

Zajednica izvršitelja



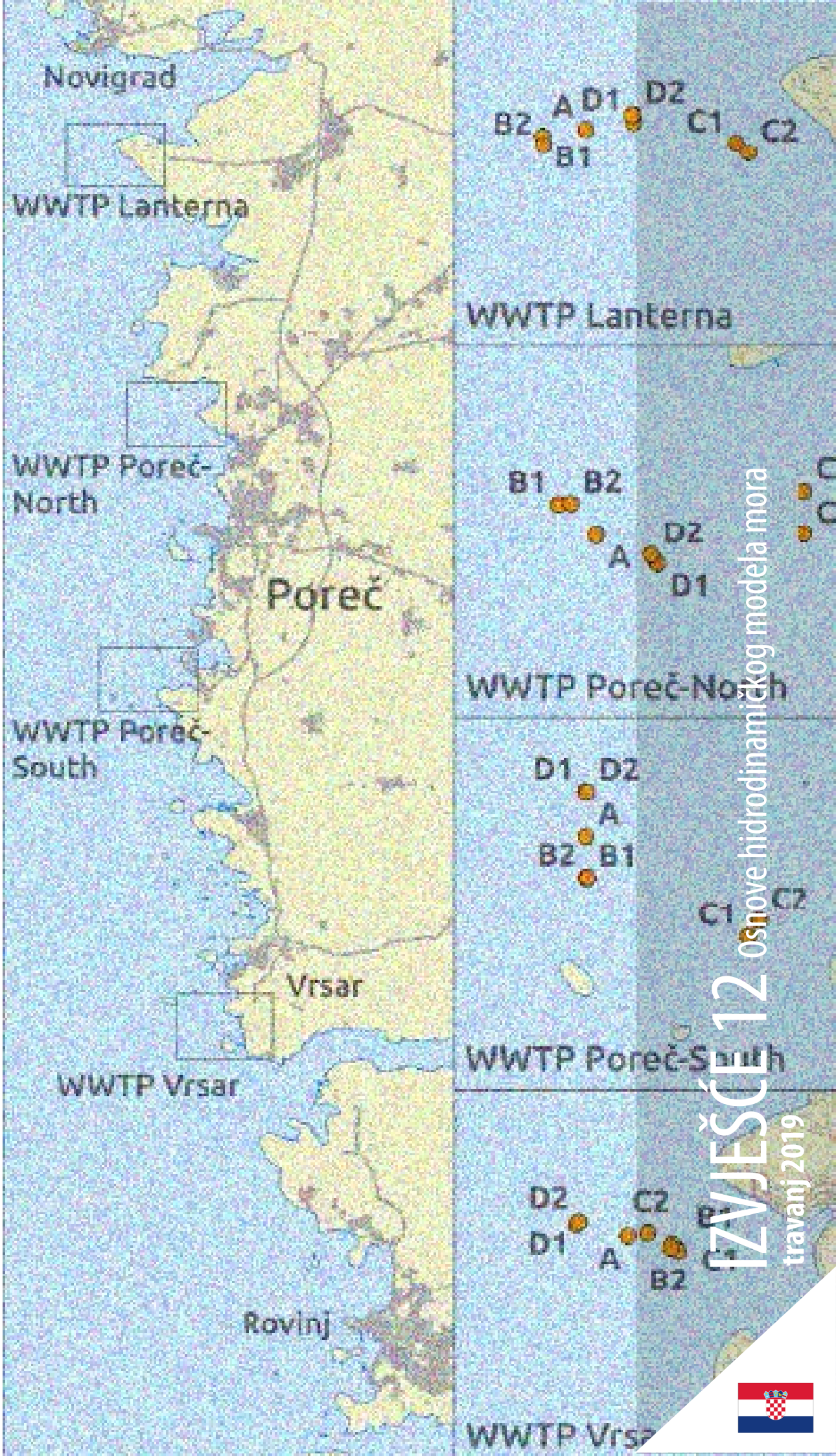
Naručitelj



Krajnji korisnik



STUDIJA OCJENE I PRAĆENJA UČINKOVITOSTI PROVEDBE PROJEKTA
IZGRADNJE KANALIZACIJSKE MREŽE I ANALIZA UČINKOVITOSTI RADA UREĐAJA
ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U GRADU POREČU – STUDIJA POREČ



12 Osnove hidrodinamičkog modela mora
IZVJEŠĆE
travanj 2019



STUDIJA OCJENE I PRAĆENJA UČINKOVITOSTI PROVEDBE PROJEKTA IZGRADNJE
KANALIZACIJSKE MREŽE I ANALIZA UČINKOVITOSTI RADA UREĐAJA ZA
PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U GRADU POREČU – **STUDIJA POREČ**

IZVJEŠĆE 12

OSNOVE HIDRODINAMIČKOG MODELA MORA

Travanj 2019

Zajednica izvršitelja



Naručitelj



Krajnji korisnik



STUDIJA OCJENE I PRAĆENJA UČINKOVITOSTI PROVEDBE PROJEKTA IZGRADNJE
KANALIZACIJSKE MREŽE I ANALIZA UČINKOVITOSTI RADA UREĐAJA ZA
PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U GRADU POREČU – **STUDIJA POREČ**

IZVJEŠĆE 12

OSNOVE HIDRODINAMIČKOG MODELA MORA

31. ožujka 2019

mr.sc. Božidar Deduš, dipl. ing.
Ovlaštenik Zajednice izvršitelja
Proning DHI d.o.o.

31. ožujka 2019


United Nations
Institute for
Water Education
under the auspices
of UNESCO
IHE Delft
prof. dr. sc. Darsin Brdjanovic, dipl. ing.
Voditelj stručnog tima
IHE Delft



REPORT

HRVATSKE VODE

Modeliranje kakvoće mora u Istri

Postavke hidrodinamičkog modela

30. ožujka 2019. - verzija 2.0





International Marine & Dredging Consultants

Bilješka izdavača

International Marine & Dredging Consultants

Adresa: Van Immerseelstraat 66, 2018 Antwerp, Belgija

: + 32 3 270 92 95

: + 32 3 235 67 11

Adresa e-pošte: info@imdc.be

Web stranica: www.imdc.be

Oznaka dokumenta

Naslov	Postavke hidrodinamičkog modela
Projekt	Modeliranje kakvoće mora u Istri
Klijent	HRVATSKE VODE -
Natječaj	OP 2015/227
Ref. dokumenta	I/RA/12142/18.174/VBA/
Naziv dokumenta	K:\PROJECTS\12\12142_P009187 - Sea Water Quality Modelling Istria\10-Rap\DO- 1\RA18174_Hydrodynamic_Model_Setup\RA18174_Hydrodynamicm odelsetup_v2.0.docx

Revizija

Verzija	Datum	Opis	Autor	Provjerio	Odobrio
1.0	16/11/2018	Koncept: prva verzija	ABR, DVV, VBA	GVH	VBA
2.0	10/04/2018	Druga verzija uključujući model srednjeg polja	ABR, RKU	VBA	BDC

Odobrenje

Autor	RKU	Rohit Kulkarni (Potpis)	Digitalno potpisao Rohit Kulkarni (Potpis) Datum: 10.04.2019. 09:19:54 +02'00'
Provjerio	VBA	Bart Verheyen (Potpis)	Digitalno potpisao Bart Verheyen (Potpis) Datum: 10.04.2019. 09:33:04 +02'00'
Odobrio	BDC	Boudewijn Decrop (Potpis)	Digitalno potpisao Boudewijn Decrop (Potpis) Datum: 10.04.2019. 09:24:24 +02'00'

Kontakt unutar IMDC-a

Ime i prezime	Bart Verheyen
Broj telefona	+32 3 270 92 95
e-pošta	vba@imdc.be

Popis za slanje

	Papirnati primjerak
1	Pdf Damir Brdjanovic (IHE-UNESCO)

Sažetak

Ovo izvješće dio je studije o modeliranju kakvoće mora za disperziju kanalizacijskih otpadnih voda (fekalne bakterije) duž istarske obale te se ističe metodologija i pristup modelu koji se koristi u ovoj studiji zajedno s postavkama modela za dalekometno polje (*far field model*) Jadranskog modela i za srednje polje (*mid field*) obalnog modela.

Sadržaj

1. UVOD.....	8
1.1 ZADATAK.....	8
1.2 OPSEG IZVJEŠĆA	8
1.3 SMJERNICE ZA ČITANJE	8
2. PRISTUP MODELU.....	10
2.1 UVOD.....	10
2.2 PRISTUP MODELU	11
2.3 RELEVANTNI PROCESI	13
2.3.1 <i>Transportni procesi</i>	13
2.3.2 <i>Sezonske varijacije</i>	14
2.3.3 <i>Početno miješanje i 3D procesi</i>	14
2.3.4 <i>Stopa raspada</i>	15
2.3.5 <i>Izgled modela</i>	15
2.4 SOFTVER	16
2.5 SCENARIJI.....	17
3. POSTAVKE MODELA DALEKOMETNOG POLJA	18
3.1 UVOD.....	18
3.2 SISTEMATIZACIJA MREŽE	18
3.2.1 <i>Domena modela</i>	18
3.2.2 <i>Vertikalna mreža</i>	19
3.3 BATIMETRIJA.....	20
3.4 GRANIČNI UVJETI	21
3.5 POČETNI UVJETI.....	22
3.6 METEOROLOŠKE SILE	22
3.7 NUMERIČKI I FIZIKALNI PARAMETRI.....	22
3.7.1 <i>Pregled postavki modela</i>	22
3.7.2 <i>Model turbulencije</i>	23
3.7.3 <i>Model atmosferske promjene</i>	24
4. OBALNI MODEL POLJA SREDNJEG DOMETA	25
4.1 UVOD.....	25
4.2 SISTEMATIZACIJA MREŽE	25
4.2.1 <i>Domena modela</i>	25
4.2.2 <i>Vertikalna mreža</i>	27
4.3 BATIMETRIJA.....	28
4.4 GRANIČNI UVJETI	30
4.5 POČETNI UVJETI.....	30

4.6	METEOROLOŠKE SILE	30
4.7	NUMERIČKI I FIZIKALNI PARAMETRI	30
4.7.1	<i>Pregled postavki modela</i>	30
4.7.2	<i>Model turbulencije</i>	31
4.7.3	<i>Model atmosferske promjene</i>	31
5.	ZAKLJUČCI	33
6.	LITERATURA	34

Prilozi

PRILOG A	POVEZIVANJE TELEMACA-3D S OPĆIM MODELOM OCEANSKIH TURBULENCIJA (GOTM)	25
----------	--	----

Popis tablica

TABLICA 3-1 POSTAVKE FIZIKALNOG MODELA ZA MODEL JADRANSKOG MORA	22
TABLICA 3-2 POSTAVKE NUMERIČKOG MODELA ZA MODEL JADRANSKOG MORA	23
TABLICA 4-1 POSTAVKE FIZIKALNOG MODELA ZA OBALNI MODEL	30
TABLICA 4-2 POSTAVKE NUMERIČKOG MODELA ZA OBALNI MODEL	31

Popis slika

SLIKA 2-1: PODRUČJE ISTRAŽIVANJA, LOKACIJE ISPUSTA (CRNI KRUGOVI) I UREĐAJI ZA PROČIŠĆAVANJE (ZELENI KRUGOVI)	10
SLIKA 2-2: GLAVNE PLAŽE U ISTRAŽIVANOM PODRUČJU.....	11
SLIKA 2-3: PREGLED RAZLIČITIH KORAKA U PRISTUPU MODELU	11
SLIKA 2-4: PREGLED PRISTUPA S TIJEKOM MODELA S RAZLIČITIM NUMERIČKIM MODELIMA ZA PROCJENU KVALITETE VODE. OVO IZVJEŠĆE OBUHVAĆA POSTAVKE HIDRODINAMIČKOG MODELA ZA DALEKOMETNO POLJE JADRANSKOG MORA I SREDNJEG POLJA OBALNOG MODELA	12
SLIKA 2-5 RAČUNALNI ELEMENT U SOFTVERU TELEMAC-3D, S LOKACIJOM RAČUNALNIH INFORMACIJA OZNAČENIH PLAVIM TOČKAMA	16
SLIKA 3-1 – IZGLED MREŽE JADRANSKOG MODELA	18
SLIKA 3-2 – DETALJ MREŽE NA ISTARSKOJ OBALI (RIJEKA PO NA ZAPADU, OTOCI KRK I CRES NA ISTOKU)	19
SLIKA 3-3 – MAPA BATIMETRIJSKOG MODELA	20
SLIKA 3-4: PREGLED MREŽE I BATIMETRIJE ZA CJELOKUPAN MODEL (GORE) I UVEĆANIH DIJELOVA PREMA SJEVERNOM DIJELU JADRANA (DOLJE LIJEVO) I ISTARSKOJ OBALI (DOLJE DESNO)	21
SLIKA 4-1 DOMENA MREŽE S IZVORIMA ISPUSTA	25
SLIKA 4-2 DOMENA MREŽE BLIZU LANTERNE	26
SLIKA 4-3 DOMENA MREŽE BLIZU POREČA	26
SLIKA 4-4 DOMENA MREŽE BLIZU VRSARA	27
SLIKA 4-5 DISTRIBUCIJA VERTIKALNOG SLOJA	27
SLIKA 4-6 REZULTATI BATIMETRIJSKOG ISTRAŽIVANJA (WGS84 ELIPSOID KAO VERTIKALNA REFERENCA) (OBALA, 2018.) KORIŠTENI ZA INTERPOLACIJU BATIMETRIJE DUŽ ISTARSKE OBALE	28
SLIKA 4-7 BATIMETRIJA INTERPOLIRANA PREKO DOMENE	29
SLIKA 4-8 BATIMETRIJA POKRAJ INTERESNOG PODRUČJA	29

1. UVOD

1.1 ZADATAK

U tijeku su velika ulaganja u javni sektor duž dijela istarske obale uključujući obnovu i proširenje postojećeg sustava odvodnje i izgradnju novih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u svrhu zaštite grada Poreča i okolice.

IMDC je dobio zadatak da provede modeliranje kakvoće mora za disperziju kanalizacijskih otpadnih voda (fekalnih bakterija) duž istarske obale u Hrvatskoj. Koristeći numeričke modele, istražena je sadašnja situacija kvalitete vode za kupanje kao i nakon instalacije uređaja za pročišćavanje. Studija je procijenila rizik od zagađenja bakterijom *E-coli* (EC) i crijevnim enterokokom (IE) (kao indikatora kvalitete vode za kupanje) na plažama i dodanu vrijednost uređaja za pročišćavanje da se smanji ovaj rizik. Studija se obavlja u sklopu cjelokupnog zadatka „Studija procjene i praćenje učinkovitosti provedbe projekta izgradnje kanalizacijske mreže i analiza učinkovitosti rada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u Poreču“ kojeg su izdale Hrvatske vode u okviru natječaja OP 2015/227. Radovi su povjereni konzorciju uključujući IMDC čiji je predstavnik PRONING DHI kao vodeći član prema ugovoru sklopljenom 19.07.2018., Klasa: 325-01/15-10/148, Reg. br.: 374-1-3-18-35. Konzorcijski sporazum sklopljen je 13.05.2016. i proširen je Dodatkom I. na dan 13.11.2018.

IMDC će doprinijeti isporuci sljedećih zahtijevanih stavki:

- Izvješće o postavkama hidrodinamičkog modela (ovo izvješće);
- Izvješće o kalibraciji i modeliranju postojećeg stanja hidrodinamičkog modela;
- Izvješće o kalibraciji i modeliranju postojećeg stanja za model kvalitete mora;
- Izvješće o utjecaju UPOV-a na kvalitetu vode za kupanje;
- Izvješće o utjecaju UPOV-a na kvalitetu vode za kupanje: provjera valjanosti modela;
- Izvješće o isporuci (primopredaji) modela i obuci.

1.2 OPSEG IZVJEŠĆA

Ovo izvješće opisuje postavke hidrodinamičkog modela. Kao prvo izvješće u studiji, ono predstavlja pristup modeliranju kvalitete vode i predstavlja postavke hidrodinamičkog modela za Jadranski model s dalekometnim poljem i lokalni model istarske obale (model srednjeg polja) koji se koristi za izučavanje sudbine i disperzije bakterija duž istarske obale.

1.3 SMJERNICE ZA ČITANJE

Opći opis metodologije s pristupom modelu i koji koraci će se poduzeti u studiji, dani su u 2. poglavlju.

U 3. i 4. poglavlju raspravit će se o hidrodinamičkim modelima koji će se koristiti u ovoj studiji.

Kao prvi korak, postavke modela dalekometnog polja Jadrana dane su u 3. poglavlju.

U 4. poglavlju raspravlja se o postavkama modela srednjeg polja za obalni model, koji će se koristiti za proučavanje disperzije i sudbine bakterija.

2. PRISTUP MODELU

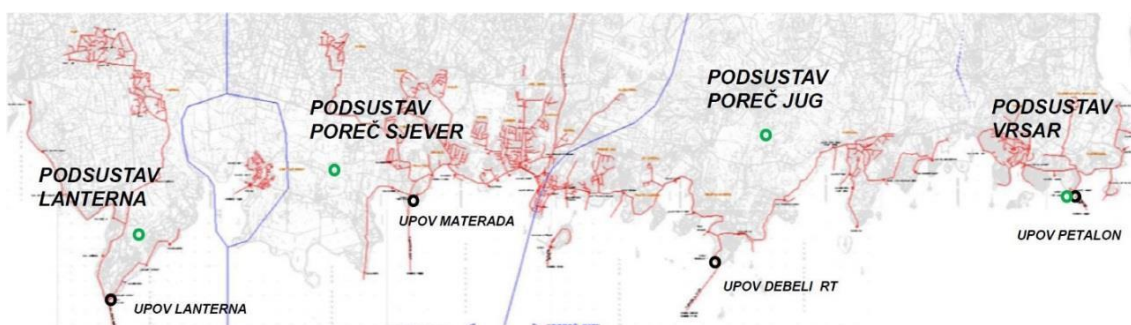
2.1 UVOD

U području obuhvaćenom projektom postoje četiri (glavna) mjesta ispusta (sekundarni ispust nalazi se sjeverno od Lanterne) gdje se otpadna voda ispušta u more (Slika 2-1). To stvara onečišćenje vodenog okoliša i zbog lokalnih hidrodinamičkih uvjeta (struje, plima i oseka, valovi), to onečišćenje se može proširiti na okolne plaže i utjecati na kvalitetu vode za kupanje (Slika 2-2).

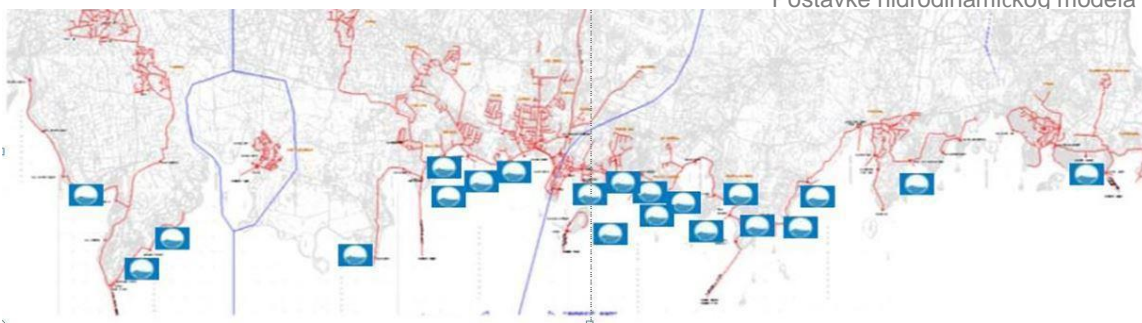
Temeljem europskih propisa hrvatska vlast dužna je kontrolirati kakvoću praćenjem dviju vrsta fekalnih bakterija kao indikatora kakvoće vode za kupanje: E-Coli (EC) i crijevnih enterokoka (IE). Rezultati su prezentirani na web stranici Ministarstva zaštite okoliša i energetike, Odjela za pomorstvo i zaštitu priobalja: http://baltazar.izor.hr/plazepub/kakvoca_detalji10.

Predviđena su četiri uređaja za pročišćavanje otpadnih voda uzvodno od ovih dvaju mjesta ispuštanja (Slika 2-1). U normalnim uvjetima oni će osigurati pročišćavanje. U posebnim uvjetima otpadna voda bi se ipak mogla ispuštati u more s mogućim utjecajem na kakvoću vode za kupanje.

Primjenom numeričkih modela mogu se predstaviti fizikalni procesi koji se odnose na disperziju otpadne vode iz ispusta na okolne plaže. Ovo omogućuje ispitivanje uzoraka transporta patogenih tvari u različitim uvjetima i procjenu rizika onečišćenja pokraj obližnjih plaža. U numeričkim modelima mogu se predstaviti postojeće stanje bez uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kao i situacija s ugrađenim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. To omogućuje procjenu i ocjenu valjanosti utjecaja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda na kakvoću vode za kupanje.



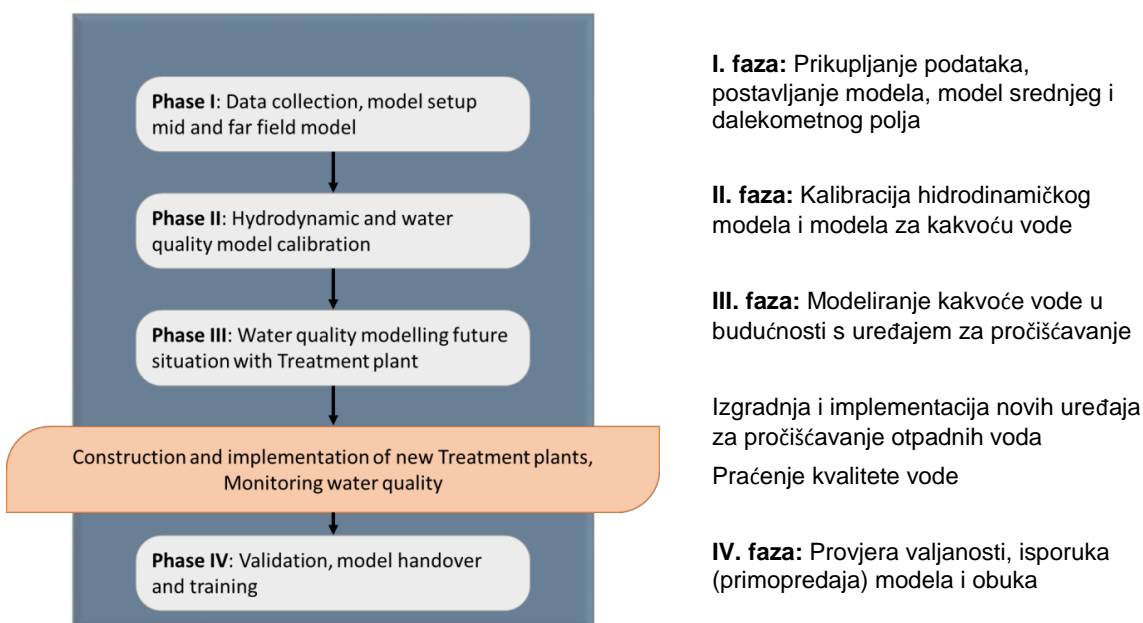
Slika 2-1: Područje istraživanja, lokacije ispusta (crni krugovi) i uređaji za pročišćavanje (zeleni krugovi).



Slika 2-2: Glavne plaže u istraživanom području.

2.2 PRISTUP MODELU

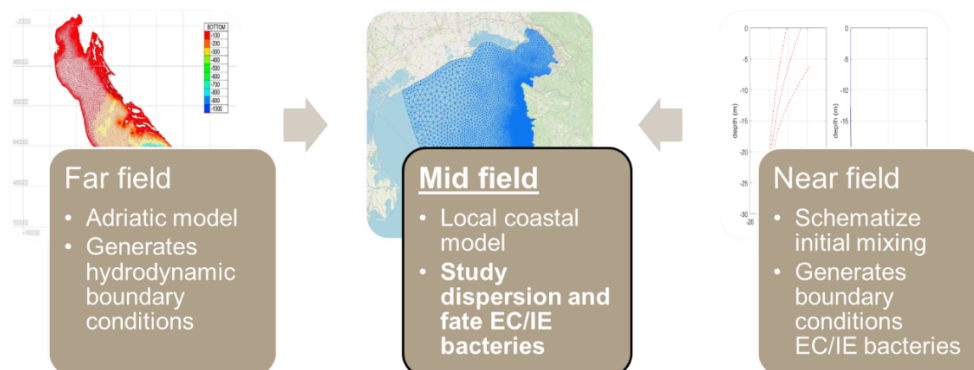
Ovaj odjeljak pruža opći pregled različitih koraka u pristupu modelu. Više detalja o fizikalnim procesima predstavljenih modela i najvažnijim aspektima za postavke te detaljnija rasprava nalaze se u sljedećem odjeljku 2.3.



Slika 2-3: Pregled različitih koraka u pristupu modelu.

Kakvoća vode za kupanje i dodana vrijednost uređaja za pročišćavanje otpadnih voda procjenjuje se primjenom numeričkih modela koji računaju disperziju i raspad *E-Coli* i IE za tipične ljetne i zimske uvjete. Korištenjem analitičkih i numeričkih modela izgrađenih pomoću softvera TELEMAC (vidi odjeljak 2.4), dobiva se prikaz relevantnih procesa koji se odnose na hidrodinamiku i kakvoću vode (vidi odjeljak 2.3). Slika 2-4 predstavlja tijek modela koji se koristi u ovoj studiji. Hidrodinamika i kvaliteta vode su modelirani unutar modela srednjeg polja za istarsku obalu. Ovaj model koristi se za simulaciju disperzije i sudbine bakterija u području projekta za procjenu utjecaja na kakvoću vode. Model srednjeg polja upravlja se pomoću dva druga modela: model dalekometnog polja Jadranskog mora i model bliskog polja. Hidrodinamički model dalekometnog polja obuhvaća Jadransko more i pruža hidrodinamičke granice za manji model srednjeg polja za istarsku obalu. Model bliskog polja predstavlja

analitički Lagrangian model koji omogućuje procjenu bliskog polja gdje se odvija miješanje otpadnih voda u moru. Ovo miješanje u bliskom polju se ne može predstaviti u modelu srednjeg polja. Rezultati ovog modela bliskog polja se stoga koriste kao ulazni podaci za kakvoću vode u obalnom modelu srednjeg polja. O modelu bliskog polja se dalje raspravlja u izvješću o kakvoći vode. Ovo se izvješće usredotočuje na postavke hidrodinamičkih modela dalekog i srednjeg polja.



Tekst slike: Dalekometno polje, – Jadranski model, - Generira hidrodinamičke granične uvjete; Srednje polje, – Lokalni obalni model, – **Studija o disperziji i sudbini EC/IE bakterija**; Blisko polje – Shematski prikaz početnog miješanja, - Generira granične uvjete za EC/IE bakterije)

Slika 2-4: Pregled pristupa s tijekom modela s različitim numeričkim modelima za procjenu kvalitete vode. Ovo izvješće obuhvaća postavke hidrodinamičkog modela za dalekometno polje Jadranskog mora i srednjeg polja obalnog modela

Kvaliteta modela uvelike ovisi o kvaliteti baza podataka koje se koriste za izgradnju ovih modela. Temeljem zahtjeva klijenta u ove svrhe ostvaruje se pristup globalnim i regionalnim bazama podataka te lokalnim podacima. Osim toga, u području obuhvaćenim ovim projektom obavljaju se i batimetrijska mjerenja, mjerenja morskih struja te kakvoće vode.

Kada se modeli budu postavljali, tek će tada postupkom kalibracije postojećeg stanja biti provjerena i osigurana adekvatnost modela hidrodinamičkog ponašanja i ponašanja disperzije s obzirom na kakvoću vode. Rezultati mjerenja protoka u ovom istraživanju bit će korišteni za hidrodinamičku kalibraciju. Model kakvoće vode bit će kalibriran na temelju rezultata mjerenja kakvoće vode koji će se tada provesti.

Nakon toga će se modeli koristiti za obavljanje izračuna scenarija. Scenariji će obuhvaćati sezonske varijacije, aktivnosti uređaja za pročišćavanje i buduća predviđanja. Rezultati ovih scenarija pokazat će utjecaj na kakvoću vode za kupanje.

Na temelju stečenih iskustava tijekom obavljanja ovog istraživanja, dat će se metodologija za operativni alat modela u svrhu predviđanja kakvoće vode za kupanje.

Konačno, nakon što se uređaji za pročišćavanje izgrade i implementiraju, implementirat će se nova postavka u hidrodinamičkom modelu i modelu za kakvoću vode, te će se obaviti provjera valjanosti na temelju novih mjerenja kakvoće vode. Na kraju će se isporučiti alat modela zajedno s obukom i postavkama.

2.3 RELEVANTNI PROCESI

U ovim odjeljcima raspravljaju se najrelevantniji procesi i aspekti koji će biti predstavljeni u hidrodinamičkom modelu i modelu za kakvoću vode. Općenito, to se sastoji od sljedećeg:

- Transportni procesi
- Sezonske varijacije
- Početno miješanje i 3D procesi
- Stopa raspada
- Izgled modela

2.3.1 Transportni procesi

Transport bakterije E-Coli i IE iz ispusta do plaža odvija se utjecajem struja u lokalnom obalnom sustavu. Postoje male **struje plime i oseke** u tom području koje model treba obuhvatiti, no te struje su uglavnom pod utjecajem vjetra. Stoga je važno ostvariti dobar prikaz lokalnog stanja vjetra. Zbog blizine planinskog područja, vjetrovi mogu djelovati nepredvidljivo i razlikovati se na lokalnoj razini te uzrokovati snažne lokalne nalete vjetra čak i po lijepom vremenu (Admiralty Pilot NP47).

U Jadranu su prisutna dva prevladavajuća vjetra: bura i jugo. Bura je naziv za hladan suh sjeverni do sjeveroistočni vjetar koji može puhati velikom snagom i uglavnom na Jadranu ima velik utjecaj tijekom zime i prijelaznih razdoblja. Bura je obično manje učestala i slabija ljeti, ali u relativno rijetkim slučajevima mogu se javiti kratka razdoblja olujne bure.

Bura je najčešća tijekom prosinca, siječnja i ožujka. Ljeti bura obično traje po nekoliko sati i vrlo rijetko dulje od jednog dana (Admiralty Pilot NP47).

Vjetar koji se u Hrvatskoj obično naziva jugo, naziv je za južni do jugoistočni vjetar iz Sjeverne Afrike koji donosi toplo i vlažno vrijeme na Jadransko more. Jugo može puhati u bilo koje doba godine, ali najčešće od ožujka do lipnja u Južnom Jadranu. Mogu se također javiti i olujni naleti juga, ali su manje opasni od bure. Toplo vrijeme koje dolazi uz jugo obično je popraćeno obilnom kišom. (Admiralty Pilot NP47).

Osim toga, tijekom dana se mogu zamijetiti sjeverozapadni vjetrovi tzv. maestral, koji uslijedi nakon blage bure tijekom noći.

Stoga se predlaže osloniti na **točan i detaljan skup podataka o ponašanju vjetra** za odabir reprezentativnih uvjeta vjetra koji upravljaju disperzijom i miješanjem bakterija E-Coli i IE. Ovdje su također uključene plima i oseka. Općenito se smatra da valovi ovdje imaju manji utjecaj. Ipak, oni mogu također imati ulogu u miješanju vode zbog povećanih turbulencija uslijed lomljenja valova i djelovanja sila trenja na dnu mora povezanih s oscilacijom kretanja valova uz morsko dno. Ispitat će se utjecaj valova na miješanje.

2.3.2 Sezonske varijacije

Baš kao što se i varijacije u uvjetima vjetra javljaju ovisno o sezoni, također postoje i varijacije u uvjetima mora (temperatura, salinitet i gustoća). Ove varijacije imaju utjecaj na način kako će se svježe ispuštena otpadna voda miješati i raspršivati unutar slane morske vode zbog činjenice da obje imaju različite gustoće.

Zimi se javljaju niže temperature morske vode i vode na ispustu. Ljeti su temperature vode i vode na ispustu više i mogu utjecati na uzgon čestica (*plume*) u ispuštenoj otpadnoj vodi.

Pored toga, tijekom ljeta se zamjećuju različite vertikalne distribucije u temperaturi morske vode. Atmosferske promjene su vrlo važne za modeliranje točne vertikalne distribucije temperature i saliniteta (za više detalja vidi odjeljak 3.7.2). Početkom ljeta vodeni stup je dobro izmiješan, dok krajem ljeta i početkom jeseni temperatura duž vodenog stupa postaje stratificirana. Tada nastaje gradijent gustoće koji može zarobiti otpadnu vodu i utjecati na vertikalnu i horizontalnu disperziju.

Za prikaz ovih vertikalnih distribucija u modelu, potreban je adekvatan model turbulencije kao što je opći model oceanskih turbulencija (GOTM) koji je detaljnije opisan u odjeljku 3.7.1. i Dodatku A. Gore opisani procesi javljaju se u velikom obimu na Jadranu. Stoga ih nije moguće prikazati na malom obalnom modelu. Potreban je **model s dugometnim poljem** koji generira reprezentativne granične uvjete i početne uvjete za lokalni model.

Također su razmotrene varijacije u karakteristikama otpadne vode. Opterećenje i protok unutar kanalizacijskog sustava i UPOV-a će varirati između zime (niske sezone) i ljeta (visoke sezone) budući da broj stanovništva znatno varira zbog turizma. Ovi aspekti se stoga razmatraju u **scenarijima koji su reprezentativni za zimske i ljetne uvjete**.

2.3.3 Početno miješanje i 3D procesi

Ispuštanje, miješanje i raspršivanje otpadnih voda složen je 3-dimenzionalni fenomen. Zbog velikih razlika u gustoći između otpadne vode i morske vode na mjestima ispusta i nehidrostatskih procesa, početno miješanje normalno nije dobro predstavljeno na modelima srednjeg i dalekometnog polja kao što je lokalni model ISTARSKA obale. Doista, za utjecaje bliskog polja treba se osloniti na **model polja kratkog dometa** kao što je CORMIX tip modeliranja ili Lagrangian modeliranje da se osigura adekvatnost ulaznih parametara modela na ispustu za detaljan model polja srednjeg dometa kakvoće vode za ISTARSKU obalu. Osim toga, potrebne su reprezentativni vremenski nizovi otpadne vode i koncentracije otpadne vode za točno predstavljanje graničnih uvjeta u modelima.

Također, za modeliranje s dalekometnim i srednjim poljem potrebno je da **3-dimenzionalni model** može uzeti u obzir vertikalnu strukturu polja struje na koju snažno utječe (lokalni) vjetar, u odnosu na uzgon čestica (*plume*). Ponovno, potreban je adekvatan model turbulencije (odjeljak 3.7.1 i Dodatak A). Budući da u okviru ove studije nije izvedivo povećavati razlučivost domene cjelokupnog modela na željenu razinu razlučivosti, broj odabranih plaža je povećan. Za te plaže je utvrđena detaljna batimetrija.

2.3.4 Stopa raspada

Za određivanje opsega i trajanja događaja zagađenja ključno je ispravno prikazati raspad patogena u odumiranju. Kada se izlože npr. ultraljubičastom svjetlu, patogeni polako umiru, čime se smanjuje rizik zagađenja plaže. Koncentracije patogena u vodenom stupu se smanjuju iz sljedećih razloga:

- Izloženost svjetlu (glavni uzrok);
- Povećana smrtnost u slanoj vodi (uočene su samo male promjene u salinitetu);
- Smanjena smrtnost u hladnijoj vodi (važna je sezonska stratifikacija);
- Mikroorganizmi koji su predatori;
- Uvjeti pomanjkanja hrane smanjuju stopu preživljavanja;
- Razrjeđivanje, taloženje.

Tipično 1 do 2 dana nakon događaja, zbog razrjeđivanja, taloženja i raspada, zagađenje neće biti značajno. Ipak, tijekom kontinuiranog ispuštanja otpadne vode, ovi procesi smanjuju primijećenu razinu patogena na plažama.

Obavit će se *in-situ* eksperimenti da se **ustanovi točan prikaz raspada**. U kontroliranom okolišu će se pratiti i analizirati koncentracije patogena izloženih temperaturi morske vode i sunčevu zračenju. Raspad E-Coli i IE će se nadzirati kao funkcija (sunčeva) svjetla, saliniteta i temperature vode (pH i hranjive tvari neće se razmatrati u ovoj fazi).

Za kalibraciju modela (kakvoća vode) obavit će se *in-situ* mjerenja u području oko difuzora i u kanalizacijskom sustavu (koncentracija ispusta).

2.3.5 Izgled modela

Konzorcij je 2010. godine proveo opsežnu studiju modeliranja uključujući INSTITUT IGH D.D., HRVATSKI HIDROGRAFSKI INSTITUT i SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - GRAĐEVINSKI FAKULTET. Ova je studija pružila vrijedan uvid u učinke dalekometnog polja ispuštene otpadne vode u sadašnjoj situaciji (na temelju prikupljenih podataka prije 2010.). Ovo istraživanje je pokazalo da se u sadašnjim uvjetima može uočiti povećana razina patogena na određenim plažama u blizini navedenih mjesta izljeva. Ovo zapažanje može biti potkrijepljeno ispitivanjima kakvoće vode za kupanje koja su provedena u okviru europskih propisa (vidi web stranicu http://baltazar.izor.hr/plazepub/kakvoca_detalji10). U ovom istraživanju su ocijenjeni rezultati za trenutačno stanje kao osnovica za izgradnju uređaja za pročišćavanje. Iz ovog razloga će također u model biti uključen **zadnji i finalni projekt uređaja za pročišćavanje** da se omogući modeliranje budućeg stanja. Nakon što se uređaji za pročišćavanje izgrade, obavljat će se nadzor i modeliranje da se utvrdi stvarna vrijednost instalacije uređaja za pročišćavanje.

Međutim, moraju se spomenuti neke primjedbe. Iako je domena modela korištena u studiji iz 2010. uključivala obalno područje, **rješenje modela na plažama** nije bilo dovoljno za donošenje detaljnih zaključaka o razinama patogena u vodi za kupanje. Stoga će se obaviti detaljnija promatranja na određenom broju najkritičnijih plaža. Detaljnim istraživanjem tih plaža, uključujući i praćenje prošlih događaja tijekom kojih su razine patogena bile previsoke, mogu se dobiti bolji zaključci o mehanizmima transporta, mogućim izvorima onečišćenja i trajanju te opsegu događaja onečišćenja.

2.4 SOFTVER

TELEMAC-MASCARET je integrirani softverski paket za uporabu u polju slobodnog protoka po površini. Budući da se ovaj softver koristi u kontekstu brojnih studija širom svijeta, postao je jedan od glavnih standarda u ovom području. TELEMAC-MASCARET-om upravlja konzorcij sljedećih ključnih organizacija: Artelia (bivši Sogreah, Francuska), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Njemačka), Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF, Francuska), Daresbury Laboratory (Ujedinjeno Kraljevstvo), Electricité de France R&D (EDF, Francuska) i HR Wallingford (Ujedinjeno Kraljevstvo).

Za ovo istraživanje koristio se TELEMAC-3D V7.2. TELEMAC-3D rješava trodimenzionalne jednačbe vezane uz plitku vodu korištenjem metode konačnih elemenata, u kombinaciji s jednačbom advekcijske-difuzije za indikatore kao što su salinitet i temperatura. Polje toka u softveru TELEMAC-3D je diskretizirano primjenom prizmatičnih elemenata s trokutastom bazom (Slika 2-5). Sve informacije (dubina, razina vode, brzine i količine indikatora) se određuju na kutnim čvorovima elementa (tzv. p1-p1 element).

TELEMAC-3D uključio je sljedeće fizikalne procese (Hervouet, 2007.):

- Trenje na dnu;
- Lateralno trenje;
- Utjecaj Coriolisove sile;
- Utjecaj temperature i/ili saliniteta na gustoću;
- Suha područja u računalnoj domeni: ravna linija koja se odnosi na plimu i oseku;
- Različiti modeli turbulencije, uzevši u obzir uzgon.



Slika 2-5 Računalni element u softveru TELEMAC-3D, s lokacijom računalnih informacija označenih plavim točkama.

Telemac ima sljedeće karakteristike u odnosu na numeričku shemu:

- Potpuna implicitna integracija u vremenu;
- Različite sheme advekcije (metoda karakteristika, MURD N-shema MURD PSI-shema);
- Različiti mehanizmi rješavanja matrice (konjugacija gradijenta, metoda minimalne pogreške, CGStab, GM- RES).

2.5 SCENARIJI

Na osnovu rasprava s klijentom (vidi cijelo Početno izvješće), određeni su scenariji koji su simulirani u ovoj studiji.

Dogovoreno je da se usredotoči na normalne radne uvjete kanalizacijskog sustava. To znači da se neće modelirati iznimni događaji začepjenja protoka (zbog jakih oborina). Treba napomenuti da je kanalizacijski sustav duž istarske obale uglavnom odvojen od sustava za ispuštanje oborinske vode. Samo u starim gradovima Poreču i Vrsaru oba sustava odvodnje idu paralelno jedan do drugoga i može doći do prelijevanja kanalizacije u sustav odvodnje kišnice. Ipak, ovo se jedva ikad događa pa je odlučeno da se zanemari ova mogućnost priljeva.

Svaka je crpna stanica opremljena izljevom u more u slučaju nužde. Opet, to se gotovo nikad ne koristi i smatra se da nije reprezentativno. U dogovoru s klijentom je odlučeno da se zanemari ovaj mogući izvor onečišćenja.

Marina i (rekreativni) navigacijski centar može biti još jedan izvor zagađenja koji treba uzeti u obzir. Međutim, strogi propisi zabranjuju ispuštanje štetnih tvari blizu obale i u području marine ljudi koriste odlagališta na kopnu. To se također može isključiti kao mogući izvor.

Poziva se na izvješće o utjecaju UPOV-a na kvalitetu vode za kupanje u svrhu daljnje rasprave o navedenim scenarijima.

3. POSTAVKE MODELA DALEKOMETNOG POLJA

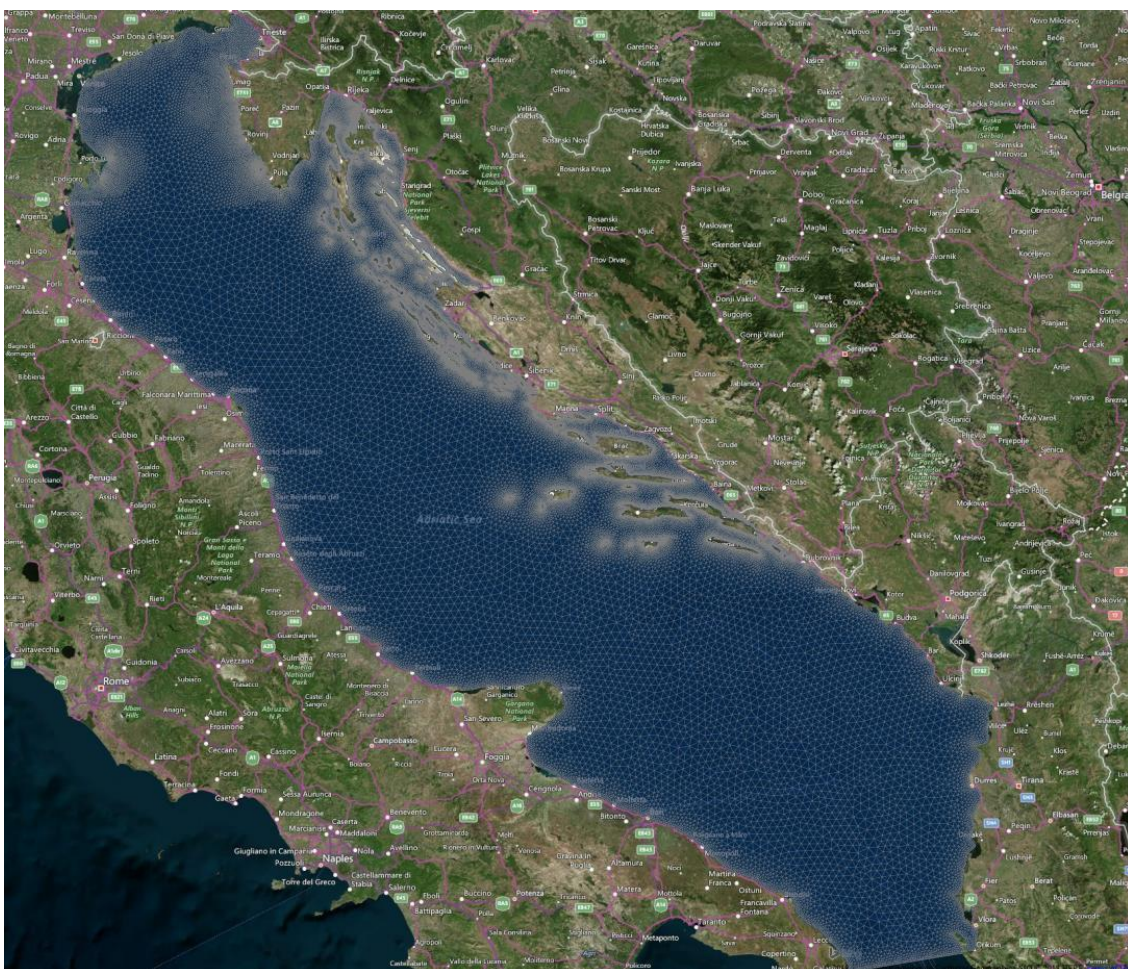
3.1 UVOD

Model dalekometnog polja potreban je za upravljanje detaljnim lokalnim modelom lokacije projekta. Modelom dalekometnog polja mogu se prikazati oni procesi koji se javljaju u većem opsegu, a za koje detaljan model nije prikladan. U sljedećim odjeljcima opisuju se postavke modela dalekometnog polja.

3.2 SISTEMATIZACIJA MREŽE

3.2.1 Domena modela

Jadranski model (vidi Sliku 3-1) je izgrađen u sfernoj Mercator projekciji.

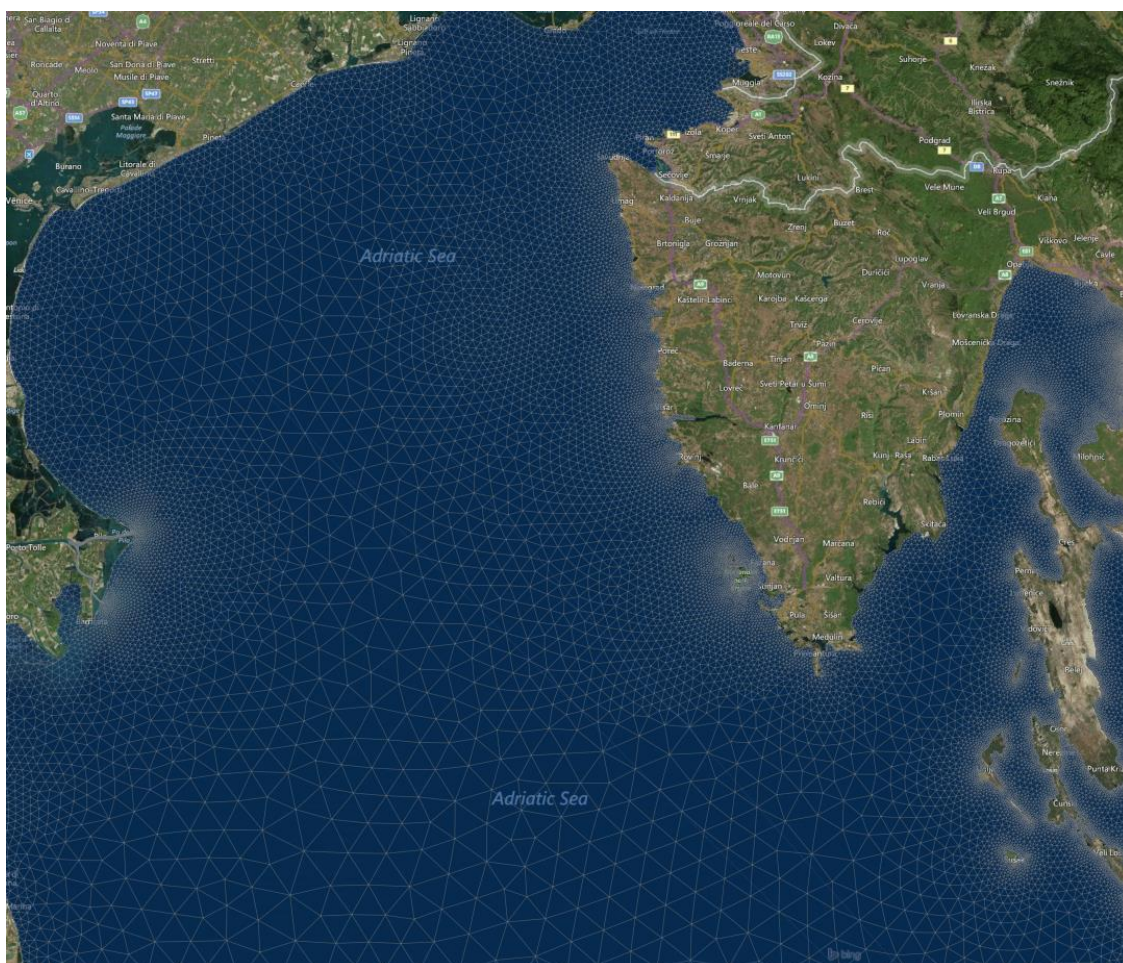


Slika 3-1 – Izgled mreže jadranskog modela.

Model se proteže od Otrantskih vrata na jugu do Venecijanskog zaljeva na sjeveru i obuhvaća zapadnu i istočnu obalu Italije uključujući rijeku Po, te na istoku obalnu liniju Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Albanije. Osim toga, obuhvaća širok raspon otoka i arhipelaga za koje su bila potrebna posebna ugađanja da se snimi njihova kompleksna geometrija.

Model mreže jadranskog modela sastoji se od 103 541 čvora u 2D mreži i 186 147 elemenata. Za vertikalnu diskretizaciju koristi se 25 slojeva, tako da u jadranskom modelu ima ukupno 2 588 525 čvorova i 4 653 675 elemenata.

Horizontalna razlučivost varira od 9600 do 30 m. Na istarskog obali razlučivost varira od oko 7000 m a dubini od 40 m do 300 do 600 m na obalnoj liniji. Detalj mreže istarske obale prikazuje Slika 3-2.



*Slika 3-2 – Detalj mreže na istarskoj obali
(Rijeka Po na zapadu, otoci Krk i Cres na istoku).*

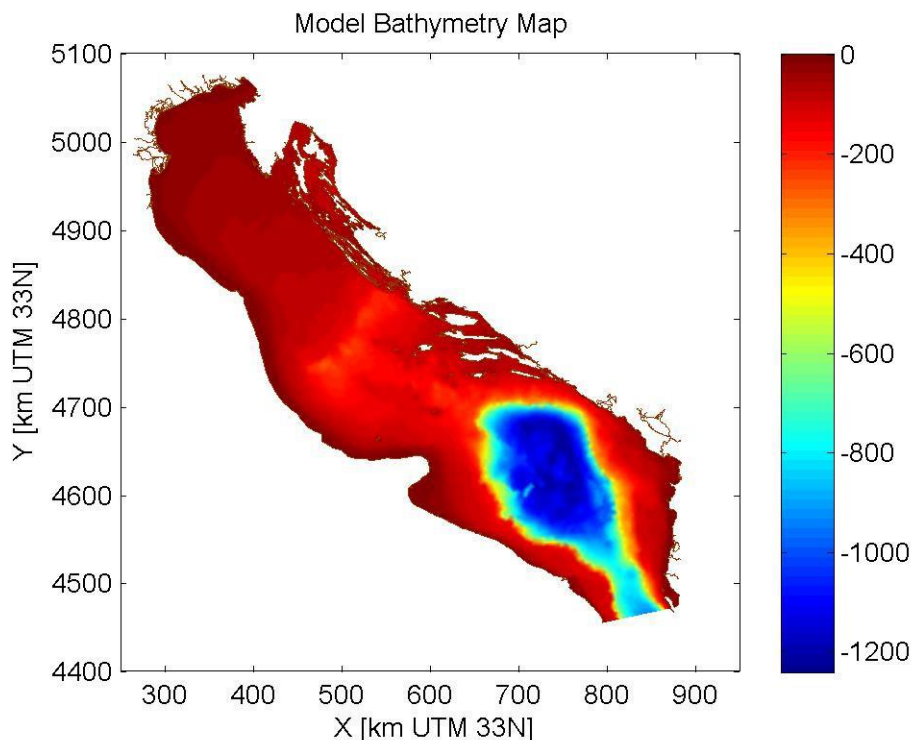
3.2.2 Vertikalna mreža

Za vertikalnu shematizaciju koriste se dvostruki sigma slojevi s ravninom razdvajanja na dubini od -15 m. Iznad i ispod ove ravnine koriste se sigma koordinate. Na ovaj način sigma koordinate ispod ravnine razdvajanja mogu glatko pratiti nepravilnosti na dnu, dok se su sigma koordinate iznad ravnine razdvajanja gotovo horizontalne, što osigurava da se manje

umjetnog miješanja uvodi u stratificirane slojeve (temperatura i salinitet). Broj vertikalnih slojeva je 20. Primijenjena su vertikalna ugađanja blizu površinskog sloja (da se bolje snime procesi izmjene koji se tamo odvijaju), kao i na dnu (da se riješi gradijent brzine blizu izvora na dnu).

3.3 BATIMETRIJA

Batimetrija jadranskog modela odnosi se na srednju razinu mora (*mean sea level* - MSL): Na Slici 3-3 prikazan je model batimetrijske mape. Korištena su dva skupa podataka za izradu batimetrije, tj. EMODnet i C-Map. Oba skupa podataka pokrivaju cjelokupan jadranski model, ali podaci iz EMODneta imaju mnogo višu razlučivost od onih iz C-Mapa.



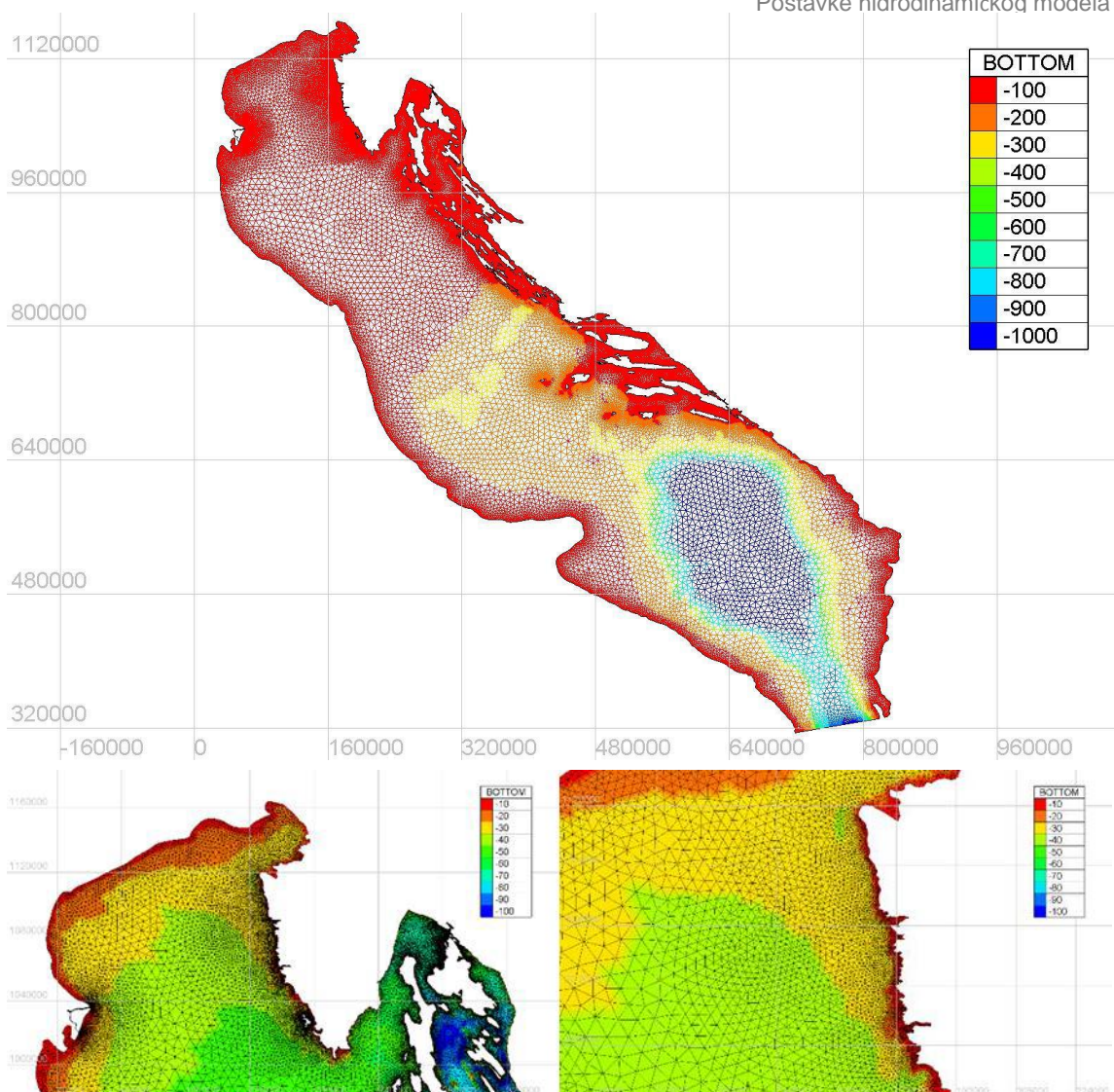
Slika 3-3 – Mapa batimetrijskog modela.

Referentna razina batimetrije iz C-Mapa predstavlja *chard podatak* (CD), ovi podaci su pretvoreni u prosječnu razinu mora uz pretpostavku da 0 m MSL odgovara 0,322 m CD temeljem preporuka s Geofizičkog odsjeka Sveučilišta u Zagrebu.

Najviša elevacija morskog dna bila je postavljena na -2,0 m MSL da se spriječi bilo kakav događaj suše/poplave u modelu.

Batimetrija jadranskog modela se dijeli na tri bazena, sjeverni koji je najplići i južni najdublji s maksimalnom dubinom od 1242 metra. Otranski prag, podvodni greben, nalazi se na granici između Jadrana i Jonskog mora.

Slika 3-4 prikazuje varijaciju u batimetriji u kombinaciji s razlučivošću mreže za cjelokupni model i nekoliko uvećanih dijelova.



Slika 3-4: Pregled mreže i batimetrije za cjelokupan model (gore) i uvećanih dijelova prema sjevernom dijelu Jadrana (dolje lijevo) i istarskoj obali (dolje desno).

SHORE je pripremio detaljniju batimetriju područja uz obalu u okviru ove studije (literatura). Ova se batimetrija koristi u ugrađenom detaljnom modelu istarske obale da se bolje predstavljaju najvažnije plaže.

3.4 GRANIČNI UVJETI

Jadransko more ima jedan granični uvjet na jugozapadnoj strani modela. Na ovoj strani su propisane razine vode i brzine, kao i temperatura i salinitet. Za razine vode uzeti su podaci razina vode iz MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013 NEMO modela (s razlučivošću od 0,042 stupnja) (Tonani i sur. 2011.). Ovi podaci pružaju polagane varijacije u razini vode zbog meteoroloških sila (s izlaznim intervalom svaki sat). Što se tiče brzine, temperature i saliniteta iz NEMO-a na granici, primijenjeni su vertikalni profili (s prostornom i vremenskom varijacijom) na granici.

Budući da NEMO nije uzeo u obzir plimu i oseku, dodane su vremenske promjene u razini vode iz OSU/TPXO V9 (Egbert i Erofeeva, 2002) (s horizontalnom razlučivošću od 1/30 stupnjeva) za razine vode na granici. Isto tako, brzina vezana uz plimu i oseku (pretpostavlja se da je konstantna s obzirom na dubinu) je dodana primijenjenom polju brzine na granici i unutar raspona pomaka.

3.5 POČETNI UVJETI

Početni uvjeti za razine vode, trodimenzionalno polje brzine, kao i polja temperature i saliniteta su preuzeti iz NEMO-a i zatim je obavljena interpolacija na mreži modela Jadranskog mora primjenom linearne interpolacije.

3.6 METEOROLOŠKE SILE

Meteorološke sile su preuzete iz ERA-5, koji se koristi za pogon NEMO-a. Ovi podaci imaju prostornu razlučivost od +/- 60 km i vremensku razlučivost po jedan sat. Prostorna i vremenski promjenjiva polja brzine vjetra (na visini od 10 m), tlak zraka (na razini površine) se koriste za izravan pogon hidrodinamike. Za modeliranje temperature vode, dodatno se u model unose podaci o temperaturi zraka.

3.7 NUMERIČKI I FIZIKALNI PARAMETRI

3.7.1 Pregled postavki modela

TELEMAC-3D model rješava trodimenzionalne jednadžbe za plitku vodu za određivanje razine vode i brzine. Advekcijsko-difuzijske formule se rješavaju za salinitet i temperaturu. Utjecaj saliniteta i temperature (u obliku varijacija gustoće) se povezuje s protokom u obliku gradijenta barokliničkog tlaka kao i snižavanja turbulencija uslijed stratifikacije. Postavke fizikalnog modela prikazane su u Tablici 3-1. Postavke numeričkog modela prikazane su u Tablici 3-2.

Tablica 3-1 Postavke fizikalnog modela za model Jadranskog mora.

Parametar	Postavka	Komentari
Hrapavost podloge (dna)	Nikuradseova jednadžba	Koeficijent konstante hrapavosti koristi se u ovoj domeni
Model horizontalne turbulencije	Smagorinky + konstantna pozadinska vrijednost	Koristi se jedino za moment sile. Bez horizontalne difuzije za skalarnu količinu kao temperatura i salinitet da se ograniči lažno miješanje.
Model vertikalne turbulencije	GOTM	Vidi odjeljak 3.7.2
Coriolisova sila	Prostorna varijacija	
Sila koja utječe na plimu/oseku	Uključeno	

Parametar	Postavka	Komentari
Jednadžba stanja	Jednadžba stanja s 25 parametara (Jackett <i>i sur.</i> , 2006)	Uzima u obzir varijaciju u temperaturi, salinitetu
Koeficijent povlačenja vjetra	(Flather, 1976)	Funkcija brzine vjetra
Koeficijent atmosferske izmjene	Pojednostavljen model izmjene baziran na temperaturnoj razlici između zraka i površine mora.	

Tablica 3-2 Postavke numeričkog modela za model Jadranskog mora.

Parametar	Postavka	Komentari
Advekcijaska shema za moment sile	Karakteristična metoda	
Advekcijaska shema za skalare	NERBS shema	
Rješavanje matrice	GMRES	
Filtar za hidrostatske neujednačenosti	Uključeno	
Suša/poplava	Isključeno	Plitka područja nisu uključena u model Jadranskog mora
Nehidrostatski model	Isključeno	Nehidrostatski modeli potrebni su samo u slučaju očekivanih velikih vertikalnih akceleracija, što nije slučaj za model Jadranskog mora
Nagomilavanje mase za dubinu vode	1,0	
Kompatibilnost gradijenta slobodne površine	0,9	

3.7.2 Model turbulencije

Opći model oceanskih turbulencija (GOTM) je *open-source* model zajednice za hidrodinamiku i procese miješanja turbulencije na obalama, oceanima i jezerima i može se pokrenuti kao samostalan mod ili u kombinaciji s 3D cirkulacijskim modelom. Filozofija u pozadini GOTM-a je izraditi različite modele turbulencije dostupne u jedinstvenom kodu koji se može koristiti više puta, stvoriti okoliš jednostavan za korisnika za primjenu modela turbulencije za oceanska istraživanja, kao i alat za kasniji razvoj shema turbulencije. Kod samostalnog načina rada, GOTM rješava jednodimenzionalne vertikalne (1DV) transportne jednadžbe momenta sile, soli i topline, kao i procese turbulentnog miješanja ovih varijabli. U srcu GOTM-a nalazi se biblioteka nekoliko modela zatvaranja (*closure*) turbulencija za parametrizaciju vertikalnih turbulentnih tokova momenta sile, topline i indikatora (*tracers*), uključujući energetske modele, modele s dvije jednadžbe kao što je k- ϵ shema zatvaranja, k- ω zatvaranje, Mellor-Yamadina

shema zatvaranja, Algebarski modeli naprezanja i parametrizacija K-profila. Implementacija sheme k- ϵ zatvaranja i k- ω zatvaranja u GOTM-u temelji se na jednadžbi mjerila s generičkom duljinom (Umlauf i Burchard, 2003). GOTM je povezan s nekoliko modela oceanskog kruženja uključujući GETM, MIT-gcm, FVCOM, SLIM-3D.

Zbog potrebe za dobrim modelom turbulencije kao osnove za ispravno modeliranje vertikalne stratifikacije i miješanja u Jadranskom moru, GOTM je povezan sa softverom TELEMAC-3D na način da se svi različiti modeli turbulencije iz GOTM-a mogu koristiti u modelu. Ovo povezivanje je izvedeno i temeljito testirano u IMDC-u s različitim teorijskim slučajevima testiranja. Istraživanje je predstavljeno na XXV. konferenciji korisnika Telemaca (*Lanckriet i sur.*, 2018). Ovaj rad se također može pronaći u Dodatku A.

Za model Jadranskog mora odabran je k-epsilon model s modelom algebarskog zatvaranja drugog reda za stratifikaciju tokova. Ovaj model ima snažno fizikalno uporište temeljeno na teoriji turbulencije i općenito dobro funkcionira u stratificiranim uvjetima (Umlauf i Burchard, 2005).

3.7.3 Model atmosferske promjene

Atmosferska promjena važna je za modeliranje ispravne vertikalne distribucije gustoće vode. Ovi modeli promjene (izmjene) su uključeni u modul kakvoće vode u TELEMAC-u, tzv. WAQTEL.

Da bi se izračunala temperaturna varijacija duž vodenog stupa, primijenjen je pojednostavljeni model izmjene temperature baziran na Sweersovoj jednadžbi (1976.).

4. OBALNI MODEL POLJA SREDNJEG DOMETA

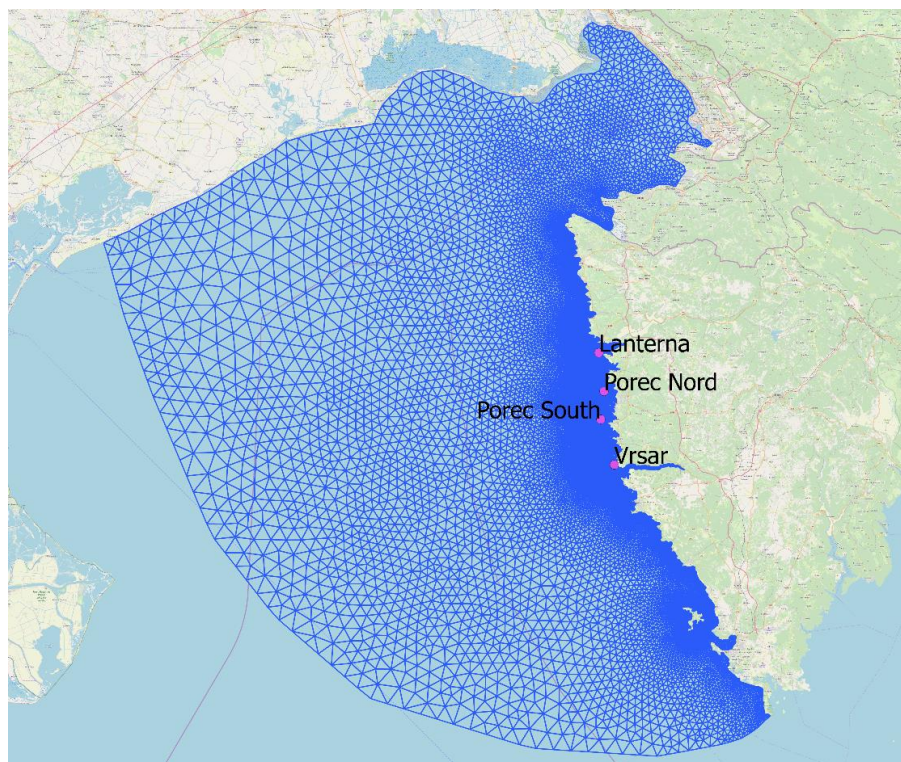
4.1 Uvod

Za razumijevanje disperzije čestica fekalnih bakterija uz obalu, potrebno je riješiti hidrodinamiku u području s dovoljnom točnošću oko mjesta istjecanja i pokraj plaža. Model dalekometnog polja Jadranskog mora je previše grub za to. Stoga je razvijen obalni model polja srednjeg dometa s većom razlučivosti duž obale od Jadranskog modela dalekometnog polja.

4.2 SISTEMATIZACIJA MREŽE

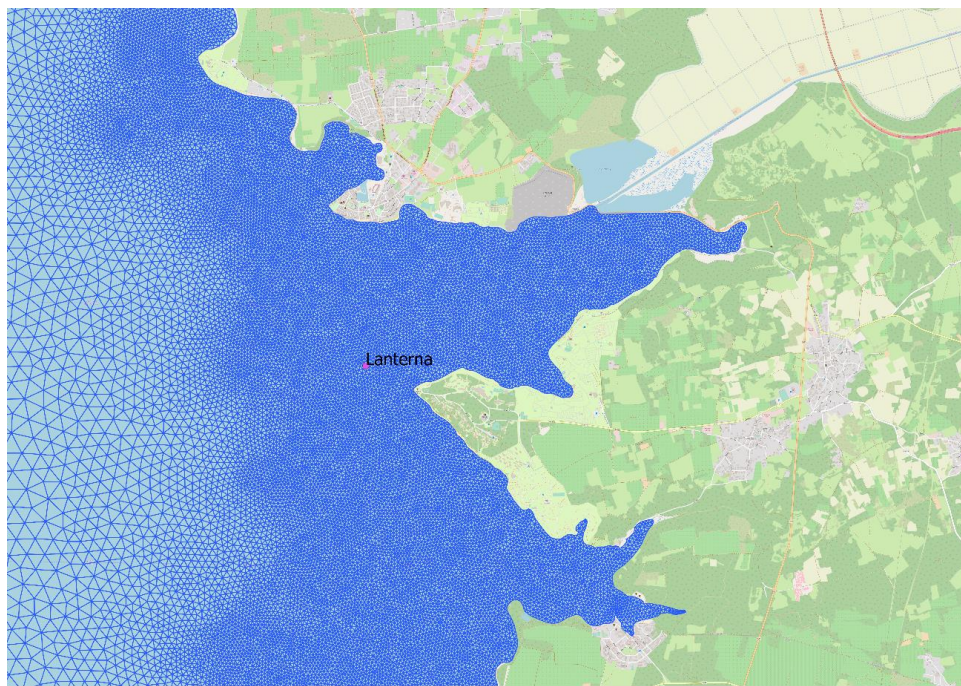
4.2.1 Domena modela

Model je izgrađen u sfernoj Mercator projekciji. Razlučivost modela varira od 4 km pokraj granice za obalni model do 50 m pokraj interesnog područja. Razlučivost je također ograničena na 100 m na udaljenosti od 5 km od izvora ispuštanja duž obale. Mreža obuhvaća manje otoke duže istarske obale koji mogu utjecati na uzorak lokalnog protoka. Domena modela sastoji se od 97000 čvorišta. Više od polovice čvorišta se može pronaći pokraj izvora ispuštanja otpadnih voda diljem obale i u području interesa (Slika 4-1). Mreža je postavljen prema standardnim kriterijima kvalitete. Maksimalne kosine elemenata mreže domene također su ograničene na 0,6.

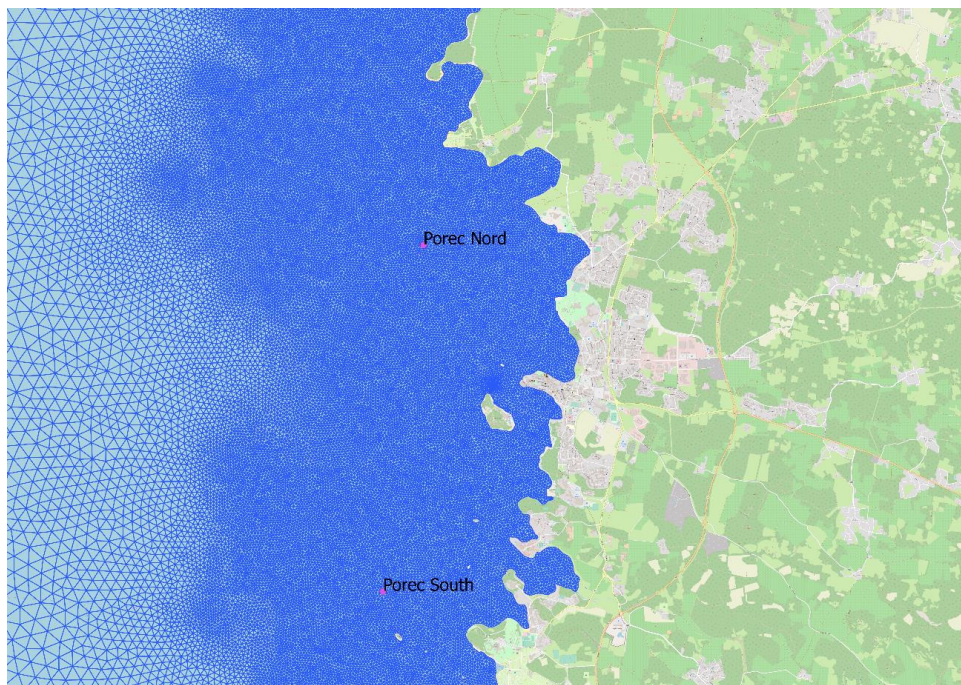


Slika 4-1: Domena mreže s izvorima ispusta

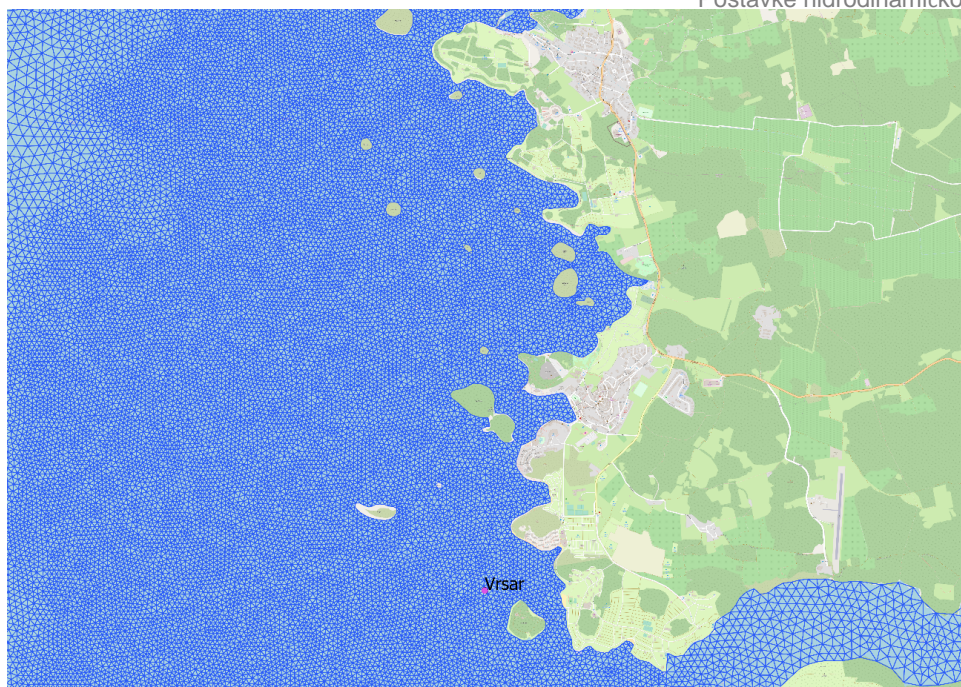
Domena mreže za obalni model polja srednjeg dometa proteže se do Tršćanskog zaljeva na sjeveru i dalje se proteže do Venecije na zapadu. Detalji o razlučivosti blizu izvora ispusta prikazani su na slikama 4-2 do 4-4.



Slika 4-2: Domena mreže blizu Lanterne



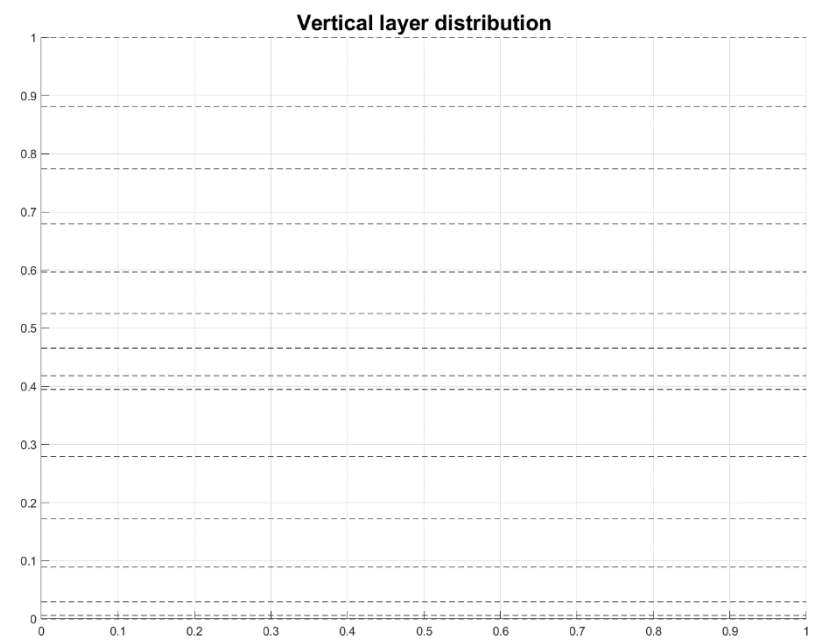
Slika 4-3: Domena mreže blizu Poreča



Slika 4-4: Domena mreže blizu Vrsara

4.2.2 Vertikalna mreža

Domena modela je podijeljena na 15 vertikalnih slojeva da se dobije prikaz ispusta s dna. Broj slojeva je smanjen s 20 slojeva Jadranskog modela na 15 slojeva jer se na ovaj način ostvarila ušteda u vremenu izračuna uz male gubitke u razlučivosti. Slika 4-5 prikazuje vertikalnu distribuciju domene modela. Razlučivost blizu dna i u sredini se održava na visokoj razini da se dobije detaljan prikaz ispusta i vertikalna advekcija čestica te da se dobije snimak stratifikacijskog učinka.

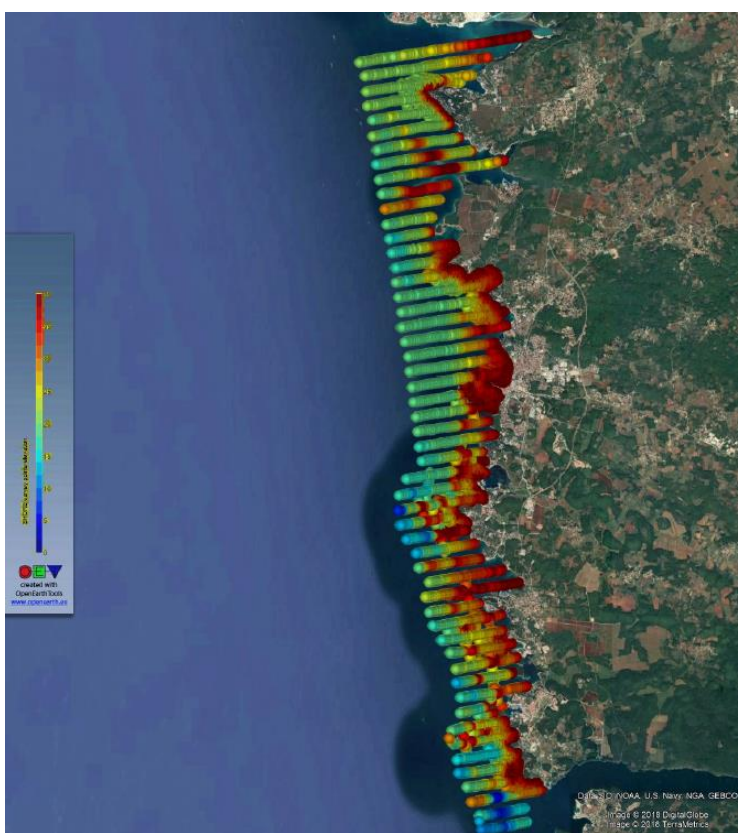


Slika 4-5: Distribucija vertikalnog sloja

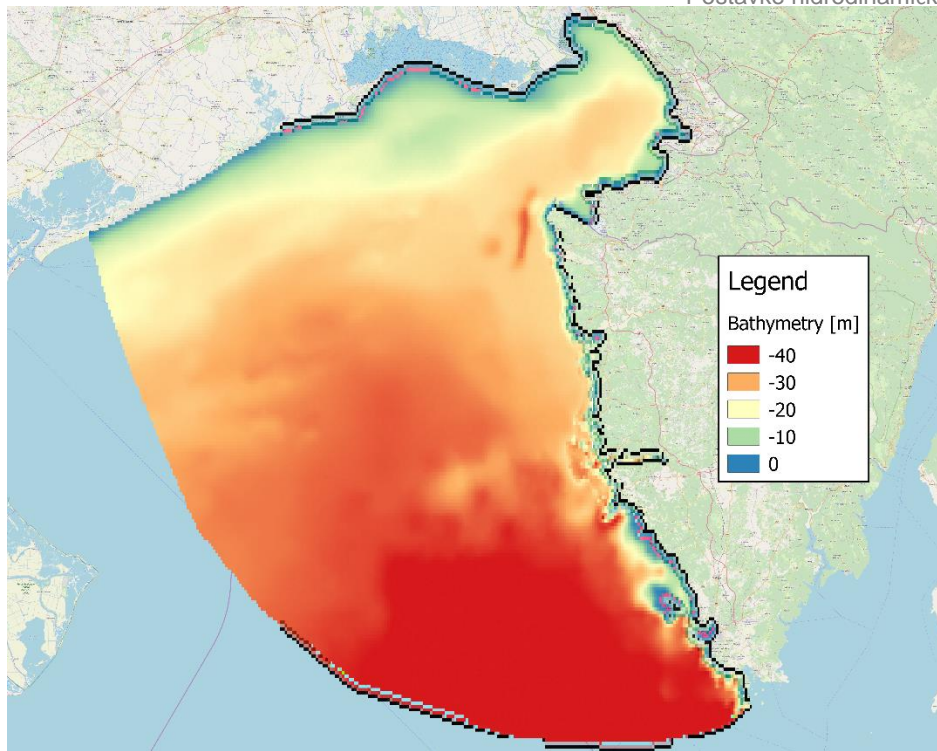
4.3 BATIMETRIJA

Za batimetriju interesnog područja dostupna su detaljna mjerenja zahvaljujući obavljenoj batimetrijskoj studiji (SHORE, 2018.) duž obale (Slika 4-6). Ovi podaci su isporučeni uz pozivanje na WGS84 elipsoid i stoga su konvertirani u MSL na bazi konverzije u EGM96 geoid. Za ostatak domene koristi se kombinacija batimetrijskih podataka iz C-Map-a i EmodNET-a. MSL je uzeta kao vertikalna referenca batimetrije. Slika 4-7 prikazuje batimetrijske podatke interpolirane na mreži, a Slika 4-8 prikazuje batimetriju pokraj interesnog područja.

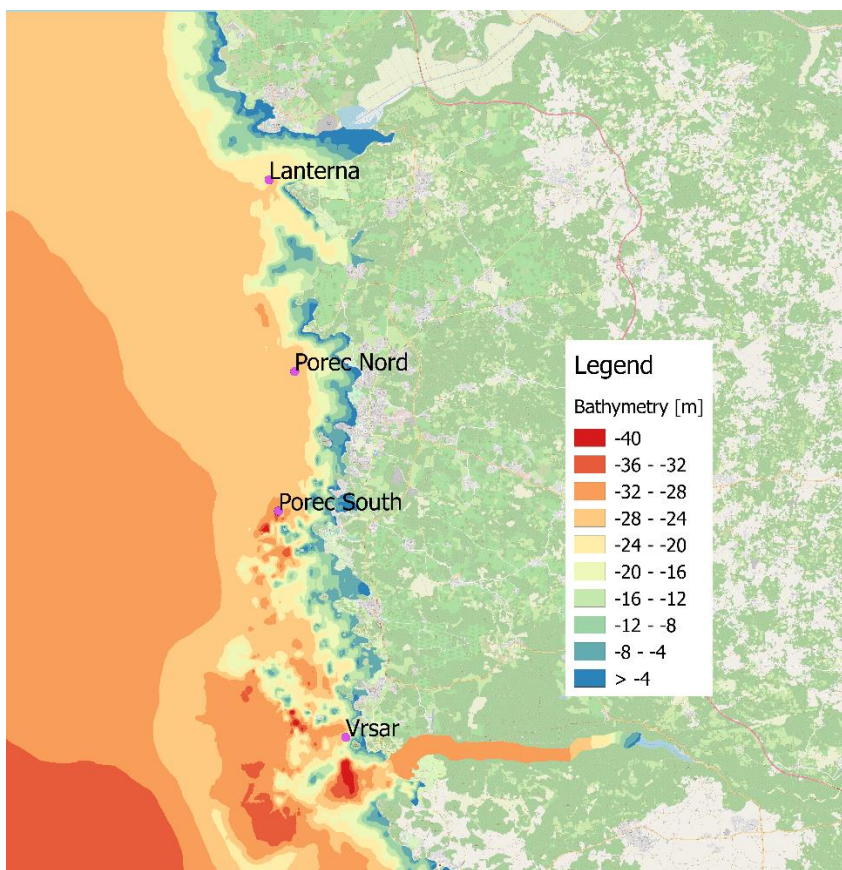
Maksimalna dubina nalazi se na južnom dijelu domene modela na dubini oko 50 m (MSL). Limski fjord također je uzet u obzir s batimetrijskim podacima koji pokazuju dubinu od 30 m (MSL) koji pokraj ušća rijeke postaje plići do 5 m (MSL) na uzvodnom kraju. Male skupine otočića izvan obale su razmatrane u domeni mreže kada su bile blizu izvora ispusta, a ostali otoci su izravno uključeni u batimetriju.



Slika 4-6: Rezultati batimetrijskog istraživanja (WGS84 elipsoid kao vertikalna referenca) (obala, 2018.) korišteni za interpolaciju batimetrije duž istarske obale.



Slika 4-7: Batimetrija interpolirana preko domene



Slika 4-8: Batimetrija pokraj interesnog područja

4.4 GRANIČNI UVJETI

Obalni model s poljem srednjeg dometa proteže se graničnim područjem izvan obale gdje su varijacije u razini vode, brzini, temperaturi i salinitetu izračunate pomoću Jadranskog modela. Podaci o varijablama su preneseni u puni 3D iz graničnih čvorovima modela s dugometnim poljem na obalni model. Podaci o silama primijenjeni su na visoku vremensku razlučivost od 10 minuta.

4.5 POČETNI UVJETI

Početni prostorni uvjeti za ovaj model primijenjeni su u obliku informacija o razini vode i brzini. Temperatura i salinitet su također interpolacijom uzeti iz 3D rezultata Jadranskog modela i primijenjeni na cjelokupnu domenu obalnog modela polja srednjeg dometa.

4.6 METEOROLOŠKE SILE

Slično kao i kod Jadranskog modela, meteorološke sile su preuzete iz ERA-5, koji se koristi za pogon NEMO-a. Ovi podaci imaju prostornu razlučivost od +/- 60 km i vremensku razlučivost po jedan sat. Prostorna i vremenski promjenjiva polja brzine vjetera (na visini od 10 m), tlak zraka (na razini površine) se koriste za izravan pogon hidrodinamike. Za modeliranje temperature vode, dodatno se u model unose podaci o temperaturi zraka.

4.7 NUMERIČKI I FIZIKALNI PARAMETRI

Numerički i fizikalni parametri za obalni model s poljem srednjeg dometa održavaju se, kad god je to moguće, na sličnoj razini postavki koje se koriste za Jadranski model.

4.7.1 Pregled postavki modela

TELEMAC-3D model rješava trodimenzionalne jednadžbe za plitku vodu za određivanje razine vode i brzine. Advekcijsko-difuzijske formule se rješavaju za salinitet i temperaturu. Utjecaj saliniteta i temperature (u obliku varijacija gustoće) se povezuje s protokom u obliku gradijenta barokliničkog tlaka kao i snižavanja turbulencija uslijed stratifikacije. Postavke fizikalnog modela prikazane su u Tablici 4-1. Postavke numeričkog modela prikazane su u Tablici 4-2.

Tablica 4-1: Postavke fizikalnog modela za Obalni model

Parametar	Postavka	Komentari
Hrapavost podloge (dna)	Nikuradseova jednadžba	Konstantna hrapavost od 0,03 koristi se u cijeloj ovoj domeni
Model horizontalne turbulencije	Smagorinky + konstantna pozadinska vrijednost	Koristi se jedino za moment sile. Bez horizontalne difuzije za skalarnu količinu kao temperatura i salinitet da se ograniči lažno miješanje.

Parametar	Postavka	Komentari
Model vertikalne turbulencije	GOTM	Vidi odjeljak 3.7.2
Coriolisova sila	Prostorna varijacija	
Sila koja utječe na plimu/oseku	Isključeno	
Jednadžba stanja	Jednadžba stanja s 25 parametara (Jackett <i>i sur.</i> , 2006)	Uzima u obzir varijaciju u temperaturi, salinitetu
Koeficijent povlačenja vjetra	(Flather, 1976)	Funkcija brzine vjetra
Koeficijent atmosferske izmjene	Pojednostavljen model izmjene baziran na temperaturnoj razlici između zraka i površine mora.	

Tablica 4-2 Postavke numeričkog modela za Obalni model.

Parametar	Postavka	Komentari
Advekcijaska shema za moment sile	Karakteristična metoda	
Advekcijaska shema za skalare	NERBS shema	
Rješavanje matrice	GMRES	
Filtar za hidrostatske neujednačenosti	Uključeno	
Suša/poplava	Uključeno	Brzine i razine vode izračunate su prema plimnim ravnotežama s korekcijom
Nehidrostatski model	Isključeno	Nehidrostatski modeli potrebni su samo u slučaju očekivanih velikih vertikalnih akceleracija, što nije slučaj za Obalni model
Nagomilavanje mase za dubinu vode	1,0	
Kompatibilnost gradijenta slobodne površine	0,9	

4.7.2 Model turbulencije

Detalji od modelu turbulencije mogu se pronaći u odjeljku 3.7.2 jer se slične postavke razmatraju i za obalni model.

4.7.3 Model atmosferske promjene

Slično kao i u Jadranskom modelu, za snimanje vertikalne distribucije gustoća, u obalnom modelu također su razmatrane atmosferske promjene. Ti modeli promjena su uključeni u

modul kakvoće vode u TELEMAC-u, tzv. WAQTEL.

Da bi se izračunala temperaturna varijacija duž vodenog stupa, primijenjen je pojednostavljeni model izmjene temperature baziran na Sweersovoj jednadžbi (1976.).

5. ZAKLJUČCI

U ovom izvješću predstavljen je pristup modelu i različite korake koji se poduzimaju za ocjenu kakvoće vode za kupanje. Raspravljaju se i važni procesi i aspekti koje treba uzeti u obzir u numeričkoj hidrodinamici i modelima za ocjenu kakvoće vode.

Opisane su postavke modela za hidrodinamičke modele. Prvo, predstavljen je Jadranski model s dalekometnim poljem. Drugo, dana je rasprava o lokalnom modelu istarskog priobalja s poljem srednjeg dometa koji će se koristiti za procjenu kakvoće vode.

6. LITERATURA

Egbert G.D. i Erofeeva S.Y. (2002). *Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides* (Učinkovito inverzno modeliranje barotropskih oceanskih plima i oseka). *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 19(2), 183–204, doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2.

Flather R. (1976). *A tidal model of the northwest European continental shelf*. (Plimni model europskog kontinentalnog sjeverozapadnog morskog bazena). *Mem Soc R Sci Liege*, 6(10), 141–164.

Jackett D.R., McDougall T.J., Feistel R., Wright D.G. i Griffies S.M. (2006). *Algorithms for Density, Potential Temperature, Conservative Temperature, and the Freezing Temperature of Seawater*. (Algoritmi za gustoću, potencijalnu temperaturu, očuvanje temperature i temperaturu smrzavanja morske vode) *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 23(12), 1709–1728, doi: 10.1175/JTECH1946.1.

Lanckriet T., Breugem A. i Decrop B. (2018). *Coupling TELEMAC-3D with the General Ocean Turbulence Model (GOTM)*. (Spajanje TELEMACA-3D s Općim modelom oceanskih turbulencija (GOTM)). XXVth Telemac & Mascaret User Conference, Norwich, UK.

SHORE (2018). Bathymetric & Current velocity data collection Porec, Croatia. (Prikupljanje podataka o batimetriji i tekućim podacima o brzini, Poreč, Hrvatska).

Sweers H.E. (1976). *A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature*. (Nomogram za procjenu koeficijenta izmjene topline u području dodira zraka i vode kao funkcija brzine vjetera i temperature; kritički pregled određene literature) *J. Hydrol.*, 30, 375–401.

Tonani M., Teruzzi A., Korres G., Pinardi N., Crise A., Adani M., Oddo P., Dobricic S., Fratianni C. & Drudi M. (2011). *The Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre, a component of the MyOcean system* (Centar za praćenje i prognoze na Mediteranu, sastavni dio sustava MyOcean). Proc. Sixth Int. Conf. EuroGOOS.

Umlauf L. i Burchard H. (2003). *A generic length-scale equation for geophysical turbulence models*. (Opća jednadžba opsega duljine za modele geofizičke turbulencije) *J. Mar. Res.*, 61(2), 235–265.

Umlauf L. i Burchard H. (2005). *Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work* (Model zatvaranja turbulencije drugog reda za geofizičke granične slojeve. Pregled nedavnog rada). *Cont. Shelf Res.*, 25(7), 795–827, doi: 10.1016/j.csr.2004.08.004.

Dodatak A Spajanje TELEMACA-3D s Općim modelom oceanskih turbulencija (GOTM)

Povezivanje TELEMACA-3D s Općim modelom oceanskih turbulencija (GOTM)

Thijs Lanckriet, Alexander Breugem, Boudewijn Decrop
International Marine and Dredging Consultants nv
Antwerp, Belgija
thijs.lanckriet@imdc.be

Sažetak – Opći model oceanskih turbulencija (GOTM), 1DV model vodenog stupa za obalne, oceanske i limničke vode, povezan je na TELEMAC-3D, što je proširilo mogućnosti modela za opis vertikalnih procesa miješanja. Povezani model TELEMAC-3D GOTM je primijenjen na četiri slučaja: slučaj testiranja blokade izmjene, slučaj testiranja stratifikacije, slučaj oceanske cirkulacije velikih razmjera i slučaj stratifikacije uzrokovane salinitetom u ušću estuarija. Slučaj testiranja blokade izmjene pokazuje da TELEMAC 3D GOTM model sa k - ϵ zatvaranjem daje usporedive rezultate za TELEMAC-3D model duljine miješanja za jednostavnu geometriju, te da je povećanje vremena računanja zbog spajanja na GOTM vrlo ograničeno. Slučaj oceanske cirkulacije velikih razmjera pokazuje da TELEMAC-3D s parametrizacijom K-profila (KPP) u GOTM-u omogućuje simulaciju oceanske cirkulacije velikih razmjera, uključujući dinamiku površinskog graničnog sloja pod utjecajem zračenja i atmosferskih kretanja. Slučaj testiranja cirkulacije estuarija pokazuje da u složenijim okolišima TELEMAC-3D s GOTM k - ϵ zatvaranjem bolje snima fizikalna svojstva stratifikacije gustoće saliniteta nego jednostavan model duljine miješanja, a to ima značajan utjecaj na cirkulaciju makro opsega u estuariju.

I. UVOD

Budući da se TELEMAC-3D primjenjuje na veće i dublje domene, uključujući (obalne) oceane, također raste potreba za fleksibilnim opisima, usmjerenima na slučaj, za vertikalne procese turbulentnog miješanja. Kao alternativa implementaciji dodatnih turbulencijskih modula u postojeći TELEMAC-3D kod, TELEMAC-3D je povezan sa 1DV Opći model oceanskih turbulencija (GOTM) [1].

II. GOTM - OPIS

GOTM (www.gotm.net) je *open-source* model zajednice za hidrodinamiku i procese miješanja turbulencije na obalama, oceanima i jezerima i može se pokrenuti kao samostalan mod ili u kombinaciji s 3D cirkulacijskim modelom. Filozofija u pozadini GOTM-a je izraditi različite modele turbulencije dostupne u jedinstvenom kodu koji se može koristiti više puta, stvoriti okoliš jednostavan za korisnika za primjenu modela turbulencije za oceanska istraživanja, kao i alat za kasniji razvoj shema turbulencije. Kod samostalnog načina rada, GOTM rješava jednodimenzionalne vertikalne (1DV) transportne jednadžbe momenta sile, soli i topline, kao i procese turbulentnog miješanja ovih varijabli. U srcu GOTM-a nalazi se biblioteka nekoliko modela zatvaranja (*closure*) turbulencija za parametrizaciju vertikalnih turbulentnih tokova momenta sile, topline i indikatora (*tracers*), uključujući energetske modele, modele s dvije jednadžbe kao što je k - ϵ shema zatvaranja, k - ω zatvaranje, Mellor-Yamadina shema zatvaranja, Algebarski

modeli naprezanja i parametrizacija K-profila. Implementacija sheme k - ϵ zatvaranja i k - ω zatvaranja u GOTM-u temelji se na jednadžbi mjerila s generičkom duljinom [2]. GOTM je povezan s nekoliko modela cirkulacije oceana uključujući GETM [3], MIT-gcm [4], FVCOM [5], SLIM-3D [6] i sada TELEMAC-3D (u granskoj inačici), što omogućuje generičko korištenje svih GOTM-ovih formulacija turbulencije u 3D modelu cirkulacije. Ograničeni model biogeokemijskog vodenog stupa (GOTM-bio) je također bio dostupan u GOTM-u do verzije 4.0, a sada je zamijenjen zasebnim Okvirom za vodene biogeokemijske modele (*Framework of Aquatic Biogeochemical Models* - FABM), koji se mogu povezati na GOTM.

III. PROVEDBA SPAJANJA

A. Općenito

Spajanje na TELEMAC-3D provodi se kao dvosmjerno online spajanje. U novo-dodanom modulu *GOTM_coupling.F*, pozivaju se glavne GOTM-ove pod-rutine za turbulencije (*turbulence.f* ili *kpp.f*) sa svim relevantnim parametrima kao što su brzina, gustoća, difuznost, turbulentna kinetička energija i disipacija koji se prosljeđuju i vraćaju u glavni TELEMAC-3D kod. U GOTM-u se koristi stupnjevana vertikalna mreža s brzinama i skalarima definiranim u središtima ćelija (C-točke) a difuznosti i viskoziteti nalaze se na rubovima (W-točke). U TELEMACU-3D sve su varijable definirane na čvorovima. Da bi se obavilo pretvaranje varijabli iz TELEMAC-ovih rubova u GOTM-ova središta ćelija, korišteno je jednostavno svođenje na srednju vrijednost:

$$U_j = 0.5(U_{j+1/2} + U_{j-1/2}), \quad (1)$$

gdje je U_j varijabla iz GOTM-a na sredini ćelije, a $U_{j+1/2}$ jest TELEMAC-ova varijabla na rubu iznad sredine ćelije. GOTM također zahtijeva ulazne vrijednosti frekvencije uzgona N i frekvenciju posmika S :

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2)$$

$$S^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2, \quad (3)$$

gdje su U i V brzine u smjerovima x i y , ρ je potencijalna gustoća, a g ubrzanje zbog gravitacije. Gradijenti na rubovima se dobiju iz TELEMAC-ovih varijabli na slojevima iznad i ispod:

$$\left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{j+1/2} = \frac{U_{j+3/2} - U_{j-1/2}}{z_{j+3/2} - z_{j-1/2}} \quad (4)$$

Na slobodnoj površini na dnu, koristi se gradijent brzine na rubu ispod ili iznad.

GOTM koristi potencijalnu gustoću za definiranje stratifikacije. Zbog važnosti točne definicije gustoće i gradijenata gustoće, također je u kodu primijenjena jednadžba stanja s 25 pojmova [7].

Budući da je GOTM jednodimenzionalni model, u sadašnjoj implementaciji spajanja, zanemarene su horizontalna advekcija i horizontalna difuzija turbulentne kinetičke energije k , kao i disipacija turbulencije ϵ . Relativno je jednostavno dodati ove pojmove korištenjem metode frakcijskog koraka. Međutim, za primjenu u rijekama, estuarijima, obalama mora i oceana, vertikalna varijacija je tipično mnogo veća od horizontalne pa se stoga horizontalni procesi tipično mogu zanemariti. Zanemarivanjem horizontalne advekcije i difuzije od k i ϵ , ostvaruju se znatne uštede vremena utrošenog na izračun. Ista aproksimacija također se primjenjuje na druge obalne i oceanske modele kao što su DELFT3D i COHERENS.

U GOTM-ovoj parametrizaciji K-profila (K-Profile Parametrization - KPP [8]), vertikalno miješanje skalara (temperatura i salinitet) se definira korištenjem dva pojma, lokalnog procesa i ne-lokalnog procesa:

$$\overline{w'c'} = K_c \frac{\partial c}{\partial z} + \gamma, \quad (5)$$

gdje je $w'c'$ tok (fluks) turbulentnog vertikalnog skalara, K_c vertikalna difuznost i γ ne-lokalni tok (fluks). Ne-lokalni tok se tipično koristi za parametrizaciju konvektivnog miješanja u situacijama s nestabilnom stratifikacijom. Pojam ne-lokalni je uveden uz navođenje pojma vertikalne brzine koji sadrži γ u pozivu prema *cvdf3d.f* u kojoj se računaju advekcija i difuzija skalara.

Postavke modela specifične za GOTM navedene su u zasebnoj datoteci s popisom naziva, slično simulaciji samostalnog GOTM-a. Povezani TELEMAC-3D GOTM je slobodno dostupan u ogranku *cookiecuttershark TELEMAC SVN* skladišta, koje se temelji na Telemacu V7P2.

B. Upute za instalaciju za GOTM- TELEMAC

Za instalaciju povezanog TELEMAC GOTM modela, treba poduzeti sljedeće korake:

- Preuzeti i *kompajlirati* GOTM i (ako je potrebno) FABM koristeći specifikacije koje se nalaze na www.gotm.net. Važno je koristiti isti *kompajler* kao i za *kompajljanje* TELEMAC-a. Budući da GOTM koristi neke moderne dodatke za FORTRAN kao što su orijentacija objekta, potreban je noviji FORTRAN *kompajler* (mi koristimo *gfortran* 4.9.4). Tijekom *kompajljanja* preporučuje se promijeniti varijable

stderr i *stdout* u datoteci *cppdefs.h* na 6 tako da se *log* poruke na GOTM-u upišu u TELEMAC-ove *log* datoteke. Nadalje, možda će biti potrebno označiti neke preprocesorske zastavice da se odrede zahtijevane postavke GOTM KPP modela.

- U konfiguracijskoj datoteci *\$\$SYSTEMCFG*, označiti preprocesorsku zastavicu DGOTM te dodati uključeno i putove za biblioteku do GOTM-a (-lturbulence i -lutil).
- Kompajlirati TELEMAC kao i obično koristeći skripte *compileTELEMAC.py*.

C. Upute za korištenje za GOTM-TELEMAC

Za korištenje GOTM-a sa softverom TELEMAC-3D, treba navesti dvije ključne riječi:

- Ključna riječ VERTICAL TURBULENCE MODEL treba se postaviti na:
 - 5:Standard GOTM
 - 6:GOTM KPP model
- Ključna riječ GOTM FILE treba se postaviti na naziv datoteke u datoteci s popisom naziva koju koristi GOTM. U ovoj datoteci mogu se odrediti sve postavke za model turbulencije, kao i u simulaciji samostalnog GOTM-a. Detalji o specifičnim značenjima varijabli u ovoj datoteci mogu se pronaći u priručniku za GOTM.

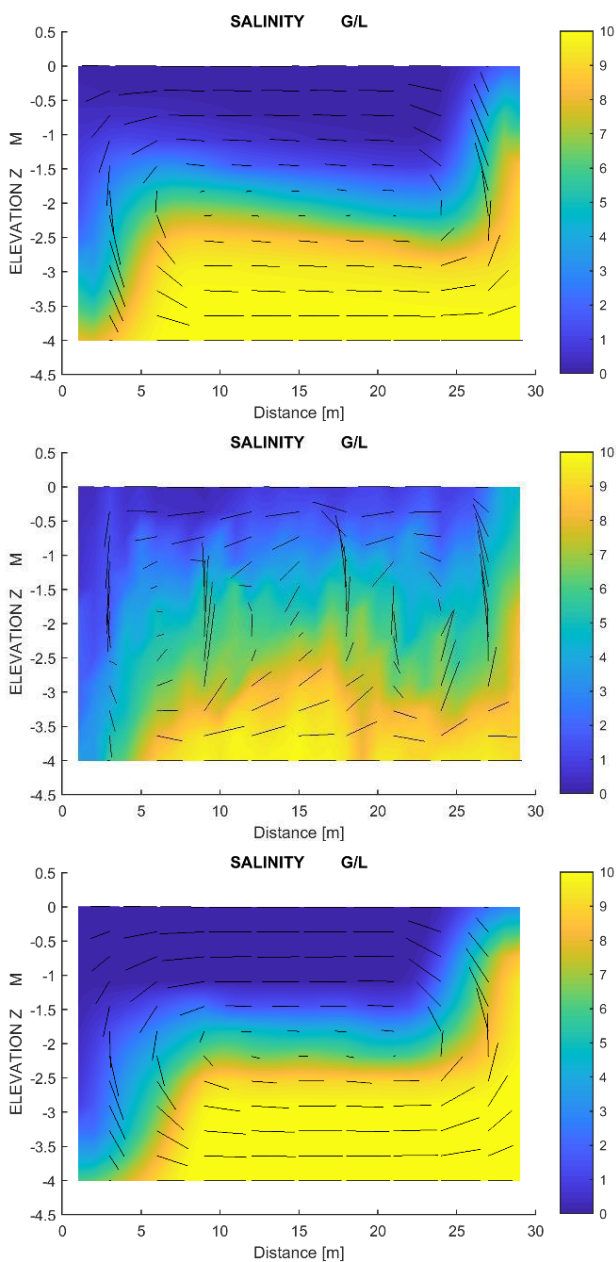
Imati na umu da postoje neki određeni zahtjevi kada se koristi model GOTM KPP u odnosu na površinske tokove (fluks) i kratkovalno zračenje. U ovom slučaju TELEMAC-3D se mora povezati i sa WAQTEL-om. Nadalje, obvezna je nova jednadžba stanja s 25 pojmova [7], gdje se koristi ključna riječ DENSITY LAW = 5. Ove se postavke provjeravaju kodom pri prvom pozivanju GOTM potprograma. Za standardni GOTM model, zahtijeva se uporaba Nikuradseovog zakona trenja postavkom LAW OF BOTTOM FRICTION = 5. Količine turbulencije kao što su k i ϵ koje računa GOTM, mogu se izvesti tako da se navedu ključnom riječi VARIABLES FOR 3D GRAPHIC PRINTOUT. Površinski i donji granični sloj koji se računa putem GOTM KPP modela, može se izvesti kao 2D grafički izlaz, odnosno varijable BLTOP i BLBOT. Varijable BLTOP i BLBOT se računaju izravno u GOTM-u i nove su za ovu povezanu verziju.

IV. PODRUČJA PRIMJENE

A. Slučaj testiranja blokiranja izmjene

Slučaj testiranja blokiranja izmjene jedan je od standardnih slučajeva testiranja za TELEMAC-3D, predstavlja jednostavan interni problem s pucanjem brane, pri čemu horizontalan skok u salinitetu pri $t=0$ s izaziva baroklički val. Korištena je verzija V7P2 slučaja testiranja. Za generiranje dovoljno brzina struja i razina turbulencija, razlika u salinitetu je bila postavljena na 10 PSU za simulaciju ovog testiranja. Slika prikazuje predviđeno polje saliniteta u slučaju testiranja blokiranja izmjene koristeći TELEMAC-3D modelom turbulencije s duljinom miješanja (s parametrizacijom duljine miješanja po Nezu i Nakagawi) primjenom Munk-Andersonove funkcije stabilnosti (gore), vlastitog $k-\epsilon$

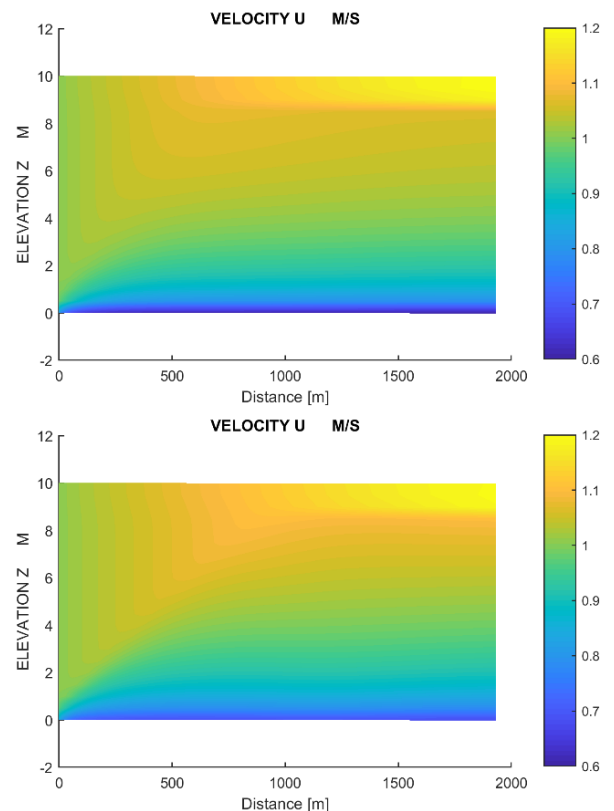
modela (sredina) i sa zatvaranjem $k-\epsilon$ primjenom modela turbulencije algebarskog drugog reda za izračunavanje skalarne difuznosti u GOTM-u (dno). Rezultati primjene modela duljine miješanja i GOTM $k-\epsilon$ modela su vrlo slični, iako detaljniji pregled izračunate difuznosti ukazuje na više miješanje u modelu s duljinom miješanja. TELEMAC-3D s vlastitim $k-\epsilon$ modelom pokazuje nestabilnosti, kao što je također bilo dokazano prekoračenjem iteracija u simulaciji log datoteke, tj. simulacija nije konvergirala. Vrijeme izračuna na jednom procesoru iznosilo je 11 s za model duljine miješanja, a 12 s za GOTM $k-\epsilon$ simulaciju, što pokazuje da se korak povezivanja GOTM-a odvija uz mali dodatni trošak računanja premda se koristi dosta napredna shema turbulencije.



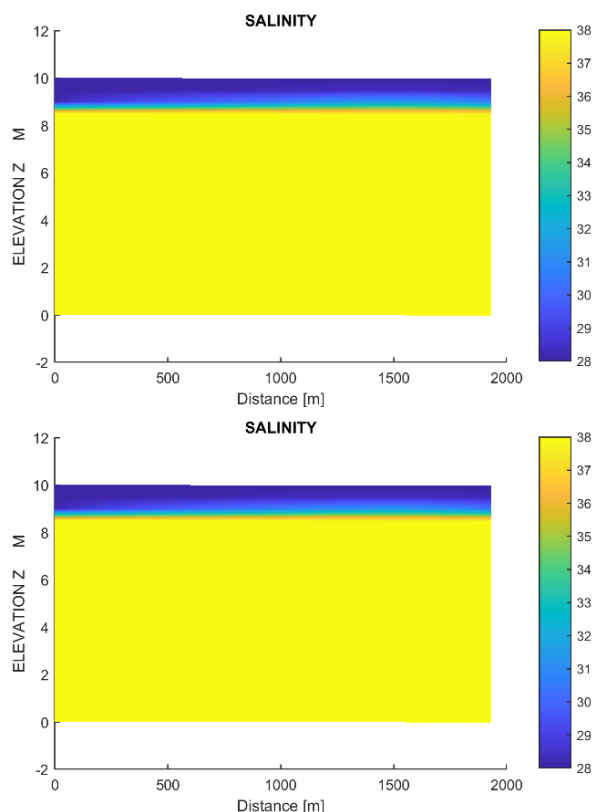
Sl. 1: Polje saliniteta nakon 100 s za znak nivelacije pri testiranju blokiranja izmjene. Gore: TELEMAC-3D model duljine miješanja. Sredina: TELEMAC-3D $k-\epsilon$ model. Dolje: TELEMAC-3D + GOTM $k-\epsilon$ model.

B. Slučaj testiranja stratifikacije

Testiranje stratifikacije jedan je od standardnih slučajeva testiranja za TELEMAC-3D. Njime se simulira razvoj profila brzine od uzvodne granice u stratificiranom protoku. Slučaj testiranja je pokrenut korištenjem standardne postavke (osim što je zakon trenja postavljen na Nikuradse) s modelom TELEMAC-3D $k-\epsilon$ i za TELEMAC-3D s modelom GOTM $k-\epsilon$. Testiranje je trajalo 3min29s za model TELEMAC-3D $k-\epsilon$ i 1min59s za TELEMAC-3D s modelom GOTM $k-\epsilon$. Polja brzine i saliniteta prikazana su na slikama 2 i 3. Razlike u polju saliniteta su iznimno ograničene. Oba modela jasno pokazuju stratifikaciju. Postoje neke neznatne razlike u polju brzine između oba modela, što se može pripisati razlikama u korištenim postavkama turbulencije i činjenici da implementacija TELEMAC3D - GOTM zanemaruje horizontalnu advekciju od k i ϵ , što može imati određeni utjecaj u zoni gdje se razvija profil brzine.



Sl. 2: Polje brzine u konačnoj situaciji za testiranje nivelacijske oznake za stratifikaciju. Gore: TELEMAC-3D $k-\epsilon$ model. Dolje: TELEMAC-3D + GOTM $k-\epsilon$ model.



Sl. 3: Polje saliniteta u konačnoj situaciji za testiranje oznake za nivelaciju za stratifikaciju. Gore: TELEMAC-3D $k-\epsilon$ model. Dolje: TELEMAC-3D + GOTM model.

C. Modeliranje oceana velikih razmjera s parametrizacijom K-profila

U dubokom oceanu obično se mogu razlikovati dva različita režima miješanja: miješanje na površini i na donjim graničnim slojevima pod utjecajem sila zračenja i forsiranja atmosfere površine te smičnog naprezanja na dnu, te miješanja u unutrašnjosti oceana zbog unutarnjih valova i nestabilnosti smicanja [8]. Model parametrizacije K-profila (KPP) model od Largea i sur. [8] često se koristi za parametrizaciju oceanskog miješanja koje određuje dubinu graničnog sloja na temelju općeg (*bulk*) Richardsonovog broja, te pruža izraze za difuznost i ne-lokalni transport u oba sloja, graničnom i unutrašnjosti oceana. Često se koristi za oceanske simulacije velikih razmjera kao što su operativni HYCOM model (www.hycom.org).

Testna simulacija modeliranja velikih razmjera na otvorenom oceanu obavljena je pomoću TELEMAC-3D/GOTM povezanog s KPP-om na 32 paralelna procesora. U otvorenom oceanu, debljina površinskog graničnog sloja se u prvom redu određuje prema smičnim silama vjetrova, temperaturi i salinitetu koji utječu na stratifikaciju gustoće, te površinskim toplinskim tokovima (osjetljiva i latentna toplota toka te kratkovalno i

dugovalno zračenje). Slika prikazuje trenutni vertikalni profil temperature, saliniteta i vertikalnu vrtložnu viskoznost na površini graničnog sloja izračunatu korištenjem softvera TELEMAC-3D povezanog s GOTM i WAQTEL, korištenjem podataka iz HYCOM-a za pogon [9]. Dubina graničnog sloja se rasprostire do oko 50 m, granica stratifikacije. Vrtložna viskoznost u skalama površinskog graničnog sloja s dubinom graničnog sloja h , skali turbulentne brzine ovisne o dubini w_x i propisana funkcija oblika polinoma $G(\sigma)$ (za više informacija vidi [8]):

$$v_z = hw_x G(\sigma). \quad (6)$$

Sl. 4 prikazuje vremensku seriju debljine površinskog graničnog sloja, brzinu vjetrova i kratkovalno zračenje tijekom razdoblja od mjesec dana. Debljina površinskog sloja ukazuje na snažan dnevni ciklus s debljinom graničnog sloja od 40-80 m tijekom noći (konvekcijsko) i uvjete snažnih vjetrova, do 0-2 m tijekom dana zbog stabilizacije uslijed kratkovalnog zračenja u gornjem vodenom stupu. Tri značajna događaja zbila su se u vremenskom intervalu od mjesec dana, označeni kao A, B i C:

A: Jako smanjena dnevna stabilizacija tijekom oblačnih uvjeta (smanjeno kratkovalno zračenje); veliki granični sloj ustrajno ostaje tijekom cijeloga dana).

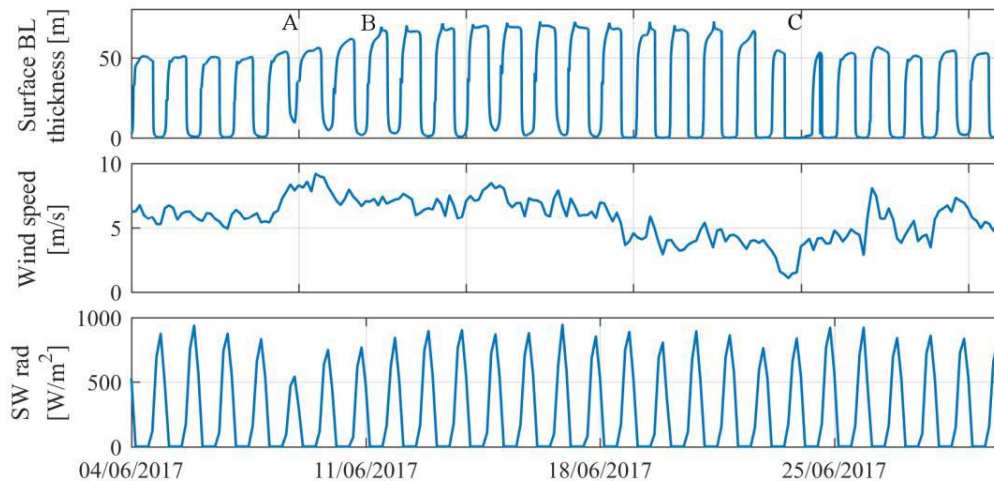
B: Povećanje maksimalne dubine graničnog sloja zbog povećane brzine vjetrova.

C: Ograničeno stvaranje graničnog sloja po noći tijekom niske brzine vjetrova.

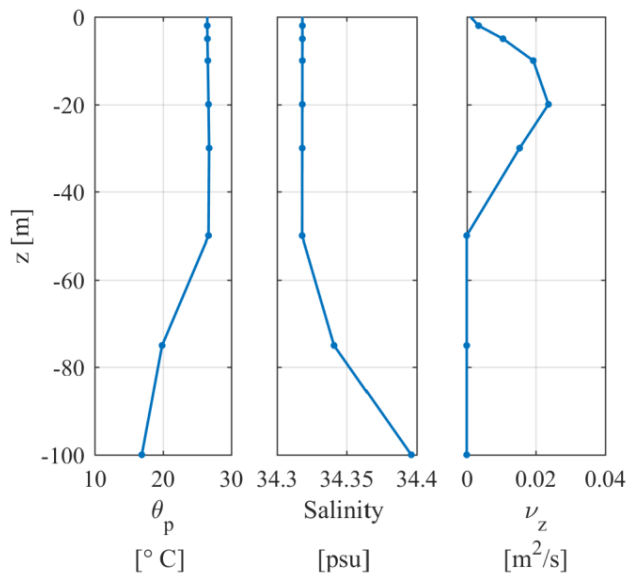
Primjena KPP modela u GOTM-u omogućuje simulaciju utjecaja ovih meteoroloških događaja na granični površinski sloj unutar softvera TELEMAC-3D.

D. Stratifikacija u estuariju uzrokovana salinitetom

Stratifikacija gustoće izazvana salinitetom ima jak utjecaj na turbulenciju i opću cirkulaciju unutar estuarija u brojnim ušćima. Sl. prikazuje vertikalne profile saliniteta c , horizontalnu brzinu u , turbulentnu kinetičku energiju k i difuznost soli v_z, Sal te moment sile v_z u ušću estuarija za tri momenta u vremenu: tijekom protoka plavljenja (gore), vraćanja protoka (visok vodostaj, sredina) i tijekom struja oseke (dolje). Simulacija je obavljena softverom TELEMAC-3D, model vertikalne duljine miješanja korištenjem parametrizacije duljine miješanja po Nezu i Nakagawi (crvene krivulje), TELEMAC-3D + GOTM $k-\epsilon$ vertikalno zatvaranje turbulencije s algebarskim zatvaranjem drugog reda za skalarnu protoku miješanja (plave krivulje) i TELEMAC-3D interni vertikalni $k-\epsilon$ model. Zadnja simulacija pokazala je nestabilnosti i stoga nije prikazana na Slici . Nažalost, nisu dostupna nikakva mjerenja koja bi se mogla koristiti za usporedbu rezultata različitih simulacija.



Sl. 4: Površinski granični sloj, brzina vjetra i kratkovalne sile zračenja u slučaju testiranja otvorenog oceana za model povezanog TELEMAC-3D-GOTM modela s modelom KPP turbulencije.



Sl. 5: Temperatura (θ_p), salinitet i vertikalna vrtložna viskoznost (ν_z) u površinskom graničnom sloju.

Tijekom poplavnog protoka (Sl. , gore), brzine dosežu 1 m/s a turbulentna kinetička energija k doseže do $0,013 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Miješanje u $k-\epsilon$ modelu uglavnom je ograničeno na donju polovicu vodenog stupa; za razliku od toga, model duljine miješanja također predviđa moment sile miješanja u gornjoj polovici vodenog stupa. Kod povratnog protoka (Sl. , sredina), razine turbulencije su za red veličine niže od onih tijekom poplave (k manji od $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$). Još važnije, turbulencija i vertikalno miješanje su ograničeni na područje dna, 2 m vodenog stupa. Rezultat je da se javljaju znatne razlike u brzini između gornje polovice vodenog stupa (osekom usmjerene brzine do 0,28 m/s) i sredine vodenog stupa (poplavom usmjerene brzine do 0,06 m/s). Model duljine miješanja ponovno predviđa više miješanja u gornjem dijelu vodenog stupa, što za rezultat ima

mного manju vertikalnu varijaciju u brzini protoka. Tijekom protoka struje oseke (Sl. , dolje), profil vertikalne viskoznosti je opet bitno drugačiji u modelu GOTM $k-\epsilon$ nego u modelu duljine miješanja, koji u ovom slučaju predviđa parabolični profil viskoznosti. Razlike u miješanju dovode do veće duljine slanog jezika kada se koristi GOTM, nego kada se koristi model duljine miješanja (Sl.).

Kao zaključak ovog slučaja testiranja, možemo reći da TELEMAC3D GOTM $k-\epsilon$ bolje snima fiziku smicanja, stratifikaciju saliniteta i turbulentno miješanje nego model duljine miješanja, a to ima značajan utjecaj na predviđenu makro skalu cirkulacije estuarija.

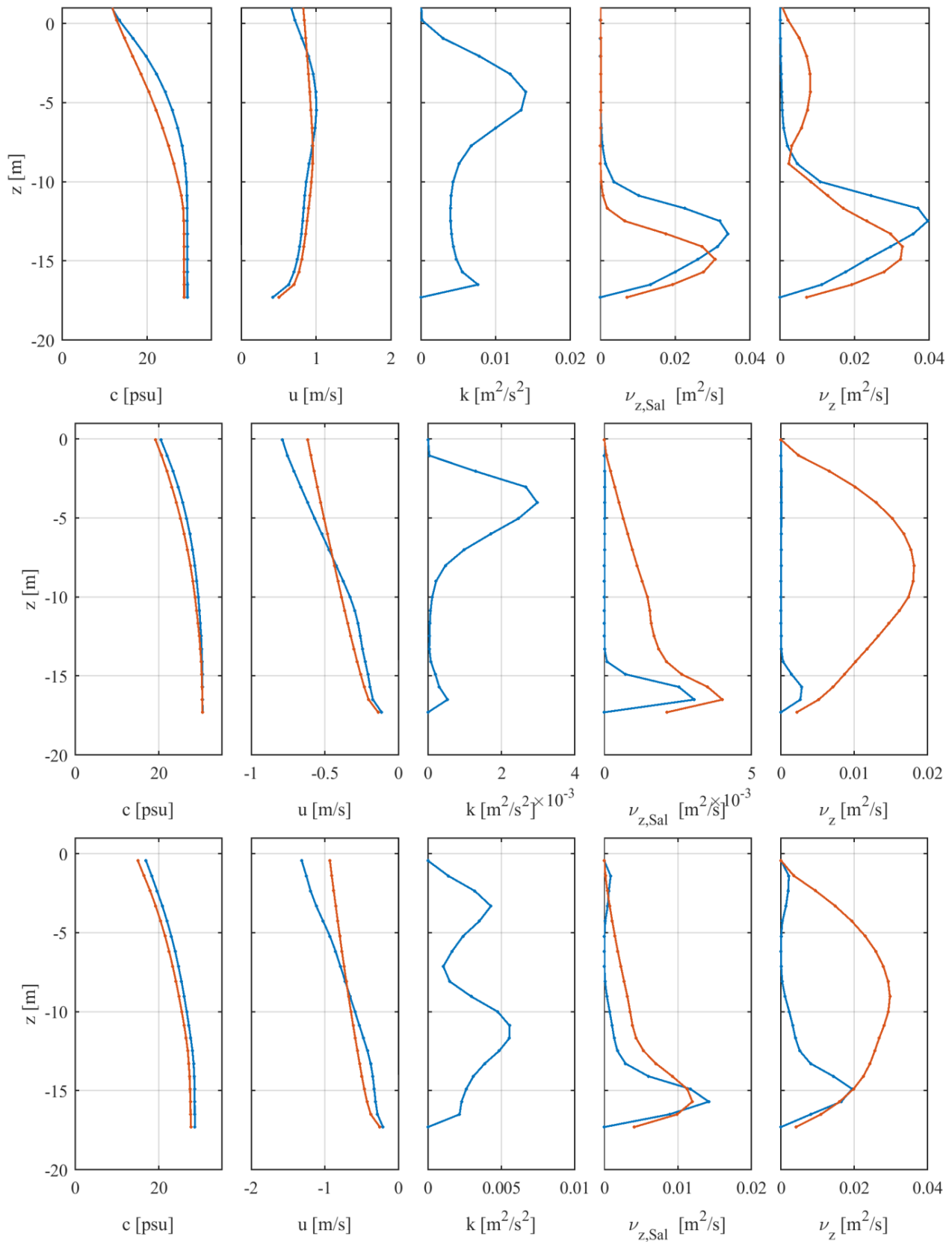
V. ZAKLJUČCI

TELEMAC-3D je bio povezan na 1DV Opći model oceanske turbulencije (GOTM), što je omogućilo uporabu različitih parametrizacija i shema zatvaranja za vertikalno miješanje. Funkcioniranje povezanog TELEMAC-3D GOTM modela bilo je prikazano pomoću četiri različita slučaja primjene.

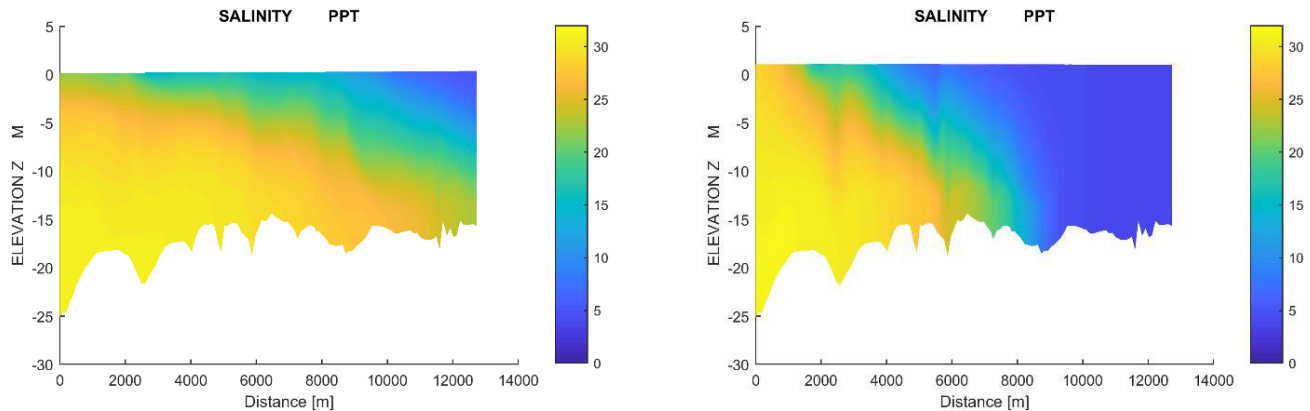
Slučaj testiranja blokiranja izmjene pokazuje da GOTM model daje rezultate koji su usporedivi s uzorkom modela duljine miješanja za jednostavnu geometriju internog pucanja brane, te da GOTM povezivanje dolazi uz vrlo niske dodatne troškove računanja. Isto je prikazano u slučaju testiranja stratifikacije.

Slučaj na otvorenom oceanu pokazuje uporabu ne-lokalne parametrizacije K-profila u kombinaciji sa softverom TELEMAC-3D, što je omogućilo simulaciju cirkulacije oceana u velikom omjeru s dinamičkim površinskim graničnim slojem pod utjecajem smičnih sila vjetra, tokova zračenja i konvekcije.

Model estuarija pokazuje da je TELEMAC-3D povezan sa zatvaranjem GOTM $k-\epsilon$ u mogućnosti dati realističnu simulaciju složenih interakcija između stratifikacije gustoće uzrokovane salinitetom i vertikalnog turbulentnog miješanja, čime se dobivaju uzorci cirkulacije estuarija koji su kvalitativno različiti od simulacija s više rudimentarnim modelom duljine miješanja.



Sl. 6: Vertikalni profili saliniteta c , horizontalna brzina u , turbulentna kinetička energija k , vertikalna difuznost soli $\nu_{z,Sal}$ i vertikalna viskoznost ν_z tijekom poplave (gore), visok vodostaj (u sredini) i slaba struja (dno). Crveno: TELEMAC-3D s modelom vertikalne duljine miješanja. Plavo: TELEMAC-3D s GOTM $k-\epsilon$ turbulencijskim zatvaranjem.



Sl. 7: 2DV profili saliniteta duž estuarijskog puta. Desno: TELEMAC-3D s modelom vertikalne duljine miješanja. Lijevo: TELEMAC-3D s GOTM k - ϵ turbulencijskim zatvaranjem.

LITERATURA

- [1] H. Burchard, K. Bolding i M. Ruiz-Villarreal, *GOTM, a general ocean turbulence model. Theory, implementation and test cases* (GOTM – opći model oceanskih turbulencija. Teorija, implementacija i slučajevi testiranja), Tehničko izvješće EUR 18745. Europska komisija, siječanj. 1999.
- [2] L. Umlauf and H. Burchard, *A generic length-scale equation for geophysical turbulence models* (Opća jednadžba opsega duljine za modele geofizičke turbulencije), *Journal of Marine Research*, sv. 61, br. 2, str. 235–265, 2003.
- [3] H. Burchard, K. Bolding i L. Umlauf, *General Estuarine Transport Model* (Opći model transporta na ušću), 2011.
- [4] L. I. Enstad, K. Rygg, P. M. Haugan i G. Alendal, *Dissolution of a CO₂ lake, modeled by using an advanced vertical turbulence mixing scheme* (Otapanje CO₂ u jezeru, modelirano uporabom napredne sheme miješanja vertikalne turbulencije), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, sv. 2, br. 4, str. 511–519, listopad 2008.
- [5] R. Tian i C. Chen, *Influence of model geometrical fitting and turbulence parameterization on phytoplankton simulation in the Gulf of Maine* (Utjecaj modela geometrijske prilagodbe i parametrizacije turbulencije na simulaciju fitoplanktona u Zaljevu Maine), *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, sv. 53, br. 23, str. 2808–2832, studeni 2006.
- [6] T. Kärnä, V. Legat, E. Deleersnijder i H. Burchard, *Coupling of a discontinuous Galerkin finite element marine model with a finite difference turbulence closure model* (Spajanje morskog modela s diskontinuiranim Galerkinovim konačnim elementom s modelom zatvaranja turbulencije s konačnom razlikom), *Ocean Modelling*, sv. 47, str. 55–64, siječanj 2012.
- [7] D. R. Jackett, T. J. McDougall, R. Feistel, D. G. Wright i S. M. Griffies, *Algorithms for Density, Potential Temperature, Conservative Temperature, and the Freezing Temperature of Seawater* (Algoritmi za gustoću, potencijalnu temperaturu, očuvanje temperature i temperaturu smrzavanja morske vode), *J. Atmos. Oceanic Technol.*, sv. 23, br. 12, str. 1709–1728, prosinac 2006.
- [8] W. G. Large, J. C. McWilliams i S. C. Doney, *Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization* (Oceansko vertikalno miješanje: Pregled i model s parametrizacijom nelokalnog graničnog sloja), *Reviews of Geophysics*, sv. 32, br. 4, str. 363–403, 1994.
- [9] E. P. Chassignet *i sur.*, *The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system* (HYCOM (Model oceana s hibridnim koordinatama) sustav asimilativnih podataka), *Journal of Marine Systems*, sv. 65, br. 1–4, str. 60–83, ožujak 2007.