i molekula vode odvija se kada nadolazeći elektromagnetski valovi pogode vodeno tijelo, pri čemu se mali dio svjetlosti reflektira izravno od površine. Svojstva apsorpcije, refleksije i raspršenja mogu varirati ovisno o komponenti i tvarima. Analiza spektralne refleksije i prigušenja korisna je za procjenu koncentracije suspendiranih krutih tvari, cvjetanja algi i slično [32].

Za analizu kvalitete vode i pojave onečišćenja ključni pokazatelji se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije: optički i neoptički. Optički aktivni sastojci apsorbiraju određeni karakteristični raspon valnih duljina. Pod optičke parametre kvalitete vode spadaju: klorofil, obojena otopljena organska tvar (engl. *Colored dissolved organic matter*, CDOM), zamućenost, prozirnost i koncentracija suspendiranih čestica. Neoptički aktivni parametri kvalitete vode su oni na koje ne utječe elektromagnetski spektar, ali su bitni za onečišćenje, pa se nastoje korelirati s raznim vrstama snimki. Neki od takvih parametara su salinitet, dušik, fosfor i otopljeni kisik.

Efluentni iz komunalnih otpadnih voda sadrže veliku količinu hranjivih tvari, dušika i fosfora, koji pridonose rastu fitoplanktona (mikroalgi). Visoke koncentracije organske tvari i hranjivih



tvari u ispuštima pospješuju rast fitoplanktona i dovode do cvjetanja algi te do smanjenja količine otopljenog kisika [88]. Fitoplankton je biološki parametar koji se može koristiti kao indikator za ocjenu kakvoće vode. Fitoplankton je također najveći doprinositelj kisika u vodama. Klorofil se koristi kao pokazatelj intenziteta rasta algi, a poznat je po svojoj sposobnosti apsorpcije sunčeve svjetlosti i snažno je uključen u ciklus fotosinteze. Plavu i crvenu valnu duljinu pigmenti apsorbiraju, dok zelenu svjetlost spektra reflektiraju, stoga je zelena boja najkorisnija za otkrivanje koncentracije klorofila. Tri osnovne vrste klorofila koji se mogu naći u morskoj vodi su klorofil a, klorofil b i klorofil c.

Klorofil a je najčešća vrsta klorofila u morskoj vodi koji ima zelenu boju te predstavlja najčešću metodu za procjenu biomase i produktivnosti fitoplanktona. Osim toga, pomoću satelitskih snimki može se analizirati koncentracija klorofila b žutozelene boje, pa se može razlikovati u odnosu na klorofil a. Njegova koncentracija je manja te se nalazi u kopненоj vegetaciji, stoga se povezuje s ušćem rijeka, obalnom erozijom te prijenosom čestica s kopna u ocean. Klorofil c apsorbira svjetlost u plavozelenom spektru, a povezan je s određenim skupinama morskih algi, kao što su dijatomeje i dinoflagelati, međutim količina klorofila c je puno manja u odnosu na klorofil a. Prethodna istraživanja [30, 44, 109] su analizirala utjecaje podmorskih ispusta na temelju količine klorofila a, dok su neki autori [40] uzimali u obzir i količinu klorofila b.

Obojena otopljena organska tvar (CDOM) jedan je od pokazatelja kvalitete vode koji se može procijeniti daljinskim očitavanjem. CDOM se može mjeriti u obliku otopljenog organskog ugljika (DOC) i ukupnog organskog ugljika (TOC). Postoje različiti izvori DOC-a poput cvjetanja algi i fitoplanktona. Ugljikohidrati, masne kiseline, aminokiseline i drugi ugljikovodici smatraju se prirodnom organskom tvari (NOM), koja je također odgovorna za koncentraciju CDOM-a u vodenom stupcu. Osim toga, različiti izvori vode imaju različite količine CDOM-a, stoga njegova analiza omogućava razlikovanje porijekla vode. Zbog navedenog, CDOM se povezuje s organskom tvari dobivenom iz raspadajućeg biljnog i mikrobnog materijala, stoga predstavlja jednu od mjera za određivanje mikrobiološkog onečišćenja. Velike količine CDOM-a dolaze iz otpadnih voda, stoga se u nekim slučajevima koristi za praćenja oblaka efluenta. CDOM je uočljiv u ultraljubičastom (UV) i plavom području elektromagnetskog zračenja.

Mutnoća (zamućenost), prozirnost i koncentracija suspendiranih čestica predstavljaju tri povezane optičke karakteristike morske vode koje ukazuju na kvalitetu vode. Zamućenost je mjera prozirnosti vode koja proizlazi iz količine svjetlosti raspršene materijalom u vodenom tijelu i povezana je sa suspendiranim česticama pa se smanjenjem zamuljivanja i sedimentacije može dobiti bistra

voda. Prozirnost vode odnosi se na sposobnost vode da propušta svjetlost i omogući objektima da budu vidljivi ispod svoje površine. Mjerenje zamućenosti je u korelaciji s procjenom suspendiranih krutih tvari [115]. Prisutnost suspendiranih čestica u vodi može utjecati na vizualnu bistrinu vode i na prodiranje svjetlosti u vodeni stupac. To su čvrste ili tekuće čestice koje su fizički suspendirane u vodenom stupcu. Mogu uključivati sedimente, glinu, mulj, organsku tvar i druge čestične materijale. Suspendirane čestice mogu varirati u veličini, od velikih vidljivih čestica do mikroskopskih čestica.

Osim promatranja onečišćenja na temelju pojedinih parametara, veliki broj istraživanja je analizirao kvalitetu morske vode na temelju boje [19], dakle bez direktnog povezivanja valne duljine s nekim od čimbenika u vodi. U tim slučajevima je i analizirana prostorna distribucija relativne varijabilnosti povratno raspršenih signala u različitim spektralnim područjima, kako bi se odredila granica vodenih područja karakteriziranih optičkim anomalijama uslijed utjecaja ispusta. U nekim slučajevima, optička anomalija perjanice može se vidjeti bez posebne obrade satelitskih slika.

Važan parametar za analizu ispusta je temperatura mora snimljena pomoću satelitskih snimki u termalnom infracrvenom zračenju (engl. *Thermal Infrared radiation*, TIR). Navedeno je posebice bitno kod analize termalnih ispusta koji imaju temperaturu značajno različitu od lokalne morske vode.

Satelitski radar sa sintetičkom aperturom (SAR) može se koristiti za otkrivanje površinskog zagađenog otjecanja i ispuštanja otpadnih voda iz kanalizacije u relativno velikim područjima tijekom dana i noći, kao i kroz oblake. Postupak se bazira na analizi promjena na površini mora koje se pojavljuju kada mlaz dolazi do površine u obliku povećane namreškanosti. Ukoliko se u efluentu nalaze veće količine onečišćenja lakšeg od morske vode kao što je nafta ili mazut, na površini u blizini ispusta će se pojaviti sloj sa smanjenom hrapavosti površine, odnosno slabijom sposobnošću prenošenja valova koji se može također detektirati pomoću SAR snimki. Navedeno je posebice važno kod industrijskih ispusta u koje mogu dospjeti takve vrste onečišćenja i uzrokovati ekološke probleme. Osim toga, SAR snimke mogu očitati namreškanost na površini koja se pojavljuje kada efluent dođe blizu površine [23].

Budući da efluent uglavnom sadrži slatku vodu, manje je gustoće od okolne slane vode i ima tendenciju izdizanja prema površini. Prethodna istraživanja pokazala su da se uglavnom sloj onečišćene vode iz efluenta obično nalazi u piknoklini. Dakle, kada se piknoklina nalazi sasvim blizu površine mora, perjanica otpadnih voda može se uočiti u optičkom rasponu pomoću

daljinskog očitavanja. Oscilacije piknokline dovode do stvaranja unutarnjih valova i deformacija spektra površinskih valova, koji se detektiraju iz satelitskih snimki [25]. Ukoliko perjanica dođe blizu površine, na snimkama se mogu uočiti i mrlje, pjena, lokalna strujanja itd., koji nastaju na površini nakon ponovnog izranjanja mlaza potopljenog ispusta [24], koji se također mogu detektirati pomoću snimki.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da apsolutne vrijednosti parametara morskog okoliša iz multispektralnih satelitskih podataka pokazuju da izračunate ovisnosti koje ih povezuju s karakteristikama povratno raspršenih signala zračenja ne vrijede za sve vrste morskih voda, posebice kod plitkih voda, stoga se često koristi analiza promjena zabilježenih parametara te relativne varijabilnosti povratno raspršenih signala.

Analizom satelitskih snimki mogu se otkriti i odrediti antropogeni utjecaji ispusta te granice obalnih vodnih područja karakteriziranih optičkim anomalijama uzrokovanim utjecajem ispusta te karakteristike mlaza. Osim toga, kontrasti boja otkriveni daljinskim očitavanjem važan su pokazatelj za promatranje određenih područja kao što su granice strujanja, vrtlozi, područja miješanja, uzdizanje, itd.. Analizom snimki kroz duži vremenski period može se uočiti učestalost pojavljivanja određenih anomalija. Također, moguće je otkrivanje greške ispusta, kao što je kvar pumpi ili puknuće cjevovoda, koji rezultira ispuštanjem otpadnih voda izravno na obalu, kao u radu autora Bondur i sur. [24].

### 5.3 Predobrada satelitskih snimki

Kako bi se minimalizirao utjecaj različitih vanjskih faktora na satelitske snimke, nužna je njihova predobrada na temelju metoda opisanih u nastavku. Radiometrijska kalibracija se odnosi na pretvorbu digitalnih brojeva (DN-a) u fizičke jedinice. Cilj je standardizirati radiometrijske vrijednosti koje bilježi senzor, osiguravajući dosljednost i točnost u mjerenjima, kako bi se omogućila smisljena i usporediva analiza podataka dobivenih iz različitih senzora.

Atmosferska korekcija (engl. *atmospheric correction*, AC) je korak ispravljanja utjecaja atmosfere na satelitsku snimku. Uzima u obzir stanje atmosfere u trenutku snimanja uključujući ozon, aerosol, vodenu paru i slično te kompenzira utjecaj refleksije na snimke. Ciljevi atmosferske korekcije su uklanjanje atmosferskih učinaka, odnosno smanjivanje utjecaja atmosferske apsorpcije i raspršivanja te izračun površinske refleksije. Atmosfera, posebice oblaci imaju utjecaj na vidljivi dio spektra. Osim toga, infracrveni senzori ne mogu očitavati snimke kroz

oblake, a mikrovalni senzori ne mogu snimati u slučajevima jakih oborina. Još uvijek ne postoji jednoznačni algoritam za korekciju snimki. Neki od autora [24] analizirali su samo slike s postotkom oblaka manjim od 20%. Uglavnom se na slike s većim postotkom oblaka ne može primijeniti čak niti atmosferska korekcija. Neke od metoda atmosferske korekcije su specifične za određene senzore ili pojaseve, stoga odabir metode ovisi o dostupnim snimkama i njihovoj primjeni.

Geometrijska korekcija i korekcija terena su ključni koraci u predobradi slika daljinskog istraživanja čiji su ciljevi poboljšati geometrijske kvalitete podataka, ispraviti distorzije uzrokovane varijacijama u visini terena te osigurati da pikseli odgovaraju određenim geografskim lokacijama na Zemljinoj površini. Geometrijska korekcija je postupak smanjivanja distorzije satelitskih snimki uzrokovanih karakteristikama senzora i geometrijom gledanja, odnosno rotacijom i zakrivljenosti Zemlje, a bazira se na identifikaciji kontrolnih točaka s poznatim koordinatama (engl. *ground control points*, GCP). Proces korekcije terena uključuje integraciju digitalnog modela reljefa (engl. *digital elevation model*, DEM) kako bi se izračunali pomaci piksela i ispravile varijacije u terenu te prilagodila veličina piksela. Postupkom georeferenciranja, svakom pikselu se dodjeljuje geografske koordinate, kako bi se osiguralo točno pozicioniranje. Na temelju toga se provodi ponovno uzorkovanje snimki (engl. *resampling*) čime se osigurava ravnomjernu raspoređenost piksela i poravnatost s terenom. Geometrijska korekcija je nužna kod preciznog prostornog poravnanja i mjerenja, a korekcija terena kod analize područja s raznolikom topografijom. Ortorektifikacija je metoda za uklanjanje nepravilnosti snimke uzrokovanih nagiba senzora, zakrivljenosti Zemlje i varijacijama u visini terena, dakle obuhvaća obje vrste korekcije.

Satelitski podatci najčešće su dostupni u sedam razina (engl. *levels*) uključujući različite vrste predobrade satelitskih snimki koje su hijerarhijske, odnosno razine uključuju obrade iz prethodnih razina, a definirane su na sljedeći način:

- Razina 0 – neobrađene snimke direktno sa senzora. Uglavnom se ne prosljeđuju korisnicima, osim u slučaju analize senzora
- Razina 1A – obrađene snimke s radiometrijskom korekcijom i kalibracijom senzora gdje su digitalni brojevi brojača senzora pretvoreni u fizičke jedinice radijacije ili refleksije. Namijenjeno je za vlastitu geometrijsku obradu slike.
- Razina 1B – primijenjena je geometrijska korekcija koja je nastala zbog rotacije, zakrivl-

jenosti Zemlje, panoramske distorzije i varijacije u orbitalnoj visini satelita.

- Razina 2A – uključuje mapirane podatke u kartografsku projekciju na temelju informacija o poziciji satelita. Kod nekih satelita može uključivati i atmosfersku korekciju. Navedena razina i više su izravno upotrebljive za većinu znanstvenih primjena.
- Razina 2B – primijenjeno je georeferenciranje uz geometrijsku korekciju bazirano na usporedbi točaka za visoku točnost lokacije.
- Razina 3A – uključuje ortorektifikaciju, odnosno uzima u obzir DEM, što je posebice bitno kod visokog terena.
- Razina 3B – uključeno veće područje koje se sastoji od više scena.

Nova istraživanja uključuju i razinu 4 na kojoj je napravljena detaljna predobrada te najčešće uključuje validirana mjerenja više satelita kroz duži period. Kod nekih satelitskih misija postoji i razina 1C, koja obuhvaća radiometrijsku i geometrijsku korekciju uključujući ortorektifikaciju, dodavanje radiometrijskog pomaka i prostornu registraciju na globalnom referentnom sustavu, no ne uključuje atmosfersku korekciju.

#### **5.4 Baze satelitskih snimki i preuzimanje podataka**

Satelitske misije se sastoje od jednog ili više satelita koji kruže oko Zemlje. Postoji veliki broj lansiranih satelitskih misija s različitim namjenama, uključujući promatranje Zemlje, znanstveno istraživanje, komunikaciju, navigaciju i istraživanje svemira, a neke od njih su Copernicus, Landsat, MODIS, METEOSAT, GPS.

Copernicus je program Europske unije za promatranje Zemlje, ranije poznat kao GMES (engl. *Global Monitoring for Environment and Security*). Cilj Copernicus programa je pružanje podatka visoke kvalitete i visoke razlučivosti za promatranje zemlje javnim i privatnim industrijama kao pomoć u praćenju i strateškom planiranju aktivnosti. Copernicus program ima šest tematskih područja: kopno (engl. *Copernicus Land Monitoring Service*, CLMS), more (engl. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, CMEMS), atmosfera (engl. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*, CAMS), klima (engl. *Copernicus Climate Change Service*, C3S), hitni slučajevi (engl. *Copernicus Emergency Management Service*, EMS) i dodatni s ograničenim pristupom za sigurnost (engl. *Copernicus Security Service*). Kroz tematska po-

dručja, satelitskih podatci se nadopunjuju terenskim mjerenjima te promiču globalnu suradnju u rješavanju zajedničkih izazova povezanih sa Zemljinim okolišem.

Copernicus program sastoji se od misija Sentinel 1, 2, 3, 4, 5, 5P i 6. Sentinel-5P se koristi za analize kvalitete zraka, UV zračenja, oblaka te omogućava mjerenje parametara kao što su UV, oblaci, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCHO, CO, CH<sub>4</sub>, itd.. Takve snimke imaju visoku vremensku, ali nisku prostornu rezoluciju, stoga nisu adekvatne za analizu onečišćenja u moru. Sentinel 4 i 5 će se lansirati u budućnosti i koristit će se također za analizu kvalitete zraka. Sentinel-6 je misija čiji je primarni cilj radarsko mjerenje promjene visine mora zbog klimatskih promjena, međutim ima nisku prostornu i vremensku rezoluciju stoga također nije adekvatna za ovakve primjene.

Ciljevi misije Sentinel-3 koja se sastoji od 2 satelita su mjerenje topografije, temperature, morskih ekosustava, kvalitete vode, zagađenja i drugih značajki za predviđanje karakteristika oceana te okoliša i praćenje. Ima vremensku rezoluciju od 2 dana, međutim minimalna prostorna rezolucija iznosi 300 metara. Zbog toga su takve snimke veoma korisne u promatranju pojava i onečišćenja na većoj prostornoj skali, no u ovom istraživanju se neće detaljnije analizirati.

Sentinel-1 je prva satelitska misija koju je razvila Europska svemirska agencija (ESA) za program Copernicus. Sentinel-1 nosi C-pojasni radar sa sintetičkom aperturom (SAR) koji može prikupljati podatke bez obzira na vremenske uvjete ili dostupnost svjetla. Misija ima raznovrsnu primjenu uključujući praćenje valova, izlivanje nafte, analize leda, prirodnih katastrofa, praćenja brodova i slično, s prostornom rezolucijom do 5 metara.

U ovom istraživanju će se koristiti snimke iz Sentinel-2 satelitske misije koju je razvila ESA u sklopu programa Copernicus. Misija je osmišljena za praćenje Zemljine kopnene površine s fokusom na pružanje slika visoke razlučivosti za širok raspon primjena, uključujući poljoprivredu, šumarstvo, mapiranje zemljišnog pokrova i praćenje okoliša. Sentinel-2 pruža snimke 13 različitih valnih duljina uključujući vidljive, bliske infracrvene i kratkovalne infracrvene pojaseve uz različite rezolucije prikazane u tablici 5.1, dakle spada u kategoriju multispektralnih, odnosno superspektralnih satelita. Prostorna rezolucija ovisi o spektru koji se promatra, kao što se može vidjeti u tablici, a iznosi između 10 i 60 m.

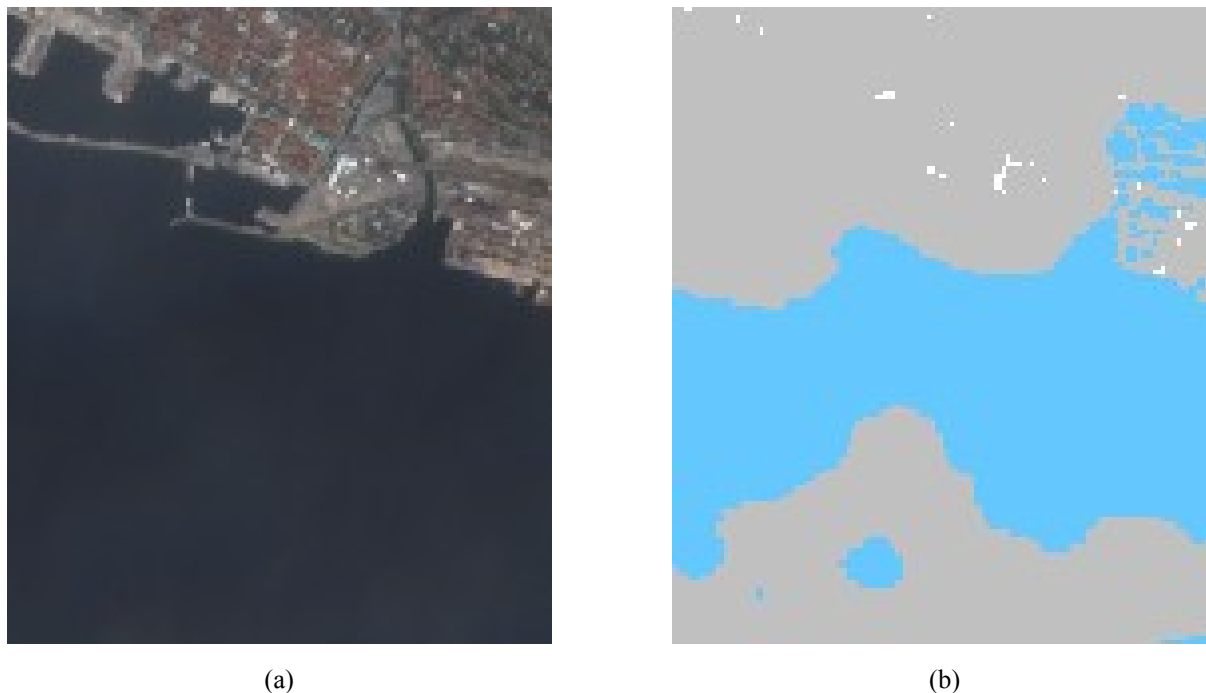
Misija se sastoji od dva satelita S1A i S1B, koji prolaze iznad istog mjesta svakih 10 dana, pa vremenska rezolucija iznosi 5 dana. Sentinel-2 je sunčevi sinkroni satelit, stoga prolazi iznad lokacije na Zemlji u isto doba dana. U ovom istraživanju se analiziralo područje grada Rijeke, za koji se mogu dobiti snimke u periodu oko 11 ili 12 sati ovisno o ljetnom ili zimskom računanju vremena, s obzirom da je vrijeme zadano prema koordinatnom svjetskom vremenu (UTC).

Tablica 5.1: Valne duljine i spektar Sentinel-2 satelita, gdje je cvd centralna valna duljina [4]

Prostorna rezolucija rezolucija [m]	Broj pojasa	S2A/S2B		Namjena
		Centralna valna duljina [nm]	Širina pojasa [nm]	
10	2	492,4/492,1	66	Plava
	3	559,8/559	36	Zelena
	4	664,6/665	31	Crvena
	8	832,8/833	106	NIR
20	5	704,1/703,8	15/16	Vegetacija
	6	740,5/739,1	15	
	7	782,8/779,7	20	
	8a	864,7/864	21/22	
	11	1613,7/1610,4	91/94	Snijeg/led
	12	2202,4/2185,7	175/185	
60	1	442,7/442,3	21	Aerosol
	9	945,1/943,2	20/21	Vodena para
	10	1373,5/1376,9	31/3	Cirusi

U ovom istraživanju snimke Sentinel-2 satelita preuzete su iz Sentinel Hub EO Browsera [4] u tiff formatu s 32-bitnom radiometrijskom rezolucijom kako bi se moglo snimiti male promjene u blizini ispusta. Svaki piksel tiff snimke ima vrijednost između 0 i 1 koja odgovara refleksiji, odnosno predstavlja očitavanje senzora između reflektirane i upadne svjetlosti. Preuzete su snimke kompozita pravih boja (engl. *true color*) koje se sastoje od tri valne duljine crvene, zelene i plave, tvoreći RGB (engl. *red, green, blue*) sliku. Navedene snimke napravljene su na temelju B2, B3 i B4 pojasa. Primjer takve snimke, prethodno je prikazan na slici 5.2 (b).

Sentinel-2 pruža više razina podataka uključujući 1C i 2A. U ovom istraživanju korišteni su podatci razine 2A koji obuhvaćaju radiometrijsku kalibraciju, atmosfersku korekciju, geometrijsku korekciju i korekciju terena, stoga takvi podatci nezahtjevaju daljnju obradu snimki i mogu se direktno koristiti za analizu. Za atmosfersku korekciju razine 2A korišten je Sen2Cor algoritam. Navedena korekcija obuhvaća i modul za klasifikaciju scene čime se detektiraju različita područja kako bi se razlikovala mutni pikseli, bistri pikseli i vodeni pikseli. Dostupno je 12 različitih kategorija uključujući klase oblaka, vegetacije, tla/pustinje, vode i snijega s rezolucijom od 60 metara. Navedeno je veoma korisno kako bi se uočili oblaci i sjene iznad morske površine, koji u nekim slučajevima nisu vidljivi i teško ih je razlikovati u odnosu na promjene uzrokovane podmorskim ispustima. Primjer navedene klasifikacije i snimke stvarnih boja s oblacima se nalazi na slici 5.4. Može se uočiti da na primjeru stvarnih boja oblaci nisu u potpunosti uočljivi te se ne može jednoznačno odrediti njihova prisutnost, zbog toga je ovakva klasifikacija veoma korisna kod analize i razlikovanja snimki sa i bez oblaka te se koristila u ovom istraživanju.

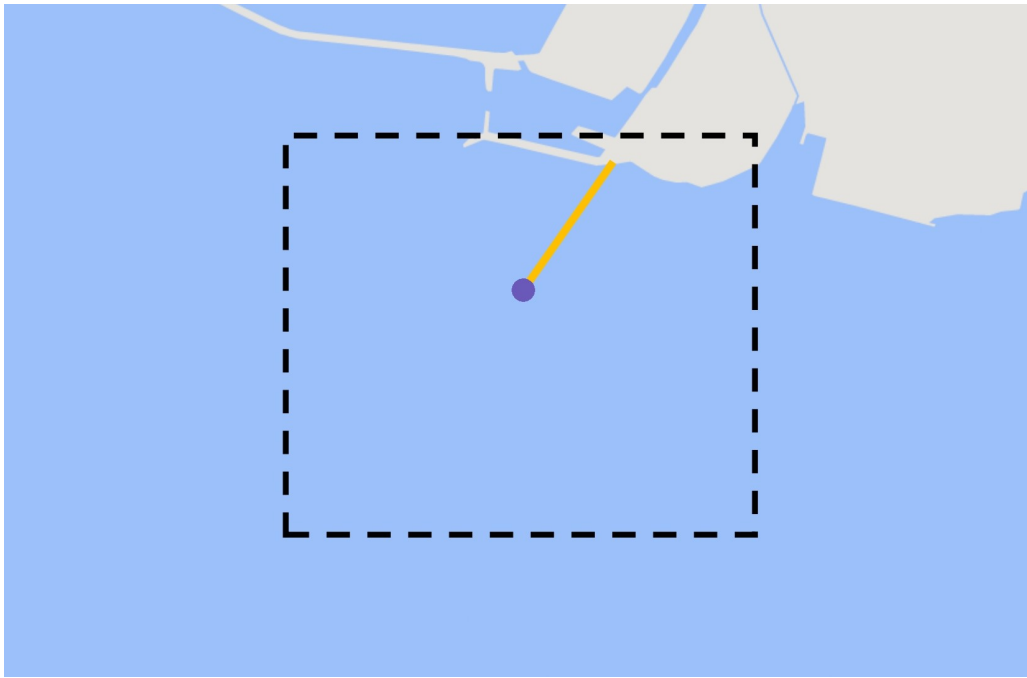


Slika 5.4: Satelitske snimke (a) stvarnih boja i (b) klasifikacije scene na području iznad Riječkog ispusta (12.9.2023) pri čemu svjetlo plava boja predstavlja tanki cirus, siva srednju vjerojatnost oblaka, a bijela visoku vjerojatnost oblaka

Analizirane su snimke u periodu od 2017. do 2023. godine, s obzirom da podaci nisu dostupni prije 2017. Obradeno je 482 snimki u projekciji UTM 33N (EPSG:32633) s rezolucijom 10 metara po pikselu. S obzirom da je drugi satelit Sentinel-2B pokrenut u ožujku 2017. godine, podatci prije svibnja 2017. su dostupni svakih 10 dana jer su snimani sa samo jednim satelitom.

Promatrano je područje oko riječkog podmorskog ispusta prethodno analizirano u poglavlju 4. U oba slučaja slike su preuzete pomoću KML datoteke u kojoj su zadane koordinate kuteva. Područje obuhvaća zonu udaljenu 700 metara oko ispusta osim s obalne strane gdje je 500 metara, odnosno do ruba obale i prikazano je na slici 5.5 crnom isprekidanom linijom. Ljubičastim krugom označena je krajnja točka ispusta, a narančastom podmorska dionica ispusta.

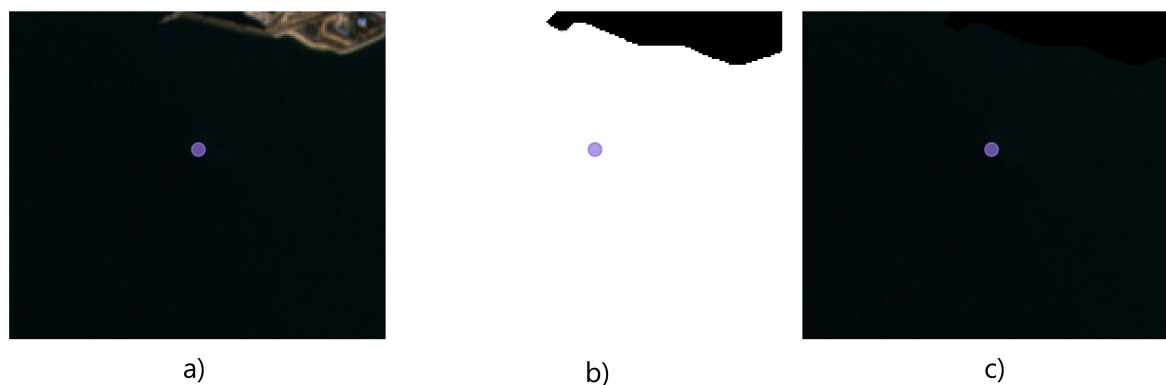




Slika 5.5: Analizirano područje uz lokaciju ispusta

## 5.5 Analiza satelitskih snimki

Za analizu satelitskih snimki mogu se koristiti različiti programi kao što su: ArcGIS, ERDAS, ENVI, QGIS, SNAP, Google Earth Engine, međutim u ovom istraživanju će se koristiti Python programski jezik. Podatci su učitani pomoću *imread* iz *imageio* modula. Za detaljniju analizu, na snimkama je provedeno maskiranje kako bi se uklonio dio snimke koji prikazuje obalu i priobalno područje te kako vrijednosti piksela obalnog područja ne bi utjecale na daljnju analizu. Navedeno omogućava povećavanje kontrasta piksela u blizini ispusta kako bi se mogle detektirati promjene koje nisu direktno vidljive iz snimke. Postupak je proveden korištenjem naredbi iz *opencv* modula, pri čemu je s naredbom *inRange* određen prag piksela koji se maskiraju, a s naredbom *bitwise\_and* stvorena slika s maskiranom obalom. Postupak maskiranja Sentinel-2 snimke prikazan je na slici 5.6, pri čemu je s ljubičastim krugom označena lokacija ispusta. Osim navedenoga, maskirana su područja slika u kojima se nalaze brodovi koji su posebice česti u navedenoj zoni s obzirom da se nalazi u neposrednoj blizini luke Rijeka.



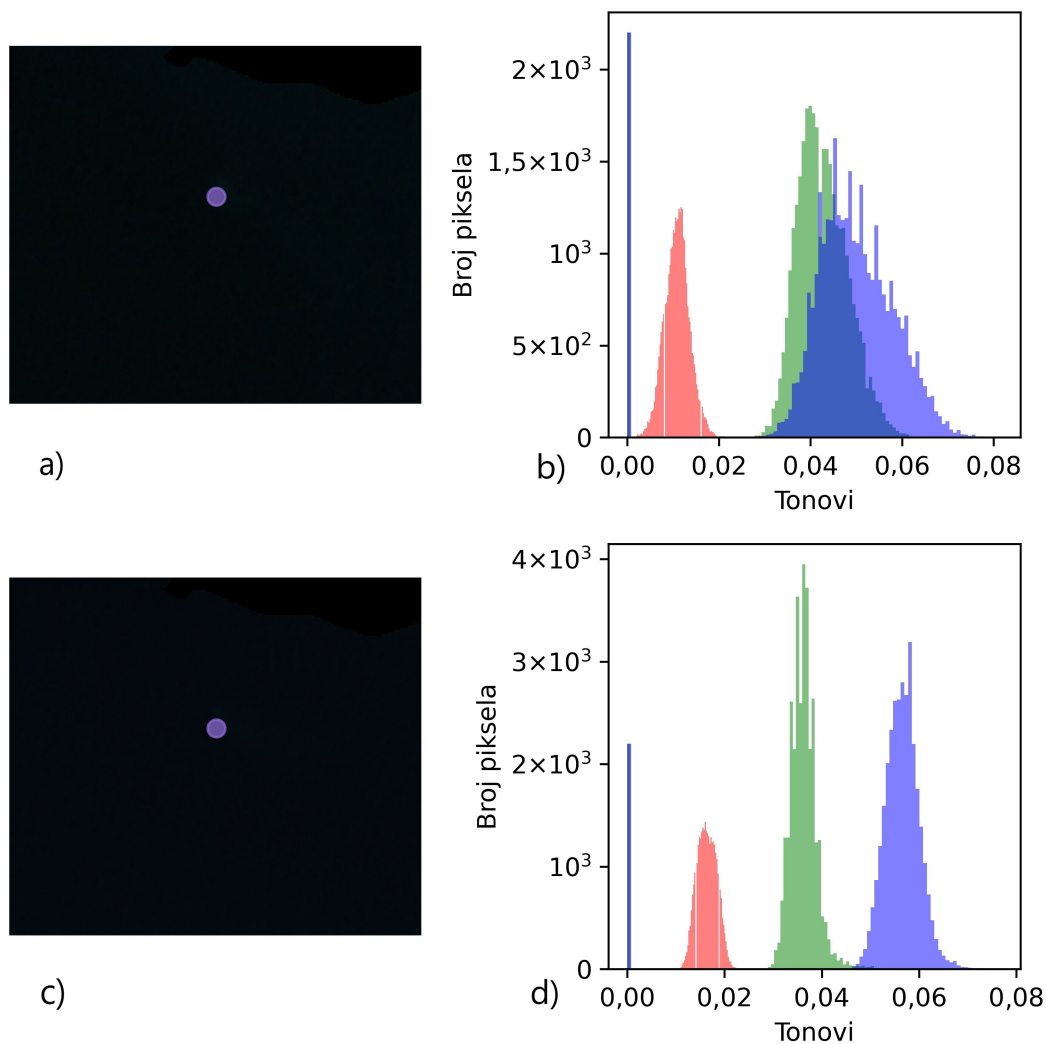
Slika 5.6: Prikaz a) početne slike, b) maske i c) rezultata maskiranja za 1. 1. 2017.

Iz navedene snimke se može uočiti slaba mogućnost raspoznavanja promjena na morskoj površini s obzirom da većina piksela ima niske vrijednosti, odnosno tamne nijanse u uskom spektru. Kako bi se povećala vidljivost anomalija na površini u blizini ispusta, može se koristiti više različitih tehnika kao što su postavljanje praga (engl. *thresholding*), modeliranje na temelju histograma, geometrijske operacije, promjena kontrasta, izjednačavanje histograma, itd. koji su isprobani u sklopu ovog istraživanja. Međutim, kod većine metoda se povećava vidljivost u cijelom spektru boja, što u konačnici ne rezultira boljim uočavanjem promjena na površini mora. Također, dio metoda se bazira na određivanju fiksnih vrijednosti intenziteta boje za granice što u ovom slučaju nije moguće jer satelitske snimke podmorskih ispusta mogu značajno varirati ovisno o uvjetima. U nastavku su opisani rezultati za koje je dobivena najbolja vidljivost i detekcija promjena na površini zbog efluenta.

Većina navedenih metoda bazira se na analizi i izmjeni vrijednosti piksela na temelju histograma. Histogrami su grafovi koji pokazuju odnos između vrijednosti boje i broja ponavljanja piksela s takvom vrijednosti, najčešće stupčastog oblika. Usporedbom visine stupaca, može se prepoznati koje su vrijednosti boja istaknutije ili se češće pojavljuju na slici. Histogram pruža uvid u distribuciju intenziteta piksela na slici, a njihovim razumijevanjem može se dobiti informacije o kontrastu slike, svjetlini i ukupnoj distribuciji tonova, što se može koristiti za poboljšanja slike, segmentacije slike i izdvajanja značajki. U ovom istraživanju histogrami su izrađeni pomoću naredbe *hist* iz *matplotlib* modula.

Na slici 5.7 prikazane su slike i pripadajući histogrami za Sentinel-2 snimke. Pri tome je svaka od nijansi prikazana posebno s linijom u istoj boji. Vodoravna os grafikona predstavlja tonske varijacije, dok okomita os predstavlja ukupan broj piksela u tom određenom tonu boje. Ukoliko svi tonovi imaju vrijednost 0, na slici je to crna boja. U ovom slučaju je to maska, stoga

je povećani broj piksela u tom području. Desnije područje histograma predstavlja svjetlije dijelove slike, dok vrijednost 1 za sva tri tona predstavlja bijelu boju. Može se uočiti da slike imaju veoma niske tonove boja, čiji se intenzitet i raspodjela razlikuje ovisno o promatranom vremenskom trenutku. Sa slika je vidljivo da je dominantna boja na slikama, kao što je očekivano, plava s obzirom da pokazuje more, dok je crvena boja najmanje dominantna u oba slučaja.

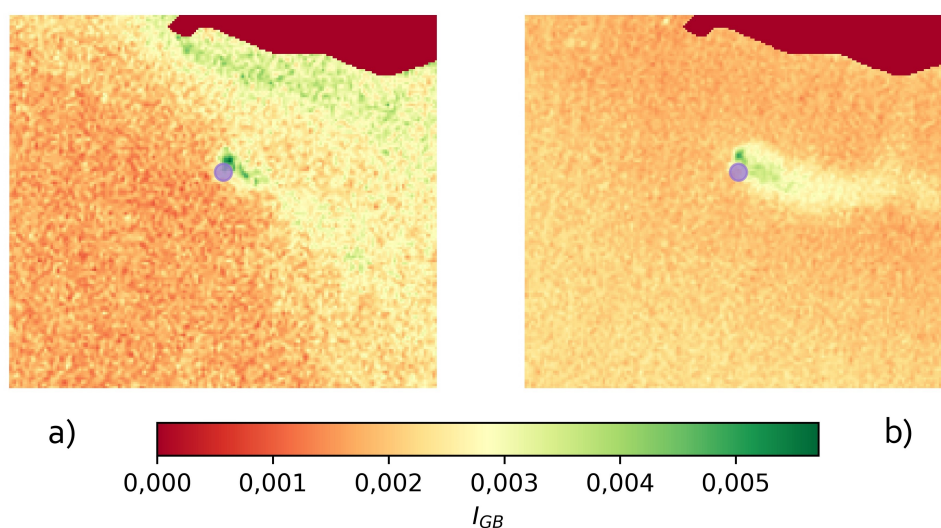


Slika 5.7: Prikaz Sentinel-2 a) RGB slike, b) histograma za 1. 1. 2017. te c) RGB slike, d) histograma za 15. 4. 2022.

Veliki utjecaj na vidljivost efluenta iz podmorskih ispusta imaju plava i zelena nijansa. Zelena nijansa direktno je povezana sa suspendiranim česticama i količinom klorofila koja se povećava u zoni blizu ispusta zbog velike količine organskih i hranjivih tvari, dok se količina obojene otopljene organske tvari može povezati s plavom bojom. Osim toga, dugovalno zračenje vidljivog spektra, odnosno crvena boja prodire do mnogo manje dubine u odnosu na plavu i zelenu boju [23]. Zbog toga se u ovom istraživanju koristio indeks iz prethodnih istraživanja [24, 23] koji

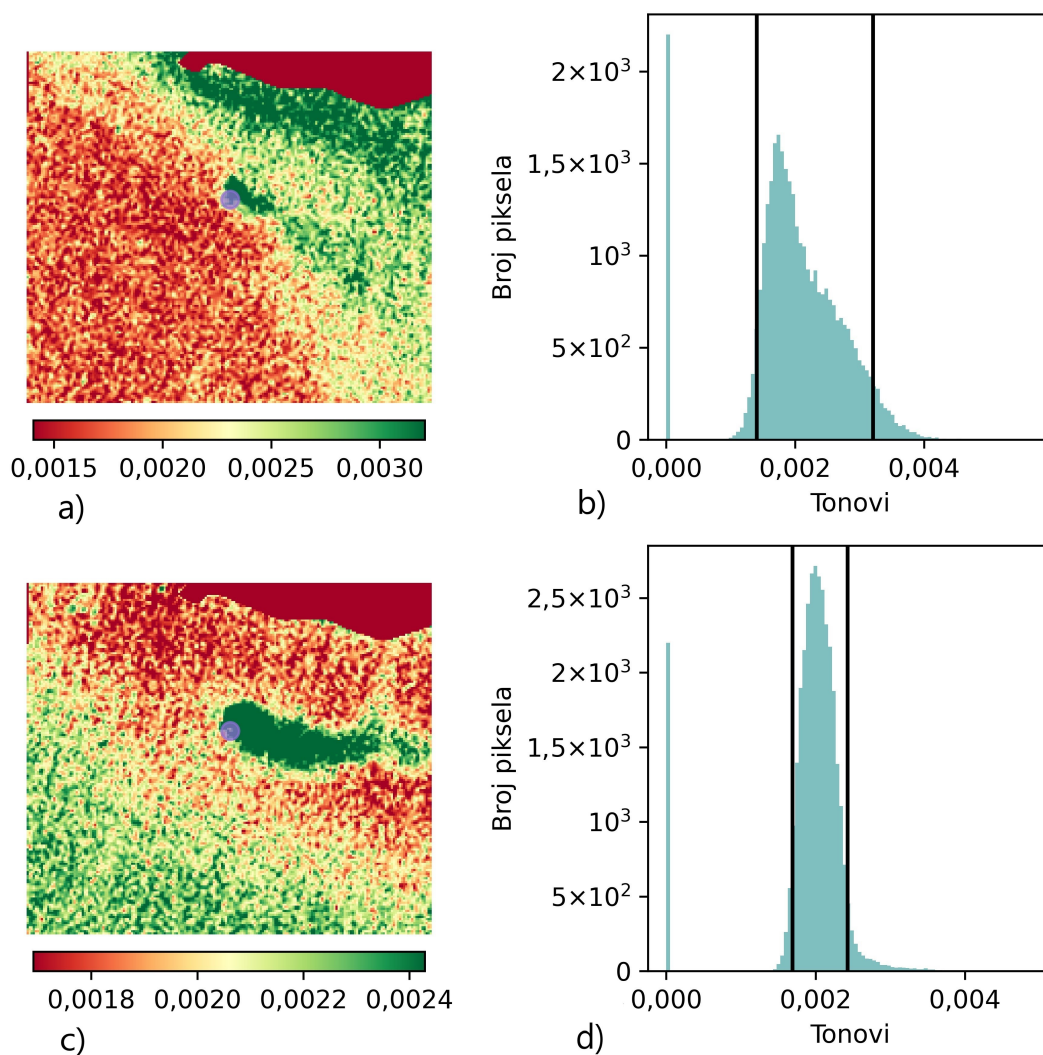
predstavlja umnožak plave i zelene nijanse:  $I_{GB} = G \cdot B$ . Navedena tehnika ima bolju sposobnost povećanja vidljivosti u zoni blizu ispusta u odnosu na RGB ili sive tonove snimki.

Na slici 5.8 prikazane su vrijednosti indeksa za prethodno prikazane slike 5.7. Može se uočiti značajnije bolja vidljivost ispusta na slici 5.8 te veći raspon piksela. Skala na ovoj snimci je prikazana s rasponom vrijednosti od minimalne do maksimalne vrijednosti na slici, što je također utjecalo na povećanje vidljivosti na morskoj površini s obzirom da je prethodna slika pokazivala vrijednosti u rasponu od 0 do 1, dok su maksimalne vrijednosti iznosile oko 0,08.



Slika 5.8: Prikaz slike s  $I_{GB}$  indeksom za a) 1.1.2017. i b) 15.4.2022.

Kako bi se dodatno povećala vidljivost, na rezultate indeksa  $I_{GB}$  se primijenila metoda izmjenjene kontrasta slika (engl. *image stretching*). Metoda je napravljena tako da su se pomoću naredbe *percentile* iz *numpy* modula odredile granice od 10% i 95% piksela. Donja granica je uzeta kao manja jer se ispusti u većini slučajeva prikazuju većim intenzitetom  $I_{GB}$ . Potom je korištenjem naredbe *clip* iz *numpy* modula smanjen raspon slike na zadane vrijednosti postotka. Na slici 5.9 prikazane su nove vrijednosti slika s lijeve strane, dok je s desne strane prikazan histogram snimaka sa slike 5.8, a crne vertikalne linije predstavljaju minimalne i maksimalne granice  $I_{GB}$  indeksa. Može se uočiti da je na promatranim slikama vidljiva optička anomalija perjanice na površini koja se manifestira višim vrijednostima indeksa  $I_{GB}$ .

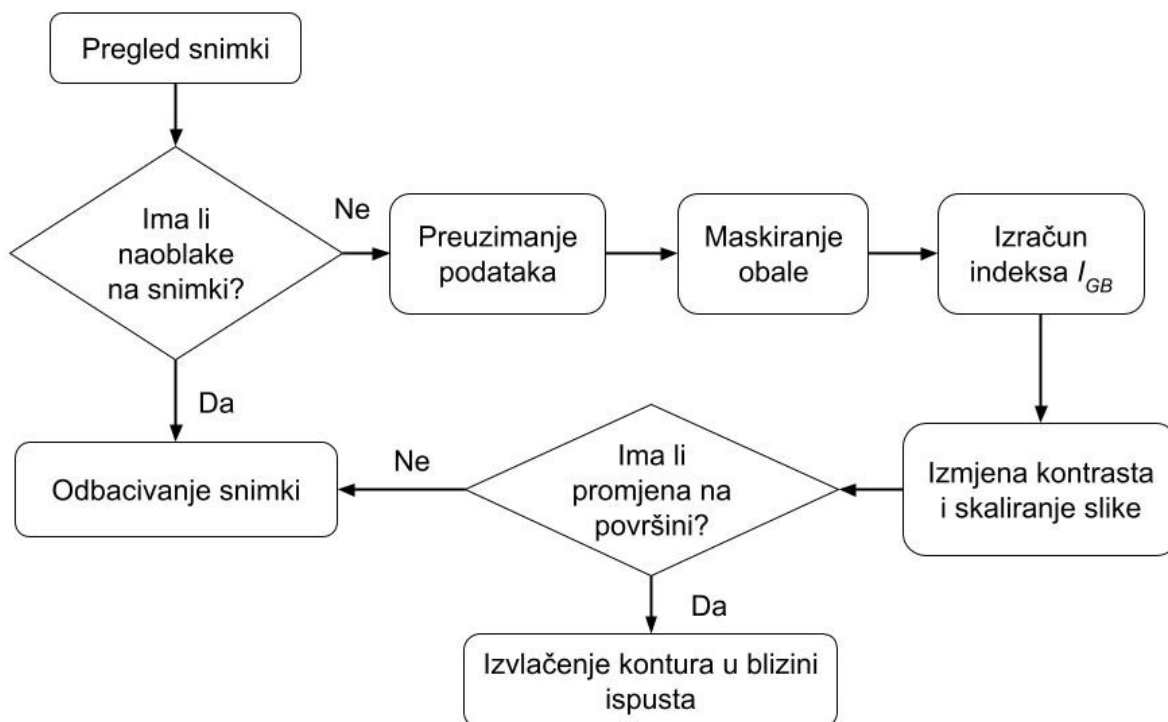


Slika 5.9: Prikaz skaliranih slika s  $I_{GB}$  indeksom za a) 1. 1. 2017., b) histogram te za c) 15. 4. 2022. i d) histogram

Kako bi se dalje analizirale snimke s vidljivim ispustom, skalirane slike s  $I_{GB}$  indeksom su preračunate u vrijednosti sa skalom od 0 do 255, odnosno napravljena je njihova normalizacija. Potom su s naredbom *findContours* iz *opencv* modula pronađene konture ispusta s maksimalnim intenzitetom sa slike, odnosno vrijednosti 255, koje su spremljene u txt datoteke za daljnju analizu.

Na slici 5.10 prikazan je dijagram toka za analizu rada podmorskih ispusta na temelju satelitskih snimki. Prvi korak je vizualna analiza snimki, provjera postotka naoblake i pregled rezultata klasifikacije scene na temelju čega se donosi odluka o naoblaci. Zatim slijedi preuzimanje podataka u tiff formatu i maskiranje obale kako ne bi utjecala na vrijednosti snimke. Potom se računa indeks te radi izmjena kontrasta i skaliranja slike prema prethodno opisanom postupku, na temelju čega se dobiva snimka s puno boljom mogućnosti uočavanja. Na temelju

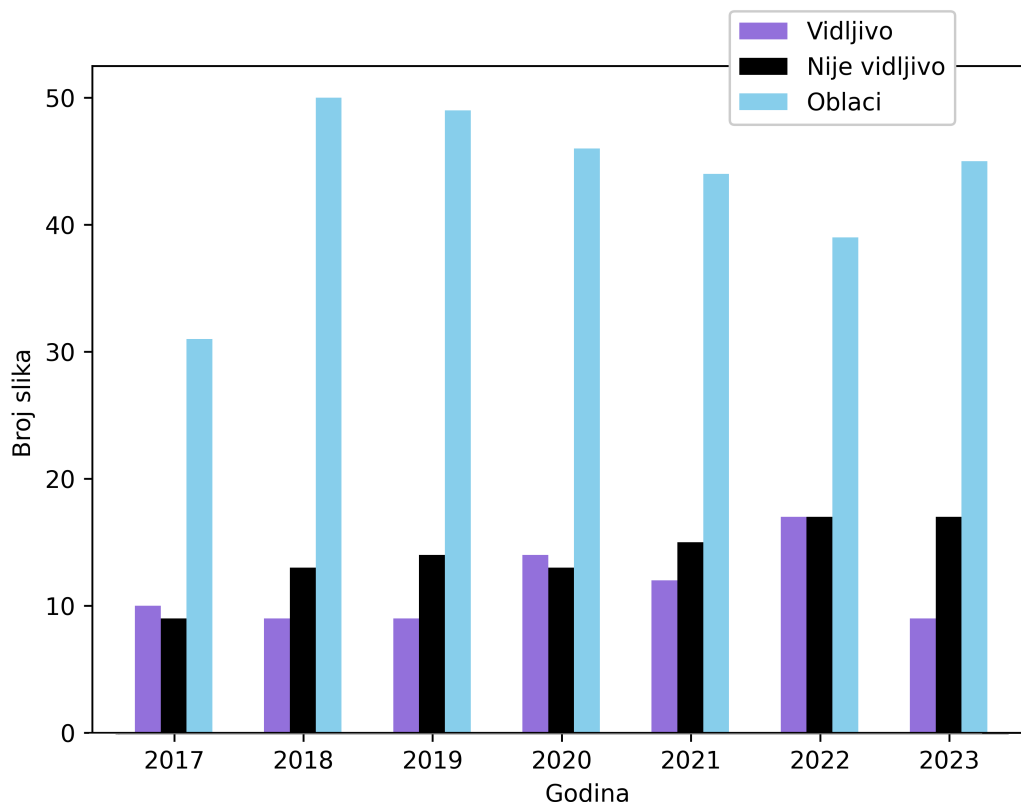
takve snimke se donosi odluka o vidljivim promjenama iznad ispusta koji se očituju kao veća zona s visokim vrijednostima  $I_{GB}$  te se ovisno o tome izvlače konture.



Slika 5.10: Dijagram toka za analizu podmorskih ispusta temeljem satelitskih snimki

## 5.6 Rezultati analize

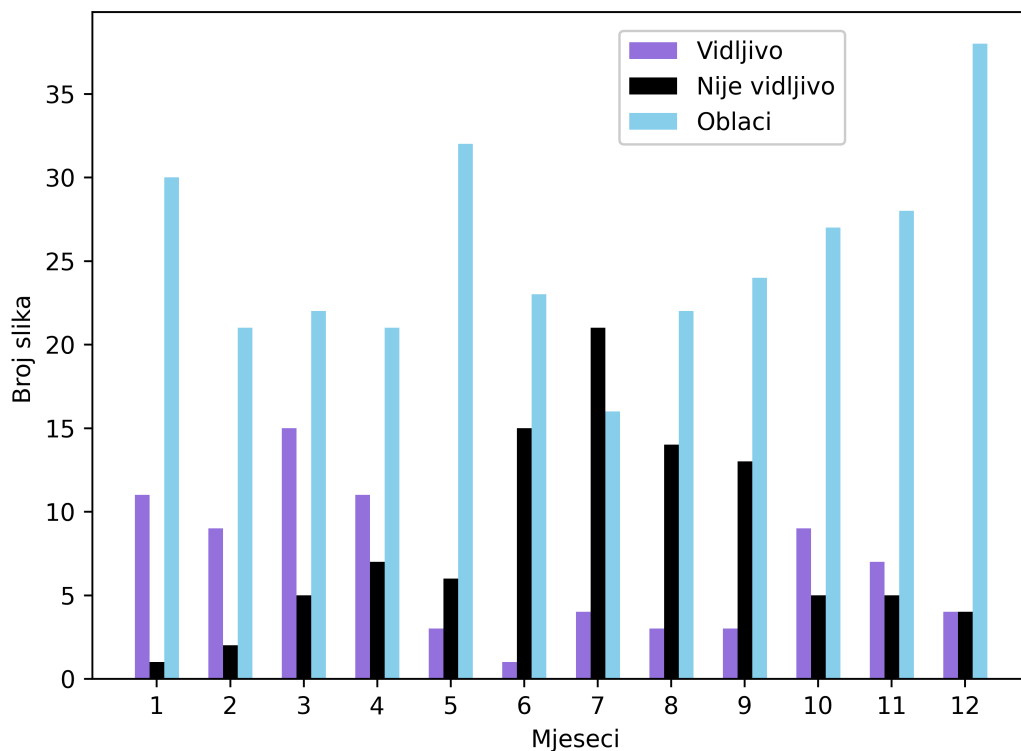
U nastavku su prikazani rezultati analize podmorskih ispusta. Na slici 5.11 prikazane su informacije o vidljivosti perjanice na slikama. Može se uočiti da je čak 63% slika pod oblacima, stoga se one ne mogu detaljnije razmatrati. U prethodnom istraživanju autora Faria i sur. [36] napravljenoj u laguni Ria de Aveiro u Portugalu, postotak slika s oblacima je 50%, stoga se može zaključiti da količina oblaka ovisi o vremenskim uvjetima na promatranoj lokaciji. Također, može se uočiti da količina slika s oblacima varira između pojedinih godina.



Slika 5.11: Prikaz vidljivosti perjanice na snimkama po godinama

Analiza je napravljena na ostalim slikama bez oblaka. Među njima se u 45% slučajeva mogu uočiti optičke anomalije u blizini ispusta koje se mogu povezati s radom podmorskog ispusta. Kako bi se sa sigurnošću moglo potvrditi za sve navedene snimke predstavlja li prikazano onečišćenje perjanicu efluenta, potrebna su terenska ispitivanja koja nisu napravljena u sklopu ovog istraživanja.

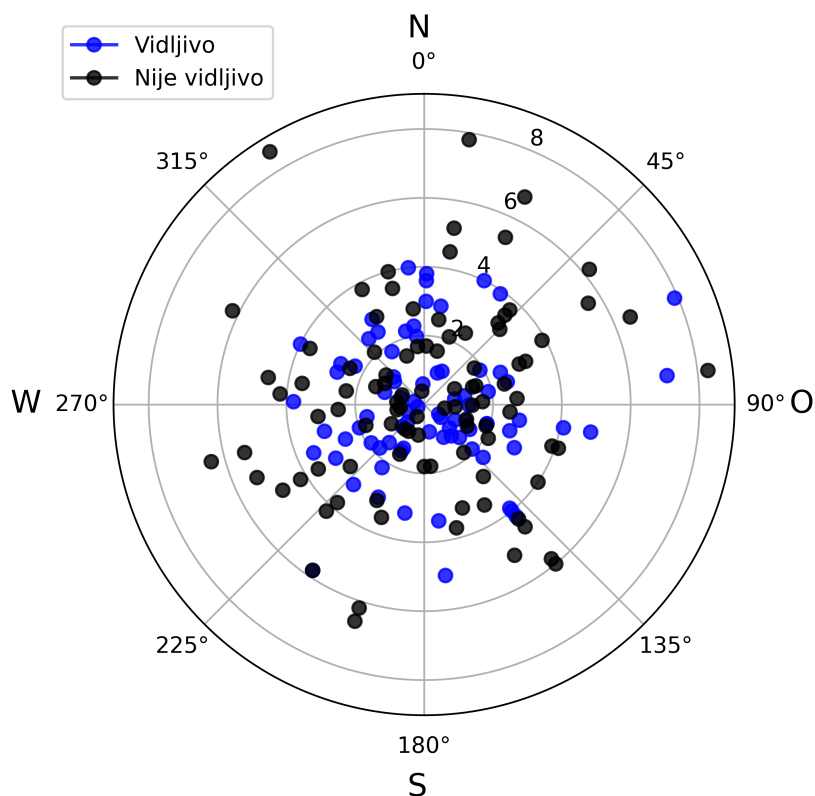
Slika 5.12 prikazuje vidljivost promjena na površini iznad ispusta po mjesecima. Može se uočiti da je tijekom zimskih mjeseci i proljeća veća šansa za uočavanje optičke anomalije perjanice. To se podudara sa spoznajom o pojavi piknokline stoga se pri ljetnim mjesecima efluent često zadržava na većim dubinama te je rjeđe vidljiv. Iz grafa se može zaključiti da je najbolje vrijeme za provedbu terenskih ispitivanja ožujak, ovisno o vremenskim uvjetima. Navedeno je posebice bitno, s obzirom da su takva ispitivanja zahtjevna za provedbu. Također je potrebno voditi računa o tome da se mjerenja provedu nakon mjerenja satelita, kako plovilo s kojeg se vrše mjerenja i valovi koji se pritom stvaraju ne bi utjecali na rezultate.



Slika 5.12: Prikaz vidljivosti perjanice na snimkama po mjesecima

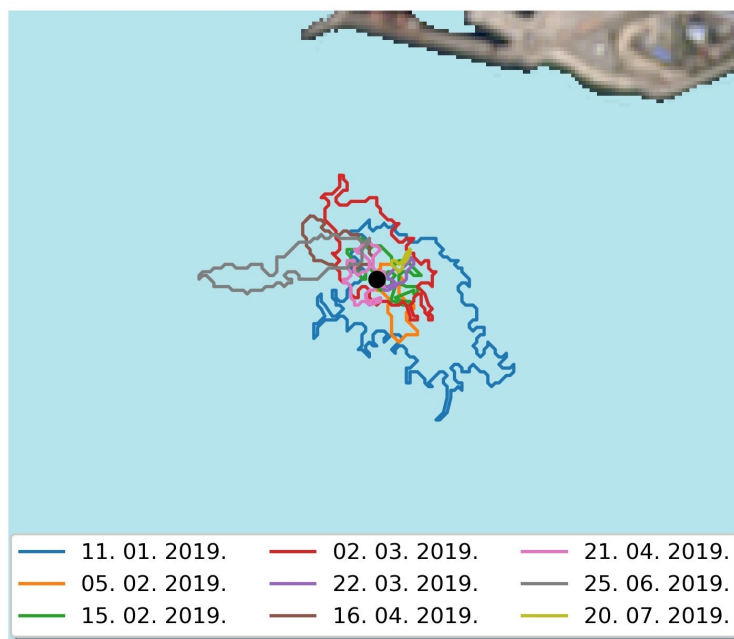
Prilikom analize slika bez oblaka, uočena je pojava značajnih valova, koji rezultiraju da se optička anomalija perjanice ne vidi. Zbog toga je na slici 5.13 prikazan smjer i intenzitet vjetra za slike na kojim se vidi i ne vidi perjanica. Može se uočiti da, ovisno o smjeru vjetra, može biti manja ili veća šansa za vidljivost perjanice s obzirom da ovisi i o drugim faktorima. Generalno se može zaključiti da će za vjetar jačine veće od 5 m/s postojati smanjena šansa za vidljivost perjanice.



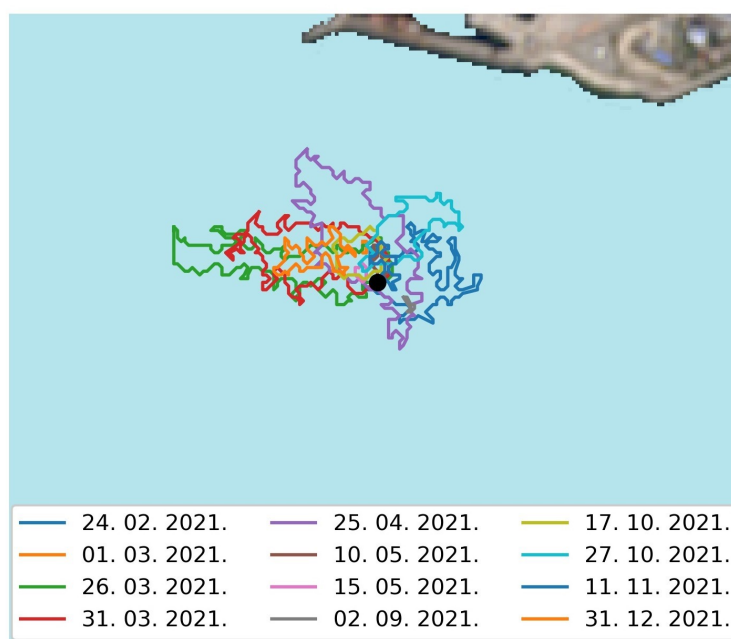


Slika 5.13: Povezanost vidljivosti perjanice s jačinom i smjerom vjetra

Na slikama 5.14 prikazane su konture optičke anomalije perjanice za pojedine datume u 2019. i 2021. godini. Crna točka prikazuje lokaciju ispusta. Može se uočiti da će područje, površina i dominantan smjer ovisiti o pojedinom datumu, odnosno vremenskim uvjetima.



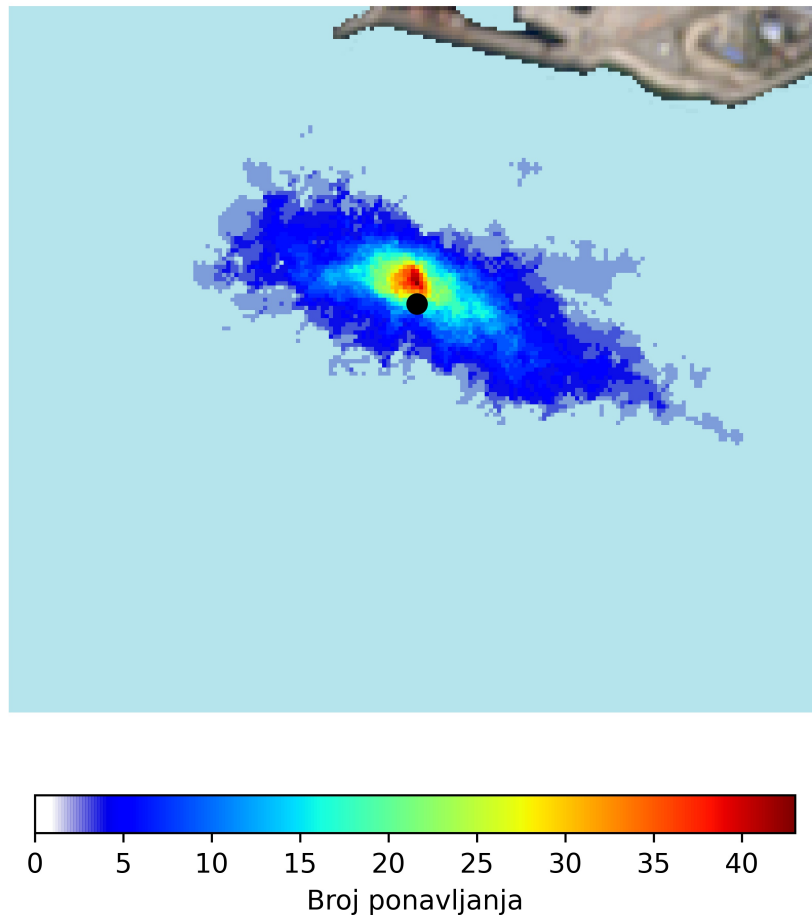
a)



b)

Slika 5.14: Konture perjanice na a) 2019. i b) 2021. godinu

Kako bi se analizirao rad i ponašanje podmorskog ispusta sa svih dostupnih snimki, izračunata je učestalost pojavljivanja optičkih anomalija perjanice. Navedeno je analizirano pomoću naredbe *contains* iz *shapely* modula, tako da se prebrojilo u koliko je slučajeva svaki od piksela slike unutar konture. Rezultati navedene analize prikazani su na slici 5.15. Može se uočiti dominantno uzdužan oblik perjanice, koji se proteže usporedno s obalom.

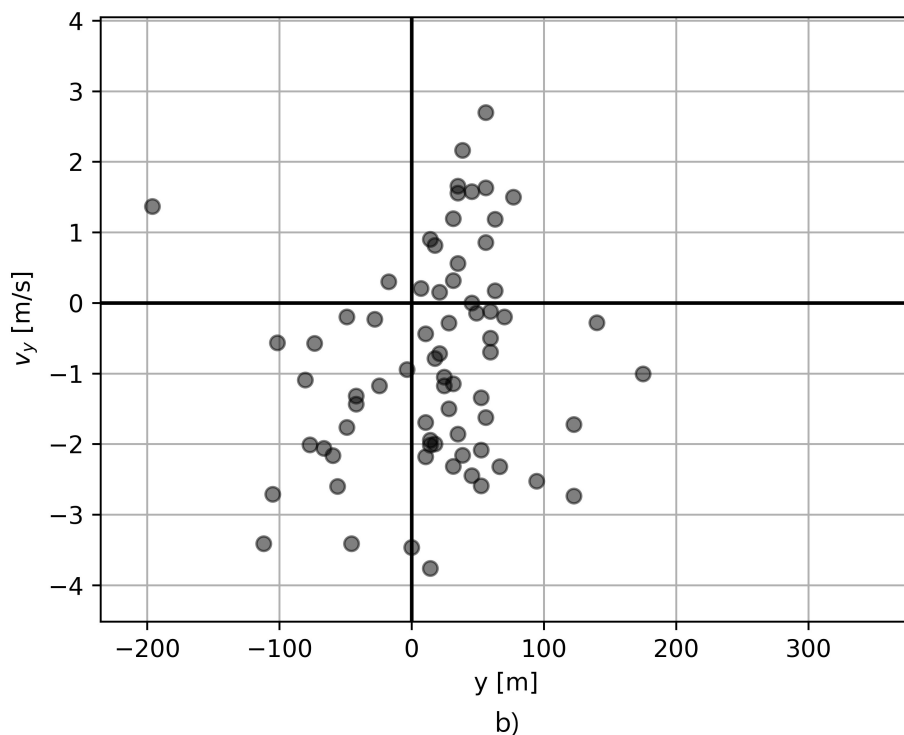
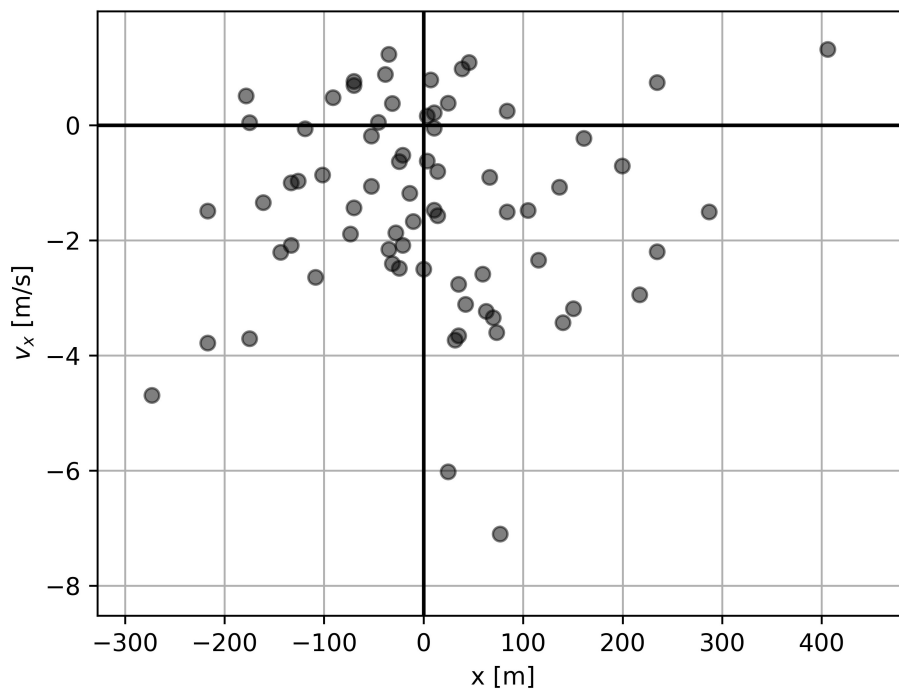


Slika 5.15: Učestalost pojavljivanja lokacije unutar konture perjanice

Za detaljniju analizu, promatrane su središnje koordinate konture izračunate kao  $x_k = (x_{min} + x_{maks})/2$  i  $y_k = (y_{min} + y_{maks})/2$  te površina perjanice  $A$  dobivena iz satelitskih snimki. Središte koordinatnog sustava postavljeno je u krajnju točku ispusta, x os je usmjerena prema istoku, a y prema sjeveru. S obzirom na mali broj satelitskih snimki na kojima se može uočiti promjene iznad ispusta nije izrađen model strojnog učenja. Podatci o meteorološkim uvjetima preuzeti su iz Solcast baze podataka [5] uključujući: temperaturu zraka, globalno horizontalno zračenje (GHI), vlažnost zraka, kumulativnu kišu u periodu od 10 dana, te preračunate smjerove vjetra s obzirom na jačinu i kut u x i y smjeru ( $v_x$  i  $v_y$ ). Podatci o visini vodostaja Rječine preuzeti su od Državnog hidrometeorološkog zavoda, odnosno Sektora za hidrologiju [1] na lokaciji Martinovo selo, a visina mora koja se mijenja zbog plime i oseke s Instituta za oceanografiju i ribarstvo [2]. Protok ispusta je definiran kao srednji mjesečni protok [3]. Podatci su zbog dostupnosti analizirani za period od 2017. do 2022. godine.

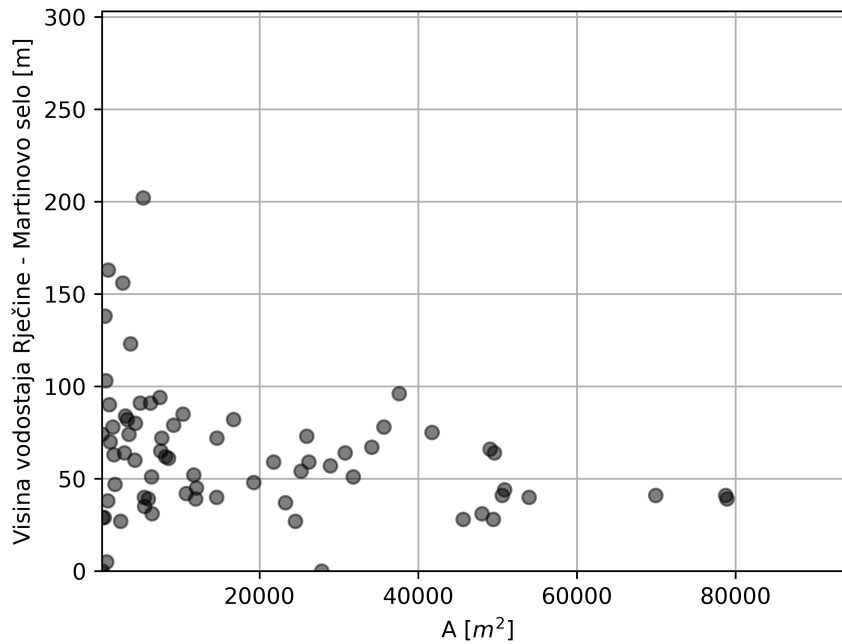
Na slici 5.16 prikazana je ovisnost vjetra u x i y smjeru. Može se uočiti da podatci nisu

međusobno linearno povezani te da smjer vjetra ne utječe na lokaciju pojave onečišćenja. Zbog blizine obale, površinski sloj mora je pod dominantnim utjecajem vjetra, međutim niži slojevi imaju drugačiji smjer stoga se može zaključiti da smjer vjetra nije dominantan faktor kod modeliranja ponašanja uzgonskih mlazova u bliskoj zoni i zoni tranzicije.



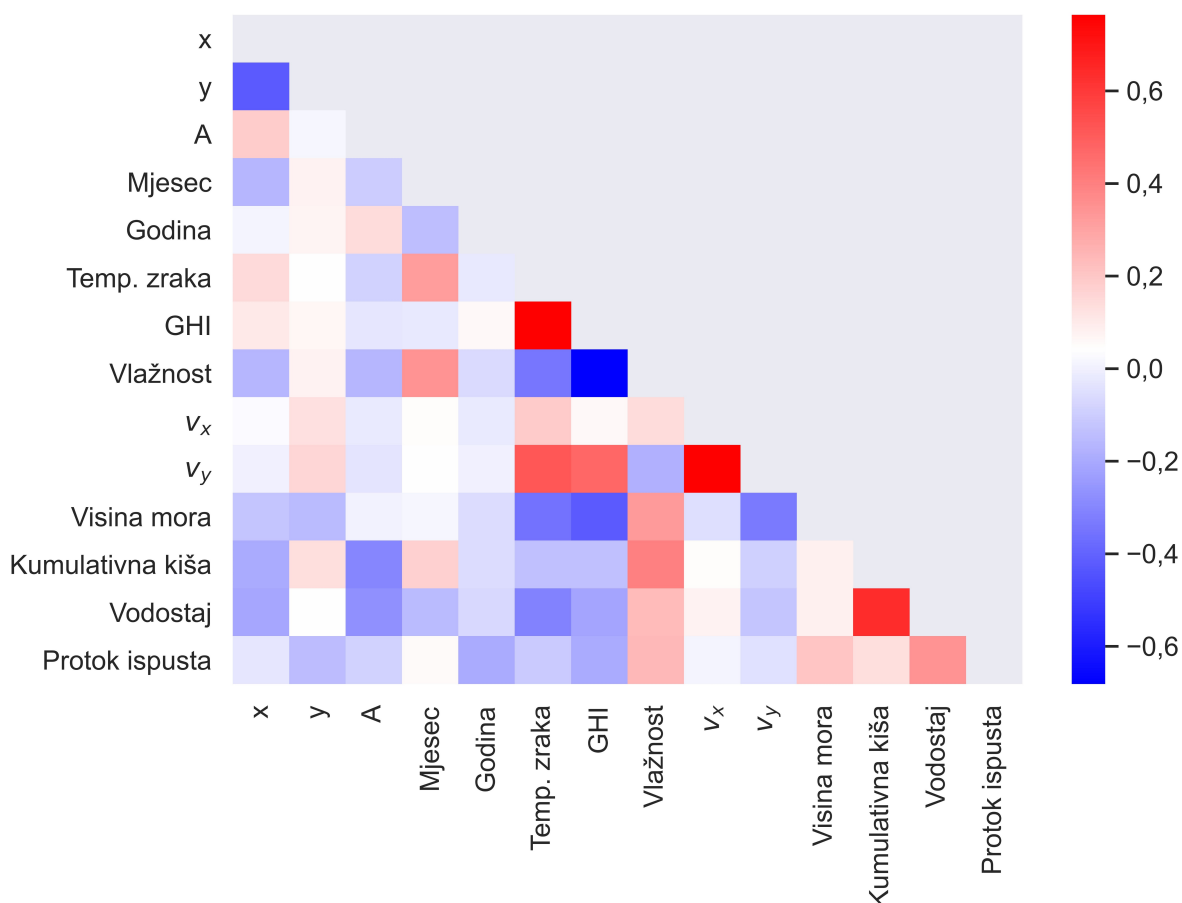
Slika 5.16: Ovisnost lokacije središta konture u odnosu na smjer vjetra po a) x i b) y osi

Na slici 5.17 prikazan je odnos površine optičke anomalije perjanice i vodostaja rijeke Rječine koja se nalazi u blizini ispusta. Može se uočiti da se povećanjem vodostaja površina smanjuje. Takav odnos je uočen i za ostale vodostaje na Rječini, kao i za podatke o kumulativnim oborinama. Navedeno uzrokuje veće brzine mora zbog vode koja se ulijeva u more čime se pospešuju miješanje te razrjeđuju efluent.



Slika 5.17: Ovisnost vidljive površine perjanice o vodostaju

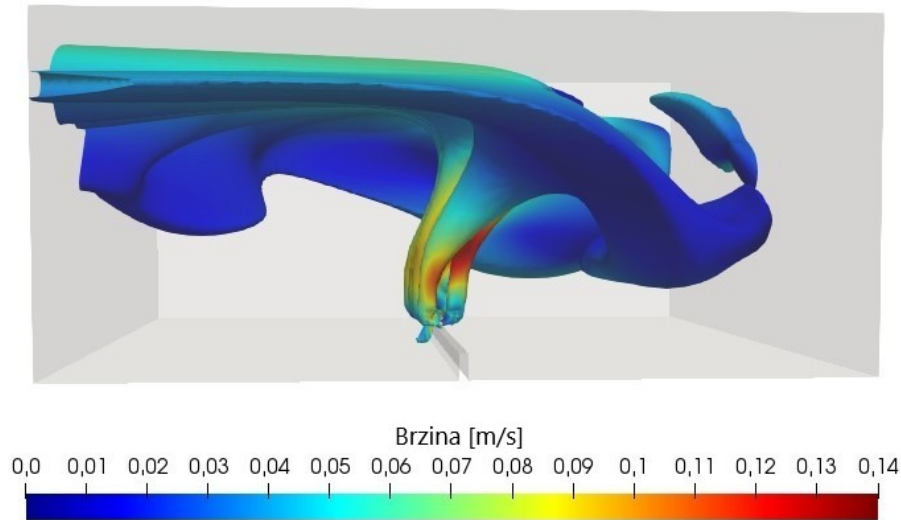
Na slici 5.18 prikazana je korelacijska toplinska karta između parametara kontura perjanice i podatka o uvjetima strujanja. Može se primjetiti da niti jedan od prikazanih uvjeta strujanja nije linearno značajno povezan s središnjim koordinatama kontura i površinom, te da navedeni problem ovisi o još parametara. Također se može uočiti značajna pozitivna korelacija između visine vodostaja Rječine i kumulativnih padalina, te temperature zraka i globalnoga horizontalnog zračenja, kao što je i očekivano.



Slika 5.18: Korelacijska toplinska karta za parametre konture perjanice i podataka o uvjetima strujanja

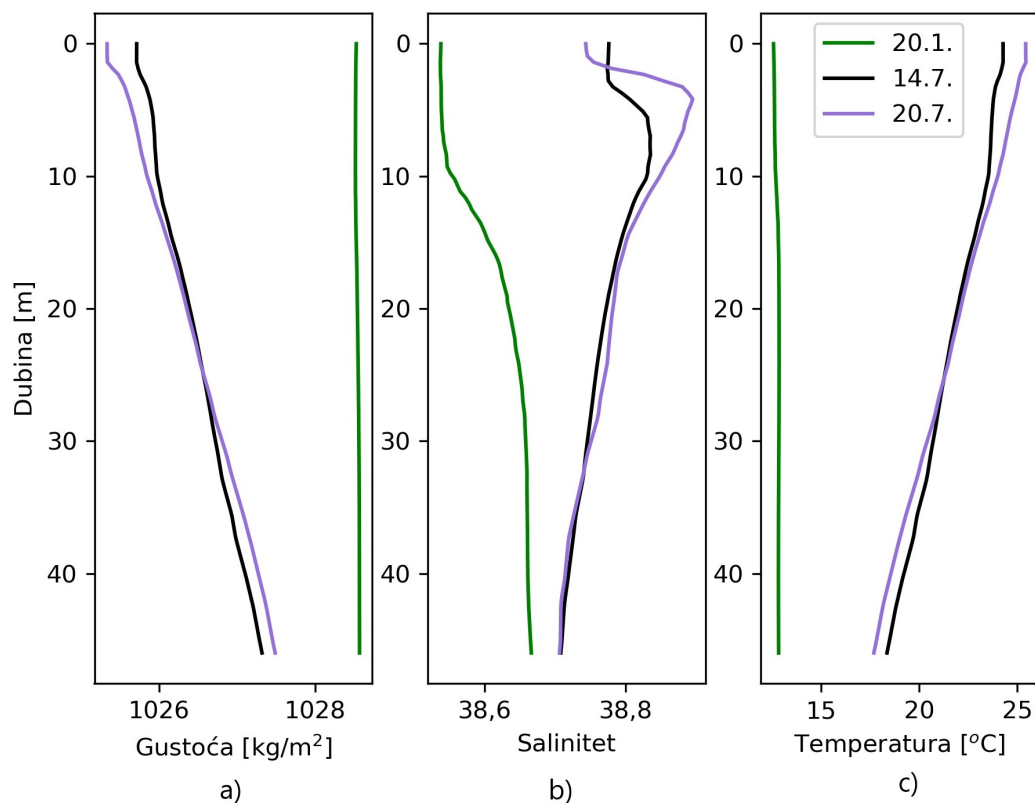
## 5.7 Usporedba rezultata ugniježđenog OpenFOAM-ROMS modela s rezultatima satelitskih snimki

Rezultati satelitskih snimki mogu se koristiti za validaciju numeričkih modela za realne uvjete strujanja. U te svrhe, uspoređene su vrijednosti OpenFOAM-ROMS modela s satelitskim snimkama za 20. srpnja 2019. u 12 sati. Postavke numeričke simulacije jednake su kao u poglavlju 4 pri čemu je korištena srednja veličina mreže. Na slici 5.19 prikazane su izopovršine koncentracije skalara od 0,5 % s konturama magnitude brzine kao što je bilo prikazano na slici 4.9. Može se uočiti da efluent s takvom koncentracijom dolazi veoma blizu površine (do 0,6 m) u odnosu na prethodno analizirani ljetni period.



Slika 5.19: Izopovršine za koncentraciju pasivnog skalara 0,5% obojane prema magnitudi brzina za 20. srpnja 2019.

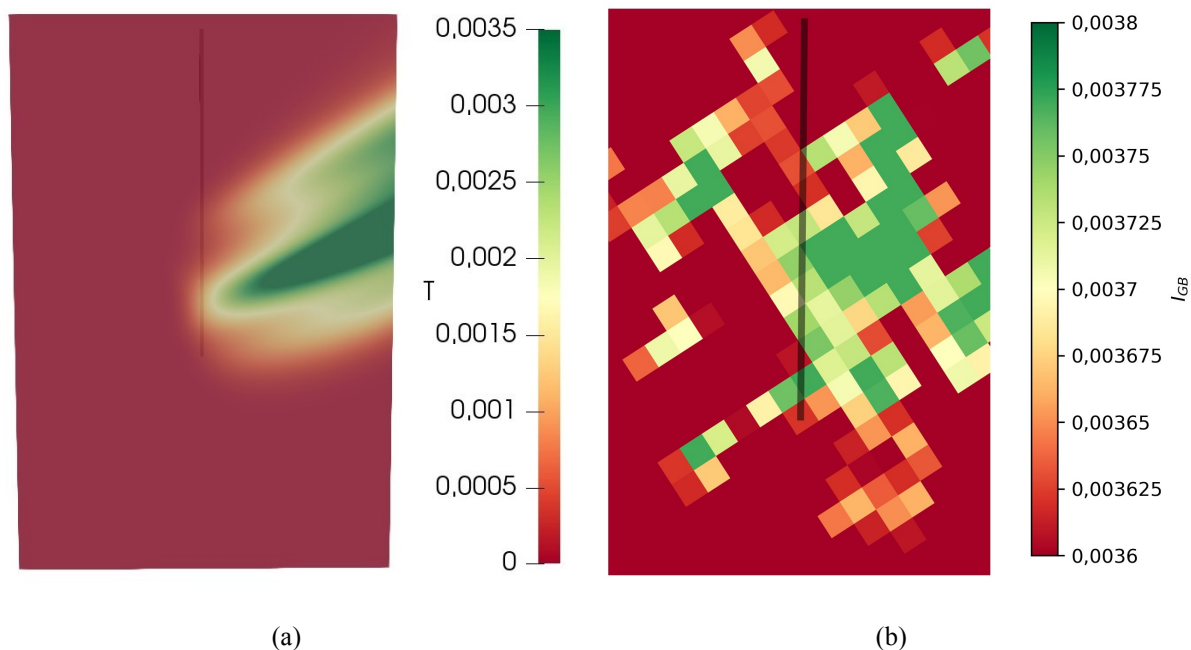
Na slici 5.20 prikazane su promjene temperature, gustoće i saliniteta po slojevima na lokaciji ispusta iz ROMS podataka za sva tri datuma iz ROMS modela koja su analizirana ovdje i u poglavlju 4. Može se uočiti da će za 20. siječnja gustoća biti jednoliko raspoređena po dubini, dok za ljetne mjesece postoji piknoklina zbog promjene u temperaturi i salinitetu. Međutim, za 20. srpnja morske brzine su veoma niske i s maksimalnom vrijednosti 0,06 m/s, dok su za 14. srpnja nešto veće i maksimalna vrijednosti im iznosi 0,19 m/s. To dovodi do značajnije boljeg miješanja i zadržavanja efluenta na nižim slojevima. Stoga se može uočiti da osim pojave piknokline, na ponašanje efluenta i zadržavanje na nižim slojevima mogu utjecati i veće brzine mora.



Slika 5.20: Promjena a) gustoće b) saliniteta i c) temperature po dubini

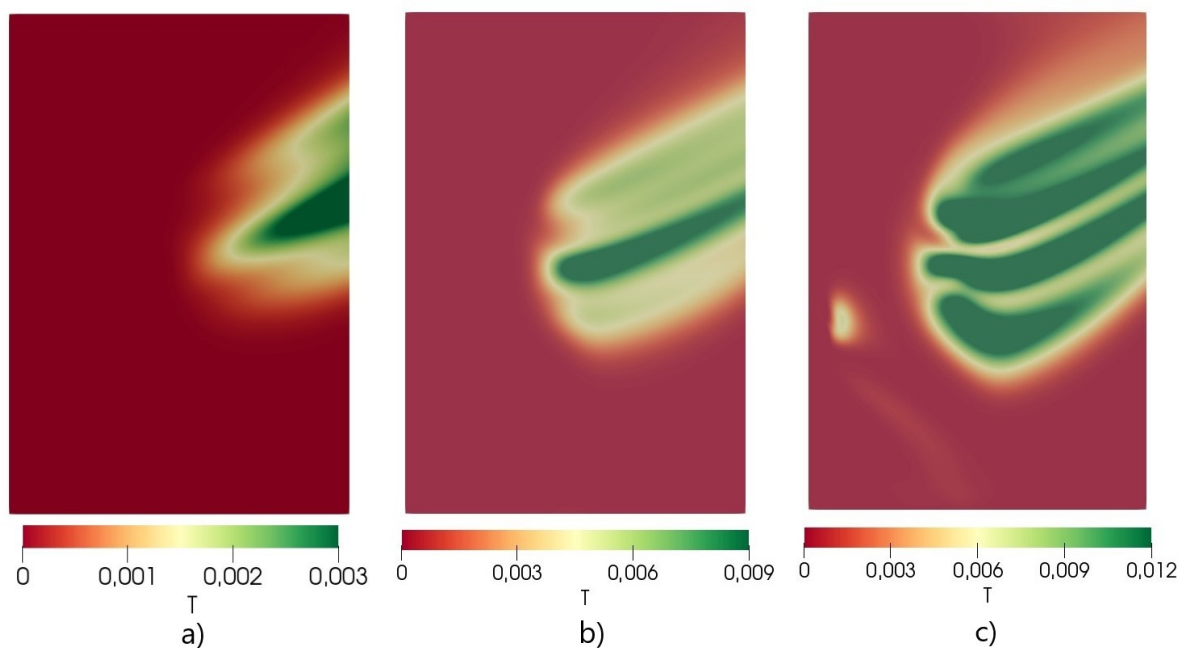
Na slici 5.21 prikazana je usporedba rezultata simulacije i satelita. Rezultati su uspoređeni za vrijednost koncentracije  $T$  i normaliziranog indeksa  $I_{BG}$ . Može se uočiti da se maksimalna koncentracija nalazi na jednakom mjestu u oba slučaja, međutim oblik nije u potpunosti jednak na što mogu utjecati prijašnje stanje onečišćene vode, dubina mora do kuda prodire svjetlost i slično.





Slika 5.21: Usporedba (a) OpenFOAM-ROMS ugnježdavanja na dubini od 1 metar i (b) satelitskih snimki

Na slici 5.22 prikazane su vrijednosti koncentracije numeričke simulacije za različite dubine. S obzirom da nije moguće znati do koje dubine prodire svjetlost bez terenskih mjerenja, ne može se jednoznačno usporediti rezultati snimke s rezultatima simulacije. Iz slike se može uočiti da se povećanjem dubine koncentracija značajno povećava, kao i područje onečišćenja.



Slika 5.22: Vrijednosti koncentracije iz numeričke simulacije za dubinu od a) 0 m (površina mora), b) 2,5 m i c) 5 m

## 6 ZAKLJUČAK

U sklopu doktorskog rada razvijena i primijenjena su četiri nova pristupa za analizu i predviđanje ponašanja podmorskih ispusta. Prva pristup je usmjeren na smanjivanje vremena računanja numeričkih simulacija pomoću redukcije broja diferencijalnih jednadžbi. Metoda se bazira na izračunu gustoće kao funkcije temperature i saliniteta, pri čemu nije potrebno rješavati posebno diferencijalnu jednadžbu za temperaturu i posebno za salinitet čime se reducira broj jednadžbi. Ovaj pristup implementiran je korištenjem *twoLiquidMixingFoam* rješavača u OpenFOAM programu pomoću volumnih udjela. Drugi pristup je stvaranje modela za miješanja efluenta i recipijenta na temelju strojnog učenja te analiza dominantnih utjecajnih parametara na temelju SHAP metode. Treći pristup se odnosi na razvijanje tehnike za jednosmjerno povezivanje OpenFOAM modela s ROMS modelom uz primjenu na geometriju stvarnog slučaja podmorskog ispusta. Četvrti pristup je primjena satelitskih snimki za analizu rada podmorskih ispusta. Razvijanje i primjena navedenih pristupa dovelo je do sljedećih zaključaka:

- Opisan je pristup redukcije broja varijabli koja je implementirana u numeričke modele uspoređene s prethodnim eksperimentalnim podacima s pozitivnim uzgonskim mlazovima za dva različita slučaja s promjenjivom temperaturom, a istim salinitetom. Pri tome su se analizirani rezultati tri mreže s različitim brojem elemenata kako bi se osigurala konvergencija numeričke mreže. RMSE vrijednosti između eksperimentalnih i numeričkih rezultata iznose 1,92, a  $R^2$  iznosi 0,98, stoga se može zaključiti da je hipoteza o ovom pristupu valjana te da se može primijeniti.
- Prilikom primjene strojnog učenja na negativne uzgonske mlazove, testirane su različite vrste ML algoritama. Najbolji učinak postignut je s umjetnom neuronskom mrežom za sve geometrijske točke s prosječnom točnošću RMSE 0,28 i  $R^2$  0,98. Za detaljniji uvid u performanse negativno nagnutih mlaznica korišten je SHAP algoritam za analizu negativnog ili pozitivnog doprinosa ulaznih varijabli na geometrijske karakteristike. Najznačajniji parametar bila je  $U_0$ , dok su  $h_s$  i  $H$  pokazali vrlo malu važnost. Analizirani su specifični slučajevi ispusta gdje se pojavljuju Coanda efekt i efekt plitke vode, pri čemu je uočen povećan utjecaj  $h_s$  i  $H$  na horizontalne koordinate. Predviđanje ML modela na temelju skupa podataka s uključenim prethodnim eksperimentalnim rezultatima ukazuje na slične rezultate i ponašanje. Međutim, nešto slabiji rezultati se mogu dobiti zbog nejednolike raspodjele podataka s obzirom da većina eksperimenata ima slične postavke. Također,

za neke točke, utjecaj kuta  $\theta$  bio je smanjen zbog sličnih kutova eksperimentalnih podataka što ukazuje na važnost adekvatne raspodjele podataka u bazi kako bi vrijednosti SHAP analize bile točne. Predviđanje rezultata modela strojnog učenja na temelju reduciranog broja varijabli rezultiralo je smanjenjem vrijednosti  $R^2$  na 0,957 i povećanjem RMSE na 0,369 u odnosu na početni model zbog varijabli koje nisu uzete u obzir.

- Prikazana je tehnika ugnježdivanja OpenFOAM-ROMS modela kako bi se detaljnije promatrali fenomeni u obalnom području. Pri praćenju onečišćenja koje dolazi iz ispusta, potrebno je primijeniti pasivnu skalarnu jednadžbu s obzirom da domena ima različita svojstva (gustoća, salinitet, temperatura) za razlikovanje područja otpadne vode i morske vode s istom gustoćom. Rezultati pasivnog skalara mogu se koristiti za naknadne simulacije dalekog polja koje se mogu povezati s oceanografskim modelima. Navedeni pristup uspješno je implementiran za slučaj ispusta u Rijeci. Osigurana je konvergencija rezultata povećanjem elemenata numeričke mreže te je izvršen proračun za ljetni i zimski uvjet. Kao što se i očekivalo, efluent je u ljetnom periodu ostao zarobljen na dubini od oko 5 metara ispod površine zbog značajne stratifikacije vodenog stupca. Za zimske testne uvjete otpadne vode će dospjeti na površinu u visoko razrijeđenoj koncentraciji.
- Napravljena je metodologija za analizu rada podmorskih ispusta na temelju Sentinel-2 snimki, primijenjena na ispust u Rijeci. Analizirane su snimke u periodu od 7 godina. Uočeno je da se na 63% dostupnih snimki nalaze oblaci, stoga nije moguća daljnja analiza. Među dostupnim snimkama bez oblaka, na 45% snimka se uočavaju promjene u blizini ispusta. Primijećeno je da vidljivost varira ovisno o godini i mjesecu koji se promatra. Tijekom ljetnog perioda je značajnije manji broj slika na kojima se vide promjene na površini zbog veće stratifikacije, stoga efluent ostaje na nižim razinama i nije vidljiv pomoću snimki. Također je uočeno da pri brzinama vjetra većim od 5 m/s efluent nije vidljiv zbog valova koji utječu na snimku. Analizom kontura oblika na površini može se uočiti dominantan smjer zone onečišćenja sjeverozapad - jugoistok, što može pomoći kod daljnjeg planiranja aktivnosti. Zaključeno je da se za buduće validacije satelitskih snimki na temelju terenskih mjerenja mora paziti na vremenske uvjete s obzirom da veliki broj slučajeva u kojima efluent nije vidljiv. Također se može zaključiti da se ovaj pristup na navedenoj lokaciji ne može koristiti za svakodnevne provjere rada, već kao dopunska metoda zbog česte naoblake. Uočeno je da smjer vjetra nije dominantan parametar u bliskoj zoni i zoni tranzicije te da nema direktan utjecaj na lokaciju gdje efluent dolazi

blizu morske površine. Uspoređeni su podaci između OpenFOAM-ROMS tehnike ugnježdavanja i satelitskih snimki te se može zaključiti da se područja onečišćenja podudaraju.

Navedene tehnike primjenjive su u cijelom nizu slučajeva modeliranja strujanja morske vode i širenja onečišćenja. Jednosmjerno ugnježdavanje može se primijeniti na problemima u kojima je potrebno korištenje numeričkih modela visoke rezolucije prilagođenih terenu i obalnim strukturama. Osim modeliranja industrijskih ispusta, ova se tehnika također može primijeniti na razne druge probleme: obalni tok i širenje onečišćenja u blizini razvedene obale, simulacija utjecaja valova na strukture u blizini obale, platforme, plovila itd. U budućnosti se može isprobati implementacija spajanja ostalih oceanografskih modela s OpenFOAM-om.

Buduća istraživanja u području strojnog učenja i uzgonskih mlazova trebala bi uključivati modele strojnog učenja uz predviđanje koncentracije duž središnje crte. Nadalje, da bi se dobili realističniji modeli, predloženi pristup treba primijeniti na mlaz u poprečnom strujanju. Isprobavanjem navedene tehnike na mlazove s više sapnica, mogla bi se usporediti važnost varijabli i dimenzija geometrije za ponašanje i miješanje efluenta s recipijentom.

Provedbom terenskih mjerenja u blizini ispusta u budućim istraživanjima potrebno je povezati vrijednosti indeksa  $I_{GB}$  s uvjetima u moru, te dubinom do koje se vide promjene na satelitskoj snimci. Provedbom istraživanja na drugim lokacijama mogu se uočiti koji utjecajni parametri se razlikuju ovisno o lokaciji. Osim toga, potrebno je provjeriti koje su granične vrijednosti dimenzija i protoka ispusta za koje on neće biti vidljiv na ovakvoj rezoluciji snimki. Daljnja istraživanja rada više podmorskih ispusta na temelju satelitskih snimki mogu se primijeniti za izradu modela strojnog učenja kojim se može predvidjeti ponašanje ispusta u blizini površine. Primjenom dronova kao dopunskom tehnikom moguće je dobivanje detaljnijeg uvida u ponašanje ispusta.



# Literatura

- [1] DhMZ - državni hidrometeorološki zavod, sektor za hidrologiju. <https://hidro.dhz.hr/>. Zadnji pristup : 10. 02. 2024.
- [2] Institut za oceanografiju i ribarstvo: Visoke i niske vode. <https://galijula.izor.hr/visoke-i-niske-vode/>. Zadnji pristup : 14. 02. 2024.
- [3] Komunalno društvo vodovod i kanalizacija rijeka. [https://www.kdrik-rijeka.hr/poslovanje/godisnja\\_izvjesca\\_o\\_poslovanju](https://www.kdrik-rijeka.hr/poslovanje/godisnja_izvjesca_o_poslovanju). Zadnji pristup : 13. 02. 2024.
- [4] Sinergise ltd. eo browser. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Zadnji pristup : 07. 02. 2024.
- [5] Solcast. <https://solcast.com/>. Zadnji pristup : 22. 01. 2024.
- [6] Ahmed F Abdel Gawad. Investigation of the dilution of outfall discharges using computational and neuro-fuzzy techniques. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, volume 43025, pages 843–852, 2007.
- [7] Ozeair Abessi i Philip JW Roberts. Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1):04015033, 2016.
- [8] Paul J Akar i Gerhard H Jirka. Buoyant spreading processes in pollutant transport and mixing part 1: Lateral spreading with ambient current advection. *Journal of Hydraulic Research*, 32(6):815–831, 1994.
- [9] Paul J Akar i Gerhard H Jirka. Buoyant spreading processes in pollutant transport and mixing part 2: Upstream spreading in weak ambient current. *Journal of Hydraulic Research*, 33(1):87–100, 1995.

- [10] Hassan Alfaifi, Abdolmajid Mohammadian, H Kheirkhah Gildeh, Amir Gharavi, i dr. Experimental and numerical study of the characteristics of thermal and nonthermal offset buoyant jets discharged into stagnant water. *Desalin. Water Treat.*, 141:171–186, 2019.
- [11] Marta Alvir, Luka Grbčić, Ante Sikirica, i Lado Kranjčević. Openfoam-roms nested model for coastal flow and outfall assessment. *Ocean engineering*, 264:112535, 2022.
- [12] Marta Alvir, Luka Grbčić, Ante Sikirica, i Lado Kranjčević. Reconstruction and analysis of negatively buoyant jets with interpretable machine learning. *Marine pollution bulletin*, 190:114881, 2023.
- [13] Peace Amoatey i Richard Bani. *Wastewater management*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [14] Mounir Amokranea i Adouda Salmic. Surface spreading of the brine discharge from the seawater reverse osmosis plants: Hamma water desalination plant in algeria. *Desalination and Water Treatment*, 222:81–91, 2021.
- [15] Akio Arakawa i Vivian R Lamb. Computational design of the basic dynamical processes of the ucla general circulation model. In Julius Chang, editor, *General Circulation Models of the Atmosphere*, volume 17 of *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications*, pages 173–265. Elsevier, 1977.
- [16] Hossein Ardalan i Fereidon Vafaei. Cfd and experimental study of 45° inclined thermal-saline reversible buoyant jets in stationary ambient. *Environmental Processes*, 6(1):219–239, 2019.
- [17] Joseph Awange i John Kiema. *Environmental Geoinformatics*. Springer, 2013.
- [18] Mohammad Azizi, Davood Goharikamel, i Fereidon Vafaei. Experimental investigation of nozzle angle effects on the brine discharge by inclined dense jets in stagnant water ambient. *SN Applied Sciences*, 2(9):1–9, 2020.
- [19] Joel Azzopardi, Alan Deidun, Fabrizio Gianni, Adam Pierre Gauci, Berta Angulo Pan, i Michele Cioffi. Classification of the coastal water bodies of the maltese islands through the assessment of a decadal ocean colour data set. *Journal of Coastal Research*, (65):1343–1348, 2013.

- [20] Donald John Baumgartner, WE Frick, i Philip Joseph William Roberts. *Dilution models for effluent discharges*. US Environmental Protection Agency, Pacific Ecosystems Branch, 1994.
- [21] Pooria Behnam, Meysam Faegh, i Mehdi Khiadani. A review on state-of-the-art applications of data-driven methods in desalination systems. *Desalination*, 532:115744, 2022.
- [22] Tobias Bleninger, Anne Niepelt, i Gerhard Jirka. Desalination plant discharge calculator. *Desalination and Water Treatment*, 13(1-3):156–173, 2010.
- [23] Valery Bondur i Viktor Zamshin. Study of intensive anthropogenic impacts of submerged wastewater discharges on marine water areas using satellite imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11):1759, 2022.
- [24] VG Bondur, VE Vorobyev, VV Zamshin, AN Serebryany, AA Latushkin, ME Li, OV Martynov, AP Hurchak, i DV Grinchenko. Monitoring anthropogenic impact on some coastal water areas of the black sea using multispectral satellite imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 54:1008–1022, 2018.
- [25] VG Bondur, VV Zamshin, A Sh Zamshina, i VE Vorobyev. Registering from space the features of deep wastewater outfalls into coastal water areas due to discharge collector breaks. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56:979–988, 2020.
- [26] Leo Breiman. Random forests. *Machine learning*, 45(1):5–32, 2001.
- [27] Tianqi Chen i Carlos Guestrin. Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, pages 785–794, 2016.
- [28] SKB Cheung, DYL Leung, W Wang, Joseph Hun Wei Lee, i Valiant Cheung. Visjet-a computer ocean outfall modelling system. In *Proceedings Computer Graphics International 2000*, pages 75–80. IEEE, 2000.
- [29] A Cipollina, A Brucato, F Grisafi, i S Nicosia. Bench-scale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11):1017–1022, 2005.
- [30] Amanda de Liz Arcari, Juliana Tavora, Daphne van der Wal, Mhd Salama, i dr. The wastewater contamination index: A methodology to assess the risk of wastewater con-



- tamination from satellite-derived water quality indicators. *Frontiers in Environmental Science*, 11:272, 2023.
- [31] D Deltares. Delft3d-flow simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *Delft Hydraulics, Delft*, 2013.
- [32] Jaydip Dey i Ritesh Vijay. A critical and intensive review on assessment of water quality parameters through geospatial techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31):41612–41626, 2021.
- [33] Robert L Doneker i Gerhard H Jirka. Cormix-gi systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal. *Desalination*, 139(1-3):263–274, 2001.
- [34] Harris Drucker, Christopher J Burges, Linda Kaufman, Alex Smola, i Vladimir Vapnik. Support vector regression machines. *Advances in neural information processing systems*, 9, 1996.
- [35] Tomislav Džoić. *Numeričko modeliranje disperzije u Jadranskom moru primjenom lagrangeovskih metoda*. Doktorski rad, University of Zagreb. Faculty of Science. Department of Geophysics, 2018.
- [36] Bruna Faria, Renato Mendes, Carina Lurdes Lopes, Ana Picado, Magda Sousa, i João Miguel Dias. Insights for sea outfall turbid plume monitoring with high-spatial-resolution satellite imagery application in portugal. *Remote Sensing*, 15(13):3368, 2023.
- [37] Claudia Ferrara, Massimiliano Lega, Giannetta Fusco, Paul Bishop, i Theodore Endreny. Characterization of terrestrial discharges into coastal waters with thermal imagery from a hierarchical monitoring program. *Water*, 9(7):500, 2017.
- [38] Joel H Ferziger, Milovan Perić, i Robert L Street. *Computational methods for fluid dynamics*, volume 4. Springer, 2020.
- [39] Hugo B Fischer, John E List, C Robert Koh, Jorg Imberger, i Norman H Brooks. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic press, 1979.
- [40] BC Forster, Sha Xingwei, i XU Baide. Remote sensing of sea water quality parameters using landsat-tm. *International Journal of Remote Sensing*, 14(15):2759–2771, 1993.

- [41] WE Frick, PJW Roberts, LR Davis, J Keyes, DJ Baumgartner, i KP George. Dilution models for effluent discharges. *Visual Plumes, EPA/600/R-03*, 25, 2003.
- [42] Javier García-Alba, Javier F Bárcena, i Andrés García. Zonation of positively buoyant jets interacting with the water-free surface quantified by physical and numerical modelling. *Water*, 12(5):1324, 2020.
- [43] Michelle M Gierach, Benjamin Holt, Rebecca Trinh, B Jack Pan, i Christine Rains. Satellite detection of wastewater diversion plumes in southern california. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 186:171–182, 2017.
- [44] Diana M Arroyave Gómez, Marco Bartoli, Mariano Bresciani, Giulia Luciani, i Mauricio Toro-Botero. Biogeochemical modelling of a tropical coastal area undergoing seasonal upwelling and impacted by untreated submarine outfall. *Marine Pollution Bulletin*, 172:112771, 2021.
- [45] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. Akcijski program strategije upravljanja morskim okolišem i obalnim područjem “sustav praćenja i promatranja za stalnu procjenu stanja jadranskog mora (2021.-2026.)”. *Vlada Republike Hrvatske, Zagreb*, 2021.
- [46] Iva Mrša Haber, Tarzan Legović, Lado Kranjčević, i Marijan Cukrov. Simulation of pollutants spreading from a sewage outfall in the rijeka bay. *Mediterranean Marine Science*, 21(1):116–128, 2020.
- [47] J Hauserman. Florida’s coastal and ocean future-a blueprint for economic and environmental leadership: Caribbean conservation corporation and sea turtle survival league, clean water network of florida, environmental defense. *Natural Resources Defense Council, National Wildlife Federation, Reef Relief, The Surfrider Foundation, The Ocean Conservancy*, 2007.
- [48] Minna Ho, Jeroen M Molemaker, Fayçal Kessouri, James C McWilliams, i Timu W Gallien. High-resolution nonhydrostatic outfall plume modeling: Cross-flow validation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(8):04021028, 2021.
- [49] Wen-xin Huai, Zhi-wei Li, Zhong-dong Qian, Yu-hong Zeng, Jie Han, i Wen-qi Peng. Numerical simulation of horizontal buoyant wall jet. *Journal of Hydrodynamics*, 22(1):58–65, 2010.

- [50] Aakanksha Jain, Iman Bahreini Toussi, Abdolmajid Mohammadian, Hossein Bonakdari, i Majid Sartaj. Applications of anfis-type methods in simulation of systems in marine environments. *Mathematical and Computational Applications*, 27(2):29, 2022.
- [51] Ivica Janeković, Hrvoje Mihanović, Ivica Vilibić, i Martina Tudor. Extreme cooling and dense water formation estimates in open and coastal regions of the adriatic sea during the winter of 2012. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(5):3200–3218, 2014.
- [52] Hrvoje Jasak, Aleksandar Jemcov, i Željko Tuković. Openfoam: A c++ library for complex physics simulations. In *International workshop on coupled methods in numerical dynamics*, volume 1000, pages 1–20, 2007.
- [53] Baoxin Jiang, Adrian Wing-Keung Law, i Joseph Hun-Wei Lee. Mixing of 30° and 45° inclined dense jets in shallow coastal waters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3):241–253, 2014.
- [54] Mingtao Jiang, Adrian Wing-Keung Law, i Jie Song. Mixing characteristics of inclined dense jets with different nozzle geometries. *Journal of Hydro-environment Research*, 27:116–128, 2019.
- [55] Jonathan Johnsplass, Anja Celine Winger, Anders Bjørgesæter, Marit Kleven, i Julie Damsgaard Jensen. Combined integral and particle model for describing the dispersion, dilution, terminal layer formation and influence area from a point source discharge into a water body. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(5):1009–1034, 2021.
- [56] F Juretic. cfmesh user guide. *Creative Fields, Ltd*, 1, 2015.
- [57] Agonist Kastrati, Franck Oswald, Antoine Scalabre, i Katharina M Fromm. Photophysical properties of anthracene derivatives. *Photochem*, 3(2):227–273, 2023.
- [58] Guolin Ke, Qi Meng, Thomas Finley, Taifeng Wang, Wei Chen, Weidong Ma, Qiwei Ye, i Tie-Yan Liu. Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30, 2017.
- [59] H Kheirkhah Gildeh, A Mohammadian, I Nistor, i H Qiblawey. Numerical modeling of turbulent buoyant wall jets in stationary ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(6):04014012, 2014.

- [60] Hossein Kheirkhah Gildeh, Abdolmajid Mohammadian, i Ioan Nistor. Inclined dense effluent discharge modelling in shallow waters. *Environmental Fluid Mechanics*, 21:955–987, 2021.
- [61] Hossein Kheirkhah Gildeh, Abdolmajid Mohammadian, Ioan Nistor, i Hazim Qiblawey. Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, 15:537–562, 2015.
- [62] Hossein Kheirkhah Gildeh, Abdolmajid Mohammadian, Ioan Nistor, Hazim Qiblawey, i Xiaohui Yan. Cfd modeling and analysis of the behavior of 30 and 45 inclined dense jets—new numerical insights. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2):112–127, 2016.
- [63] Sabine Lattemann i Gary Amy. Marine monitoring surveys for desalination plants—a critical review. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3):233–245, 2013.
- [64] Shuen Law, Mark J Davidson, Craig McConnochie, i Daniel Lagrava. Improved numerical predictions of inclined negatively buoyant jet behaviour. *Environmental Fluid Mechanics*, 23(4):879–906, 2023.
- [65] Engin Leblebici i Ismail H Tuncer. Openfoam coupled with wrf for wind power estimations. In *9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, page 3062, 2017.
- [66] Goran Lončar, Roko Andričević, i Vedran Petrov. Numerički modeli zajedničkog rada podmorskih ispusta otpadnih voda. *Građevinar*, 59(11.):955–965, 2007.
- [67] Goran Lončar, Goran Gjetvaj, i Miroslav Matković. Usporedba modela širenja oblaka efluenta u području bliske zone nastalog radom podmorskog ispusta priobalnog sustava javne odvodnje. *Hrvatske vode*, 17(69/70):229–240, 2009.
- [68] Scott M Lundberg i Su-In Lee. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30, 2017.
- [69] Encarni Medina-Lopez i Leonardo Ureña-Fuentes. High-resolution sea surface temperature and salinity in coastal areas worldwide from raw satellite data. *Remote Sensing*, 11(19):2191, 2019.

- [70] George L Mellor. *Users guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University Princeton, NJ, 1998.
- [71] Richard L Miller, Carlos E Del Castillo, i Brent A McKee. *Remote sensing of coastal aquatic environments*, volume 511. Springer, 2005.
- [72] Frank J Millero i Fjos Huang. The density of seawater as a function of salinity (5 to 70 g kg<sup>-1</sup>) and temperature (273.15 to 363.15 K). *Ocean Science*, 5(2):91–100, 2009.
- [73] Frank J Millero i Alain Poisson. International one-atmosphere equation of state of seawater. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 28(6):625–629, 1981.
- [74] Thomas M Missimer i Robert G Maliva. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434:198–215, 2018.
- [75] Robin Morelissen, Theo van der Kaaij, i Tobias Bleninger. Dynamic coupling of near field and far field models for simulating effluent discharges. *Water science and technology*, 67(10):2210–2220, 2013.
- [76] Iva Mrša Haber. *Simuliranje širenja onečišćenja mora kvarnerskog zaljeva iz priobalnih ispusta*. Doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2016.
- [77] A Muhammetoglu, OB Yalcin, i T Ozcan. Prediction of wastewater dilution and indicator bacteria concentrations for marine outfall systems. *Marine environmental research*, 78:53–63, 2012.
- [78] Seyed Habib Musavi-Jahromi i Javad Ahadiyan. Simulation of circular jet outfalls using artificial neural network. *Int. Journal of Physical Sciences*, 8(20):1099–1110, 2012.
- [79] Navid Nekouee, Sajad Ahmad Hamidi, Philip JW Roberts, i David J Schwab. Assessment of a 3d hydrostatic model (pom) in the near field of a buoyant river plume in lake michigan. *Water Air and Soil Pollution*, 226(7):1–12, 2015.
- [80] Michael A Nielsen. *Neural networks and deep learning*, volume 25. Determination press San Francisco, CA, USA, 2015.

- [81] Ioannis K Nikiforakis, AI Stamou, i George C Christodoulou. Integrated modeling of single port brine discharges into unstratified stagnant ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, 17:247–275, 2017.
- [82] CJ Oliver, MJ Davidson, i RI Nokes.  $k-\varepsilon$  predictions of the initial mixing of desalination discharges. *Environmental Fluid Mechanics*, 8:617–625, 2008.
- [83] P. Palomar i I.J. Losada. Desalination in Spain: Recent developments and recommendations. *Desalination*, 255(1):97–106, 2010.
- [84] Pilar Palomar, Javier Lopez Lara, i Inigo J Losada. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290:28–42, 2012.
- [85] Pilar Palomar i IJ Losada. Desalination in Spain: Recent developments and recommendations. *Desalination*, 255(1-3):97–106, 2010.
- [86] Argyris Panagopoulos i Katherine-Joanne Haralambous. Environmental impacts of desalination and brine treatment—challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161:111773, 2020.
- [87] Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, i dr. Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12:2825–2830, 2011.
- [88] Igor Polikarpov, Faiza Al-Yamani, Peter Petrov, Maria Saburova, Vassil Mihalkov, i Abdullah Al-Enezi. Phytoplankton bloom detection during the COVID-19 lockdown with remote sensing data: Using Copernicus Sentinel-3 for north-western Arabian/Persian Gulf case study. *Marine Pollution Bulletin*, 171:112734, 2021.
- [89] Petra Pranić, Cléa Denamiel, i Ivica Vilibić. Performance of the Adriatic Sea and coast (ADRISE) climate component—a COAWST v3.3-based one-way coupled atmosphere–ocean modelling suite: ocean results. *Geoscientific Model Development*, 14(10):5927–5955, 2021.
- [90] Liudmila Prokhorenkova, Gleb Gusev, Aleksandr Vorobev, Anna Veronika Dorogush, i Andrey Gulin. Catboost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural information processing systems*, 31, 2018.

- [91] Mohammadmehdi Ramezani, Ozeair Abessi, i Ali Rahmani Firoozjaee. Effect of proximity to bed on 30° and 45° inclined dense jets: a numerical study. *Environmental Processes*, 8:1141–1164, 2021.
- [92] Gareth Rees. *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press, 2013.
- [93] Patrick J Roache. *Verification and validation in computational science and engineering*. Hermosa Publishers, 1998.
- [94] Philip JW Roberts, Adrian Ferrier, i Greg Daviero. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8):693–699, 1997.
- [95] Rew Russell, Edward Hartnett, i John Caron. Netcdf-4: Software implementing an enhanced data model for the geosciences. In *22nd International Conference on Interactive Information Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology*, volume 6, 2006.
- [96] Vasit Sagan, Kyle T Peterson, Maitiniyazi Maimaitijiang, Paheding Sidike, John Sloan, Benjamin A Greeling, Samar Maalouf, i Craig Adams. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205:103187, 2020.
- [97] UN Regional Seas. Percentage of total population living in coastal areas.
- [98] Bridget N Seegers, Elizabeth N Teel, Raphael M Kudela, David A Caron, i Burton H Jones. Glider and remote sensing observations of the upper ocean response to an extended shallow coastal diversion of wastewater effluent. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 186:198–208, 2017.
- [99] Dongdong Shao i Adrian Wing-Keung Law. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental fluid mechanics*, 10(5):521–553, 2010.
- [100] Alexander F Shchepetkin i James C McWilliams. The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*, 9(4):347–404, 2005.

- [101] Alexander F Shchepetkin i James C McWilliams. Computational kernel algorithms for fine-scale, multiprocess, longtime oceanic simulations. In *Handbook of Numerical Analysis*, volume 14, pages 121–183. Elsevier, 2009.
- [102] TJ Sherwin, JP Matthews, i F Kennedy. Effluent slicks in the menai strait: a comparison of ers-1 sar signatures and model predictions. *Marine pollution bulletin*, 34(4):264–268, 1997.
- [103] Tsan-Hsing Shih, William W Liou, Aamir Shabbir, Zhigang Yang, i Jiang Zhu. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & fluids*, 24(3):227–238, 1995.
- [104] PA Silva, M Ramos, M Almeida, i J Dubert. Water exchange mechanisms between ria de aveiro and the atlantic ocean. *Journal of Coastal Research*, pages 1622–1626, 2006.
- [105] Yuhe Song i Dale Haidvogel. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of Computational Physics*, 115(1):228–244, 1994.
- [106] Anna Spinosa, Alex Ziemba, Alessandra Saponieri, Leonardo Damiani, i Ghada El Serafy. Remote sensing-based automatic detection of shoreline position: A case study in apulia region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6):575, 2021.
- [107] Sina Tahmooreesi i Davoud Ahmadyar. Effects of turbulent schmidt number on cfd simulation of  $45^\circ$  inclined negatively buoyant jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(1):39–62, 2021.
- [108] Hessam Tofighian, Abdolreza Aghajanpour, Ozeair Abessi, i Mohammadmehdi Ramezani. Simulation of inclined dense jets in stagnant environments: an les and experimental study. *Environmental Fluid Mechanics*, 22(5):1161–1185, 2022.
- [109] Rebecca C Trinh, Cedric G Fichot, Michelle M Gierach, Benjamin Holt, Nabin K Malakar, Glynn Hulley, i Jayme Smith. Application of landsat 8 for monitoring impacts of wastewater discharge on coastal water quality. *Frontiers in Marine Science*, 4:329, 2017.



- [110] Yusuke Uchiyama, Eileen Y Idica, James C McWilliams, i Keith D Stolzenbach. Wastewater effluent dispersal in southern california bays. *Continental Shelf Research*, 76:36–52, 2014.
- [111] P Vafeiadou, I Papakonstantis, i G Christodoulou. Numerical simulation of inclined negatively buoyant jets. In *The 9th international conference on environmental science and technology, September*, pages 1–3, 2005.
- [112] Ivica Vilibić, Hrvoje Mihanović, Ivica Janeković, Cléa Denamiel, Pierre-Marie Poulain, Mirko Orlić, Natalija Dunić, Vlado Dadić, Mira Pasarić, Stipe Muslim, i dr. Wintertime dynamics in the coastal northeastern adriatic sea: the nadex 2015 experiment. *Ocean science*, 14(2):237–258, 2018.
- [113] Ivica Vilibić, Hrvoje Mihanović, Ivica Janeković, i Jadranka Šepić. Modelling the formation of dense water in the northern adriatic: Sensitivity studies. *Ocean Modelling*, 101:17–29, 2016.
- [114] Yuxin Wang, Xianqiang He, Yan Bai, Yingyu Tan, Bozhong Zhu, Difeng Wang, Mengyuan Ou, Fang Gong, Qiankun Zhu, i Haiqing Huang. Automatic detection of suspected sewage discharge from coastal outfalls based on sentinel-2 imagery. *Science of The Total Environment*, 853:158374, 2022.
- [115] PD Wass, SD Marks, JW Finch, G J [xdot] L Leeks, i JK Ingram. Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensed imagery for suspended sediment transport studies in the humber catchment. *Science of the Total Environment*, 194:263–283, 1997.
- [116] J Whitaker. netcdf4 api documentation. URL: <http://unidata.github.io/netcdf4-python>, 2015.
- [117] Xiaowei Wu, Xiaoli Zhao, Rouzheng Chen, Peng Liu, Weigang Liang, Junyu Wang, Miaomiao Teng, Xia Wang, i Shixiang Ga. Wastewater treatment plants act as essential sources of microplastic formation in aquatic environments: A critical review. *Water Research*, page 118825, 2022.

- [118] Xiaohui Yan, Behnaz Ghodoosipour, i Abdolmajid Mohammadian. Three-dimensional numerical study of multiple vertical buoyant jets in stationary ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(7):04020049, 2020.
- [119] Xiaohui Yan i Abdolmajid Mohammadian. Multigene genetic-programming-based models for initial dilution of laterally confined vertical buoyant jets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8):246, 2019.
- [120] Xiaohui Yan i Abdolmajid Mohammadian. Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports. *Water*, 11(10):2077, 2019.
- [121] Xiaohui Yan i Abdolmajid Mohammadian. Evolutionary modeling of inclined dense jets discharged from multiport diffusers. *Journal of Coastal Research*, 36(2):362–371, 2020.
- [122] Xiaohui Yan, Abdolmajid Mohammadian, i Xin Chen. Three-dimensional numerical simulations of buoyant jets discharged from a rosette-type multiport diffuser. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11):409, 2019.
- [123] Xiaohui Yan, Yan Wang, Abdolmajid Mohammadian, i Jianwei Liu. Simulations of the concentration fields of rosette-type multiport buoyant discharges using combined cfd and multigene genetic programming techniques. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11):1311, 2021.
- [124] Xiaohui Yan, Yan Wang, Abdolmajid Mohammadian, Jianwei Liu, i Xiaoqiang Chen. Cfd-cnn modeling of the concentration field of multiport buoyant jets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10):1383, 2022.
- [125] SM Yavari i F Qaderi. Determination of thermal pollution of water resources caused by neka power plant through processing satellite imagery. *Environment, Development and Sustainability*, 22:1953–1975, 2020.
- [126] Radyadour Kh Zeytounian. Joseph boussinesq and his approximation: a contemporary view. *Comptes Rendus Mecanique*, 331(8):575–586, 2003.
- [127] Shuai Zhang. *Large eddy simulations (LES) of inclined dense jets in coastal waters*. Doktorski rad, Nanyang Technological University, Singapore, 2016.

- [128] Shuai Zhang, Baoxin Jiang, Adrian Wing-Keung Law, i Bing Zhao. Large eddy simulations of 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 16:101–121, 2016.
- [129] Shuai Zhang, Adrian Wing-Keung Law, i Mingtao Jiang. Large eddy simulations of 45° and 60° inclined dense jets with bottom impact. *Journal of hydro-environment research*, 15:54–66, 2017.
- [130] Xu Zhang, Yusuke Uchiyama, i Akihiko Nakayama. On relaxation of the influences of treated sewage effluent on an adjacent seaweed farm in a tidal strait. *Marine pollution bulletin*, 144:265–274, 2019.
- [131] Zhihua Zhang, Difeng Wang, Yinhe Cheng, i Fang Gong. Long-term changes and factors that influence changes in thermal discharge from nuclear power plants in daya bay, china. *Remote Sensing*, 14(3):763, 2022.
- [132] YJ Zhao, L Zeng, AL Zhang, i YH Wu. Response of current, temperature, and algae growth to thermal discharge in tidal environment. *Ecological Modelling*, 318:283–292, 2015.

# Popis slika

1.1	Fotografija podmorskog ispusta [47] . . . . .	1
1.2	Skice podmorskih ispusta s (a) pozitivnim i (b) negativnim uzgonskim mlazom	2
1.3	Rezultati simulacije za nagnuti termalni uzgonski mlaz s povećanim salinitetom. Boje prikazuju koncentraciju ( $C$ ) mlaza u promatranom području [16]. . . . .	6
1.4	Rezultati ROMS modela širenja onečišćenja iz podmorskih ispusta [110]. De- blja bijela linija predstavlja podmorski ispust, a tanja linija izobate na 100 i 500 metara. . . . .	9
1.5	Primjer multispektralne Google Earth satelitske snimke mora kod puknuća ci- jevi podmorskog ispusta [24]. Bijela deblja linija predstavlja podmorskih ispust, a crtkani krug vidljivu lokaciju izbijanja onečišćenja na morsku površinu. . . .	11
1.6	Rezultati klasifikacije ispusta temeljeni na multispektralnim satelitskim slikama [114] za (a) 20. rujna 2021., (b) 14. studenog 2021., (c) 4. prosinca 2021. i (d) 19. prosinca 2021. . . . .	12
1.7	Doprinos doktorskog rada u kontekstu projektiranja sustava ispuštanja otpadnih voda . . . . .	14
2.1	Shema pozitivnog uzgonskog mlaza pri $\rho_e < \rho_r$ . . . . .	18
2.2	Shema negativnog uzgonskog mlaza pri $\rho_e > \rho_r$ s karakterističnim točkama [12]	18
2.3	Struktura OpenFOAM modela te prikaz podmapa i datoteka . . . . .	21
2.4	Prikaz trodimenzionalne numeričke domene za validaciju pozitivnih uzgonskih mlazova . . . . .	27
2.5	Poprečni presjek numeričke mreže srednje veličine za validaciju pozitivnih uz- gonskih mlazova . . . . .	28
2.6	Prikaz trodimenzionalne numeričke domene za validaciju negativnog uzgon- skog mlaza [12] . . . . .	30

2.7	Poprečni presjek numeričke mreže srednje veličine za validaciju negativnih uzgonskih mlazova . . . . .	30
2.8	Konture brzine za (a) netermalni i (b) termalni slučaj te koncentracije za (c) netermalni i (d) termalni slučaj. Crtkana linija predstavlja trajektoriju. . . . .	33
2.9	Usporedba vremenski usrednjenih središnjih linija između eksperimentalnih rezultata [10] i numeričkih simulacija za termalni i netermalni slučaj . . . . .	34
2.10	Usporedba središnje linije za RANS i LES simulacije s prethodno provedenim eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima [128] . . . . .	35
2.11	Konture vremenski usrednjene (a) brzine i (b) udio koncentracije $\alpha$ na središnjem presjeku RANS simulacije [12] . . . . .	36
2.12	Konture vremenski usrednjene (a) brzine i (b) udio koncentracije $\alpha$ na središnjem presjeku LES simulacije . . . . .	36
2.13	Usporedba rezultata udijela koncentracije $\alpha$ nakon 120 sekundi za (a) RANS i (b) LES simulaciju . . . . .	37
3.1	Dijagram toka za izradu modela strojnog učenja negativnih uzgonskih mlazova	42
3.2	Usporedba predviđenih podataka i podataka iz numeričkih simulacija za ANN model strojnog učenja . . . . .	44
3.3	Krivulja učenja za ANN model . . . . .	45
3.4	Korelacijska toplinska karta koja prikazuje odnos između značajki na temelju Pearsonovog koeficijenta korelacije . . . . .	46
3.5	SHAP trakasti dijagram važnosti značajke za geometrijske karakteristike . . . .	47
3.6	SHAP graf sažetka za geometrijske karakteristike . . . . .	48
3.7	SHAP graf djelomične ovisnosti za $\theta$ i $U_0$ . . . . .	49
3.8	SHAP vodopadni dijagram za $h_s/L_M = 0,038$ i $\theta = 50^\circ$ . . . . .	51
3.9	SHAP vodopadni dijagram za $dFr/(H) = 0,65$ i $\theta = 45^\circ$ . . . . .	52
3.10	SHAP graf sažetka za kombinirani skup podataka o geometrijskim karakteristikama . . . . .	54
3.11	SHAP graf djelomične ovisnosti s reduciranim brojem varijabli $\theta$ i $dFr$ . . . .	56
4.1	Prikaz Arakawa C-mreže . . . . .	57
4.2	ROMS domena Kvarnerskog zaljeva . . . . .	58
4.3	Dijagram toka za OpenFOAM-ROMS ugnježdavanje . . . . .	60

4.4	Prikaz ROMS i OpenFOAM domene [11] za promatrani slučaj. Sive točke prikazuju ROMS domenu, dok je ljubičasti pravokutnik OpenFOAM domena koja se nalazi oko narančaste linije podmorskog cjevovoda. . . . .	62
4.5	Prikaz 3D OpenFOAM (a) domene i (b) srednje mreže testnog primjera podmorskog ispusta u Rijeci [11] . . . . .	63
4.6	Prikaz domene i mreže srednje veličine za validaciju tehnike ugnježdivanja [11]	65
4.7	Usporedba smjera i magnitude brzine između OpenFOAM simulacija s različitim gustoćama mreže i ROMS podataka za a) zimske uvjete u $x$ smjeru, b) zimske uvjete u $y$ smjeru, c) ljetne uvjete u $x$ smjeru i d) ljetne uvjete u $y$ smjeru po dubini za točku s koordinatama $x = 74$ m i $y = 50,375$ m [11] . . . . .	66
4.8	Konture brzine za (a) zimske i (b) ljetne uvjete iz ROMS-a te (c) zimske i (d) ljetne uvjete nakon 1 sata simulacije u vertikalnom presjeku [11] . . . . .	67
4.9	Izopovršine za koncentraciju pasivnog skalara 0,5% obojane prema magnitudi brzina pri odabranim (a) zimskim i (b) ljetnim uvjetima [11] . . . . .	69
4.10	Magnitude brzine za središnji presjek po $y$ osi i presjeke za $x = 30$ m i $x = 120$ m pri (a) zimskim i (b) ljetnim uvjetima [11] . . . . .	70
4.11	Konture gustoće na središnjoj plohi po $y$ smjeru za (a) zimske i (b) ljetne uvjete [11] . . . . .	71
5.1	Vrste elektromagnetskog zračenja [57] . . . . .	73
5.2	Satelitske snimke (a) aktivnih i (b) pasivnih senzora za područje Riječkog zaljeva preuzete iz Sentinel Hub EO Browsera [4] . . . . .	74
5.3	Shema uređaja za daljinsko očitavanje . . . . .	75
5.4	Satelitske snimke (a) stvarnih boja i (b) klasifikacije scene na području iznad Riječkog ispusta (12.9.2023) pri čemu svjetlo plava boja predstavlja tanki cirus, siva srednju vjerojatnost oblaka, a bijela visoku vjerojatnost oblaka . . . . .	85
5.5	Analizirano područje uz lokaciju ispusta . . . . .	86
5.6	Prikaz a) početne slike, b) maske i c) rezultata maskiranja za 1. 1. 2017. . . . .	87
5.7	Prikaz Sentinel-2 a) RGB slike, b) histograma za 1. 1. 2017. te c) RGB slike, d) histograma za 15. 4. 2022. . . . .	88
5.8	Prikaz slike s $I_{GB}$ indeksom za a) 1.1.2017. i b) 15.4.2022. . . . .	89
5.9	Prikaz skaliranih slika s $I_{GB}$ indeksom za a) 1. 1. 2017., b) histogram te za c) 15. 4. 2022. i d) histogram . . . . .	90

---

5.10	Dijagram toka za analizu podmorskih ispusta temeljem satelitskih snimki . . . .	91
5.11	Prikaz vidljivosti perjanice na snimkama po godinama . . . . .	92
5.12	Prikaz vidljivosti perjanice na snimkama po mjesecima . . . . .	93
5.13	Povezanost vidljivosti perjanice s jačinom i smjerom vjetra . . . . .	94
5.14	Konture perjanice na a) 2019. i b) 2021. godinu . . . . .	95
5.15	Učestalost pojavljivanja lokacije unutar konture perjanice . . . . .	96
5.16	Ovisnost lokacije središta konture u odnosu na smjer vjetra po a) x i b) y osi . .	97
5.17	Ovisnost vidljive površine perjanice o vodostaju . . . . .	98
5.18	Korelacijska toplinska karta za parametre konture perjanice i podataka o uvje- tima strujanja . . . . .	99
5.19	Izopovršine za koncentraciju pasivnog skalara 0,5% obojane prema magnitudi brzina za 20. srpnja 2019. . . . .	100
5.20	Promjena a) gustoće b) saliniteta i c) temperature po dubini . . . . .	101
5.21	Usporedba (a) OpenFOAM-ROMS ugnježdavanja na dubini od 1 metar i (b) satelitskih snimki . . . . .	102
5.22	Vrijednosti koncentracije iz numeričke simulacije za dubinu od a) 0 m (površina mora), b) 2,5 m i c) 5 m . . . . .	102

# Popis tablica

2.1	Vrijednosti GCI za vremensku usrednjenu brzinu $u$ na udaljenosti $x = 20$ mm koja se nalazi na središnjoj liniji [11] . . . . .	32
2.2	GCI za vremenski usrednjenu horizontalnu i vertikalnu lokaciju vrha središnje linije $x_m$ i $z_m$ [12] . . . . .	34
3.1	Granične vrijednosti ulaznih varijabli modela strojnog učenja [12] . . . . .	39
3.2	Granične vrijednosti izlaznih varijabli modela strojnog učenja [12] . . . . .	39
3.3	Hiperparametri za algoritme strojnog učenja . . . . .	41
3.4	Prosječne vrijednosti $R^2$ i RMSE te njihove standardne devijacije za modele strojnog učenja na bazi treniranja/testiranja uz K-struku unakrsnu validaciju [12]	43
3.5	Prosječne vrijednosti $R^2$ i RMSE za validacijski set [12] . . . . .	43
3.6	Rezultati ML modela za bazu podataka uključujući vrijednosti iz prethodnih eksperimenata [12] . . . . .	53
3.7	Rezultati modela strojnog učenja za treniranje/testiranje i validaciju na primjeru reduciranog broja ulaznih varijabli [12] . . . . .	55
4.1	GCI za maksimalnu visinu podizanja uzgonskog mlaza $h_{uzg}$ pri 0,5% koncentracije onečišćenja za ljetne uvjete [11] . . . . .	68
5.1	Valne duljine i spektar Sentinel-2 satelita, gdje je $\lambda_{cvd}$ centralna valna duljina [4]	84





# Podatci o autorici

## ŽIVOTOPIS

Marta Alvir, mag. ing. mech. je asistentica na Tehničkom fakultetu, Sveučilišta u Rijeci na Zavodu za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo. Rođena je 1996. godine u Rijeci, gdje je 2015. godine završila prirodoslovno-matematički smjer u Gimnaziji Andrije Mohorovičića. Na Tehničkom fakultetu, Sveučilišta u Rijeci diplomirala je na prijediplomskom studiju 2018. te 2020. godine na diplomskom sveučilišnom studiju strojarstva, smjer Računarska mehanika i inženjerstvo. Nakon završetka diplomskog studija, iste godine je nastavila obrazovanje na poslijediplomskom doktorskom studiju za znanstveno područje Tehničke znanosti, znanstveno polje Temeljne tehničke znanosti. Zaposlena je u okviru programa "Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti" Hrvatske zaklade za znanost, na temelju projekta "Računalni model strujanja, poplavljivanja i širenja onečišćenja u rijekama i obalnim morskim područjima". Do sad je objavila 12 znanstvenih radova, pri čemu je 9 indeksirano u Q1 bazi prema WoS-u. Sudjelovala je na 4 međunarodne znanstvene konferencije. Dobitnica Dekanove nagrade za studentsku izvrsnost u akademskoj godini 2019./2020, Rektorove nagrade za izvrsnost u akademskoj godini 2022./2023., te nagrade Zaklade Sveučilišta u Rijeci za 2022. godinu.

## POPIS RADOVA

Sikirica, A., Lučin, I., Alvir, M., Kranjčević, L., i Čarija, Z. 2024. Computationally efficient optimisation of elbow-type draft tube using neural network surrogates. *Alexandria Engineering Journal*, 90, 129-152.

Holjević, T., Družeta, S., Grbčić, L., i Alvir, M. 2023. Empirical Shape-Based Estimation of Settling Microplastic Particles Drag Coefficient. *Journal of Marine Science and Engineering*,

11(11), 2166.

Lučin, B., Čarija, Z., Alvir, M., i Lučin, I. 2023. Strategies for Green Shipbuilding Design and Production Practices Focused on Reducing Microplastic Pollution Generated during Installation of Plastic Pipes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 983.

Alvir, M., Grbčić, L., Sikirica, A., i Kranjčević, L. 2023. Reconstruction and analysis of negatively buoyant jets with interpretable machine learning. *Marine Pollution Bulletin*, 190, 114881.

Sikirica, A., Grbčić, L., Alvir, M. i Kranjčević, L., 2022. Computational Efficiency Assessment of Adaptive Mesh Refinement for Turbulent Jets in Crossflow. *Mathematics*, 10(4), p.620.

Alvir, M., Grbčić, L., Sikirica, A. i Kranjčević, L., 2022. Numerical Modeling of Inclined Buoyant Jets for Different Flow Conditions. *Pomorski zbornik*, (4), pp.77-86.

Kraus, R., Baljak, V., Lušić, D. V., Kranjčević, L., Cenov, A., Glad, M., Kauzlarić, V., Lušić, D., Grbčić, L., Alvir, M., Pećarević, M. i Jozić, S. 2022. Impacts of Atmospheric and Anthropogenic Factors on Microbiological Pollution of the Recreational Coastal Beaches Neighboring Shipping Ports. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8552.

Grbčić, L., Družeta, S., Mauša, G., Lipić, T., Lušić, D.V., Alvir, M., Lučin, I., Sikirica, A., Davidović, D., Travaš, V., Kalafatovic, D., Pikelj, K., Fajković, H., Holjević, T. i Kranjčević, L. 2022. Coastal water quality prediction based on machine learning with feature interpretation and spatio-temporal analysis. *Environmental Modelling & Software*, 155, p.105458.

Lučin, I., Družeta, S., Mauša, G., Alvir, M., Grbčić, L., Lušić, D. V., Sikirica, A. i Kranjčević, L., 2022. Predictive modeling of microbiological seawater quality in karst region using cascade model. *Science of The Total Environment*, 851, p.158009.

Alvir, M., Grbčić, L., Sikirica, A. i Kranjčević, L., 2022. OpenFOAM-ROMS nested model for coastal flow and outfall assessment. *Ocean Engineering*, 264, p.112535.

Travaš, V., Kranjčević, L., Družeta, S., Holjević, T., Lučin, I., Alvir, M., Grbčić, L., i Sikirica, A. 2021. Model gibanja čestica mikroplastike u nehomogenom i laminarnom polju brzine. *Hrvatske vode*, 29(117), 201-213.

Vukić Lušić, D., Cenov, A., Lušić, D., Glad, M., Jozić, S., Alvir, M., i Kranjčević, L. 2021. Kakvoća mora za kupanje u Primorsko-goranskoj županiji i na riječkom području u posljednjem desetljeću. *Hrvatske vode*, 29(116), 103-112.