

Analiza i numeričko modeliranje jadranskog tsunamija od 15. travnja 1979. godine

Kapitanović, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:496613>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet

**ANALIZA I NUMERIČKO MODELIRANJE
JADRANSKOG TSUNAMIJA OD
15. TRAVNJA 1979. GODINE**

Diplomski rad

Vedran Kapitanović

Split, rujan 2024.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Diplomski rad

Analiza i numeričko modeliranje jadranskog tsunamija od 15. travnja 1979. godine

Vedran Kapitanović

Sveučilišni diplomski studij Fizika; smjer: Računarska fizika

Sažetak:

U razumijevanju utjecaja zabilježenih ili hipotetskih tsunamija na nekom području važnu ulogu ima numeričko modeliranje tsunamija. Modeliranjem se može reproducirati vrijeme dolaska tsunamija u pojedinu točku, prostorna raspodjela razina mora i brzina struja te raspon i visina poplavlivanja obale. U ovom radu modeliran je tsunami koji je zabilježen nakon potresa 15. travnja 1979. godine u Crnoj Gori (blizu Bara), kako bismo što bolje shvatili mehanizam njegova nastanka, širenje i poplavlivanje obale. Numerički izračuni izvršeni su na jednoj prostornoj domeni koja prekriva Jadransko more, a potres je modeliran pomakom morskog dna u početnom trenutku. Napravljeno je 12 simulacija s različitim parametrima potresa te je odabrana ona koja je dala rezultate najbližnje mjerenjima. Simulacije su evaluirane po slaganju simuliranih i mjerenih nizova iz Bara i Barija. Simulacija bi se mogla još poboljšati sustavnim praćenjem utjecaja promjene parametara potresa na točnost simulacije, kao i simulacijom dinamike pucanja rasjeda.

- Ključne riječi:** tsunami, mareogrami, numeričko modeliranje, simulacija, potres, rasjed
- Rad sadrži:** 31 stranica, 27 slika, 3 tablice, 10 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku
- Mentor:** izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić,
- Ocjenjivači:** izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić,
izv. prof. dr. sc. Žarko Kovač,
dr. sc. Marin Vojković
- Rad prihvaćen:** 26. 09. 2024.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Master thesis

Analysis and numerical modeling of the Adriatic Sea tsunami of 15 April 1979

Vedran Kapitanović

University graduate study Physics, specialization in Computational Physics

Abstract:

Numerical tsunami modeling plays an important role in understanding the impact of recorded or hypothetical tsunamis in an area. Modeling can reproduce the arrival time of a tsunami at specific points, the spatial distribution of sea levels and current speeds, as well as the extent and height of coastal flooding. This paper models the tsunami recorded after the earthquake on April 15, 1979, in Montenegro (near Bar), to better understand the mechanism of its formation, propagation, and coastal flooding. Numerical calculations were performed over a spatial domain covering the Adriatic Sea, with the earthquake modeled as a seafloor displacement at the initial moment. Twelve simulations were made with different earthquake parameters, and the one yielding results most similar to measurements was selected. The simulations were evaluated based on the agreement between simulated and measured data from Bar and Bari. The simulation could be further improved by systematically monitoring the impact of changes in earthquake parameters on simulation accuracy, as well as by simulating the dynamics of fault rupture.

Keywords: tsunami, mareograms, numerical modeling, simulation, earthquake, fault

Thesis consists of: 31 pages, 27 figures, 3 tables, 10 references. Original language: Croatian

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić

Reviewers: Assoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić
Assoc. Prof. Dr. Žarko Kovač
Dr. Marin Vojković

Thesis accepted: September 26, 2024.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

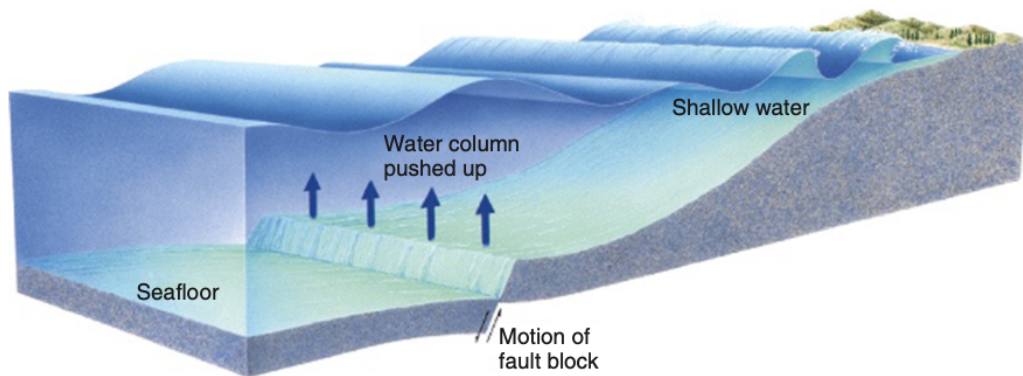
Sadržaj

1	Uvod	1
2	Materijali i metode.....	3
2.1	Mareogrami i ostali zapisi	3
2.2	Numerički model	4
2.3	Simulacije	6
3	Rezultati.....	9
3.1	Analiza podataka	9
3.2	Numeričko modeliranje: početne simulacije	12
3.3	Numeričko modeliranje: dodatne simulacije.....	15
3.4	Karakteristike tsunamija reproduciranog simulacijom 8.....	21
3.5	Utjecaj odabira rubnih uvjeta na rješenje	27
4	Diskusija i zaključci	29
5	Literatura.....	31

1 Uvod

Tsunami je kratko-periodični morski val koji je posljedica perturbacije vertikalnog stupca mora [1]. Taj poremećaj može dolaziti s dna ili površine mora. Najčešći uzroci tsunamija su potresi, klizišta, vulkanske erupcije, promjene tlaka zraka i udari meteorita [2]. Tsunami može imati period od par minuta do par sati [3]. Tijek tsunamija možemo promatrati u tri faze: stvaranje tsunamija, propagacija i prodor na kopno [2].

Najčešći uzrok tsunamija je podmorski potres koji se događa kada se zbog nakupljanja napetosti duž konvergentnih granica tektonskih ploča dogodi pucanje. Takve tsunamije nazivamo seizmičkim. Za razliku od tsunamija generiranih klizištima, čiji se izvor može uzeti kao točkast, seizmički tsunamiji nastaju duž linije [2]. Na rubovima dvaju ploča može se događati podvlačenje jedne ploče pod drugu ili paralelno pomicanje jedne uz drugu [3]. Slika 1 opisuje nastanak, propagaciju i prodor seizmičkog tsunamija na obalu.



Slika 1. Prikaz nastanka, širenja i prodora seizmičkog tsunamija na obalu. Slika je preuzeta s [2].

Tsunamije u teoriji možemo promatrati kao valove u plitkom fluidu, s obzirom na to da im valna duljina u dubljem moru doseže i tisuće kilometara, dok se dubina oceana mjeri u kilometrima. Daleko od obale, tsunami ima veliku brzinu (160-250 m/s) i veliku valnu duljinu. Brzina tsunamija dana je s $c = \sqrt{gh}$, gdje je g ubrzanje sile teže, a h dubina mora. Za razliku od valova uzrokovanih vjetrom, koji nastaju uslijed prijenosa momenta iz zraka na more i čija je energija ograničena na površinske slojeve mora, tsunami prenosi energiju u cijelom stupcu mora. Ta velika količina energije postaje posebno opasna kad se tsunami približi obalnom području gdje se usporava, a visina vala se povećava. Nasuprot tome, u dubokom moru tsunami može imati neznatnu visinu pa i olujni valovi mogu biti mnogo opasniji od njega [2].

Katalog Jadranskih tsunamija [3] sadrži popis tsunamija koji su se dogodili u Jadranskom moru u proteklih 500 godina. Na tom popisu se u ovom trenutku nalazi 15 tsunamija:

- 26. ožujka 1511. – Venecijanski zaljev
- 30. srpnja 1627. - Gargano

- 6. travnja 1667. - Dubrovnik
- 14. travnja 1672. - Rimini
- 20. ožujka 1731. - Apulia
- 20. veljače 1743. - Brindisi
- 21. rujna 1780. - Boka kotorska
- 10. kolovoza 1838. - Rijeka
- 16. kolovoza 1845. - Dubrovnik
- 17. ožujka 1875. - Rimini, Pesaro, Ancona
- 8. prosinca 1889. - Gargano
- 16. kolovoza 1916. - Rimini
- 11. siječnja 1962. - Makarska
- 30. listopada 1930. - Sinigallia
- 15. travnja 1979. – Bar

U ovom radu računalno ću simulirati zadnji tsunami s popisa, onaj koji se dogodio nakon potresa u Crnoj Gori 15. travnja 1979. godine.

Za razumijevanje utjecaja mogućih tsunamija na određenom području važnu ulogu ima numeričko modeliranje tsunamija. Modeliranjem se može reproducirati vrijeme dolaska tsunamija u pojedinu točku, prostorna raspodjela razina mora i brzina struja te raspon i visina poplavlivanja obale [4]. Mogu se modelirati zabilježeni kao i hipotetski tsunamiji. Potonji se najčešće modeliraju kako bi se procijenio stupanj opasnosti od tsunamija na određenom području.

Poželjno je da numerički model može vršiti izračune na različitim skalama. Za preoceansko širenje potrebna je velika domena manje rezolucije, dok je za razmatranje efekata blizu obale, posebno upada vala na obalu i zapljuskivanja, potrebna manja domena veće rezolucije [4].

U ovom radu cilj je što preciznije modelirati tsunami koji se dogodio u Crnoj Gori 15. travnja 1979., a kako bismo što bolje shvatili mehanizam njegova nastanka, širenje i poplavlivanje obale.

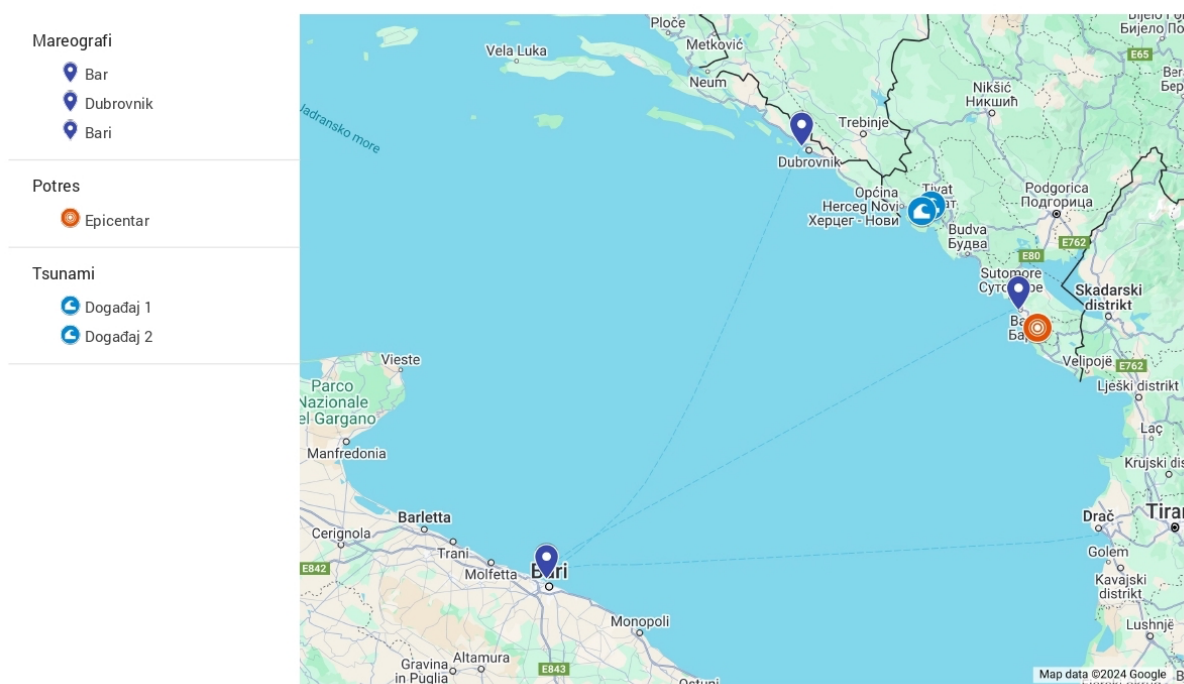
2 Materijali i metode

2.1 Mareogrami i ostali zapisi

Među dostupnim zapisima o ovom tsunamiju su mareogrami, koji su primarni materijal za evaluaciju rezultata simulacije, te novinski članak Večernjeg lista koji donosi svjedočanstva ljudi o ovom događaju na pojedinim mjestima. Mareogrami predstavljaju kontinuirane zapise razine mora mjerene, u ovom slučaju, pomoću mehaničkih analognih mareografa. Mareografi koji su zabilježili ovaj tsunami, a s kojih imamo mjerenja nalaze se kod Bara (Crna Gora), Dubrovnika (Hrvatska) i Barija (Italija). Njihove koordinate su:

- Bar (42.09 °N, 19.08 °E)
- Dubrovnik (42.66 °N, 18.06 °E)
- Bari (41.14 °N, 16.86 °E)

Na slici 2 prikazane su lokacije mareografa, lokacija epicentra (po Globalnom katalogu potresa [5]) i lokacije razaranja tsunamija (Boka kotorska) po svjedočanstvima iz novinskog članka.



Slika 2. Lokacije mareografskih postaja (Bar, Dubrovnik i Bari), epicentra potresa i razaranja tsunamija (po svjedočenju ljudi).

Mareogrami se mogu digitalizirati kako bi se računalno mogla izvršiti analiza rezultata. Mareogrami su digitalizirani korištenjem programa „GetData Graph Digitizer“. Digitalizirani podatci interpolirani su u vremenu kako bi se dobio niz s 1-min podacima. Digitalizirani podatci, osim tsunamija, sadržavaju i oscilacije dužih perioda, prvenstveno plimne oscilacije. S obzirom na to da numeričkim modelom nisu simulirane plimne oscilacije, iz digitaliziranog

niza filtriranjem su uklonjene sve oscilacije perioda dužeg od 4 h. Korišten je Kaiserov filter [9] s periodom odsijecanja od 4h, čiji se koeficijenti prozora računaju preko:

$$w(n) = \frac{I_0\left(\beta\sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N} - 1\right)^2}\right)}{I_0(\beta)}, \quad 0 \leq n \leq N,$$

gdje je I_0 nulti red modificirane Besselove funkcije prve vrste, N broj uzoraka, a β parametar za kontrolu oblika prozora. Tako filtrirani zapis može se usporediti s rezultatima simulacije. Usporedba se tada, osim vizualno, može provesti i računanjem korijena srednje kvadratne pogreške (eng. Root Mean Square Error, RMSE), računanjem perioda dominantnih mjerenih i simuliranih valova (primjerice primjenom spektralne analize), te računanjem visina i vremena dolazaka valova.

2.2 Numerički model

Simulacije tsunamija radio sam u programskom paketu COMCOT [4] koji je napisan u programskom jeziku Fortran. COMCOT je skraćenica za Cornell Multi-grid Coupled Tsunami modeling package. To je programski paket za simuliranje tsunamija napisan na Sveučilištu Cornell. Za numerički izračun razina i brzina mora u točkama domene ovaj model koristi modificiranu preskočnu shemu metode konačnih elemenata. Izračune vrši u kartezičkim i sfernim koordinatama. U dubljem moru na globalnim skalama prikladne su sferne koordinate zbog Coriolisove sile. Valna duljina je puno veća od dubine mora, a valna visina puno manja pa se zanemaruju efekti trenja, a jednadžbe su linearne:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} &= -\frac{\partial h}{\partial t}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ &= 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP &= 0, \end{aligned}$$

gdje je η razina mora, P i Q komponente volumnog toka u x i y smjeru, φ i ψ geografska širina i dužina, R radijus zemlje, g ubrzanje sile teže, h dubina mora, a f koeficijent Coriolisove sile.. U plićem moru valna duljina se skraćuje, a visina povećava pa dolaze do izražaja nelinearni članovi povezani s trenjem s dnom i miješanjem mora. Coriolisova sila i disperzija postaju zanemarive pa su jednadžbe u kartezičkim koordinatama:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} &= -\frac{\partial h}{\partial t}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x &= 0, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0,$$

gdje je H ukupna dubina mora, a F_x i F_y trenje s dnom u x i y smjeru.

Kao što mu ime sugerira, COMCOT ima mogućnost korištenja ugniježdenih dinamički povezanih domena kako bi se mogla izvršavati simulacija na različitim prostornim skalama i položajima. Uzima u obzir i efekte disipacije energije u fluidu i trenja s morskim dnom [4].

COMCOT uključuje različite mehanizme nastanka tsunamija u simulaciji. Moguće je započeti simulaciju pomakom morskog dna, pomakom površine mora ili eksplicitnim zadavanjem početnih uvjeta tsunamija [4]. Odabir ovisi o načinu nastanka stvarnog tsunamija kojeg se želi modelirati, te o tome koji su nam podatci poznati. Potrebno je pronaći što vjerniji način modeliranja uzroka nekog tsunamija kako bi i sam modelirani tsunami bio što realističniji. U slučaju tsunamija uzrokovanog rasjedom ili klizištem (seizmički tsunamiji) logičan je odabir mehanizma pomak morskog dna. Zadavanjem parametara potresa program izračunava pomak morskog dna koji posljedično dovodi i do pomaka morskog stupca što je, fizikalno, početni uvjet za gibanje mora kao fluida. Osim zadavanja parametara potresa u jednom (početnom) trenutku, moguće je i simuliranje dinamike potresa kroz određeni period kroz implementaciju zasebnih segmenata rasjeda [4].

Ovdje sam odabrao jednostavniju metodu za zadavanje početnih uvjeta potresa, a to je zadavanje spomenutih parametara rasjeda u početnom trenutku, nakon čega počinje simulacija dinamike mora. Parametre rasjeda sam mijenjao kroz niz simulacija, a kako bih što vjernije simulirao mjerene valove tsunamija. Kvalitetu simulacije sam određivao računanjem RMSE odstupanja i vizualnim pregledom grafova.

U svom diplomskom radu nisam koristio dodatne ugniježdene domene već se cijela situacija odvija na jednoj domeni koja prekriva Jadransko more. Datoteku s batimetrijom za odabrano područje moguće je preuzeti sa stranica Opće batimetrijske karte oceana - GEBCO [6]. Rezolucija preuzete batimetrije je $10^\circ \times 7^\circ$ što otprilike odgovara rezoluciji od 855 km x 780 km u smjeru istok-zapad, odnosno sjever-jug.

U slučaju kad je simulirana visina vala veća od dubine mora može doći do pucanja modela [4]. Ovaj problem može se riješiti na dva načina. Ako se želi promatrati utjecaj ponašanja vala blizu obale i zapljuskivanja, što posebno ima smisla ako se na tom području postavi ugniježđena domena veće rezolucije, COMCOT ima opciju izračuna sušenja i poplavljanja (tzv. „dry and wet“). Ovdje sam odabrao jednostavniju opciju u kojoj se svaka dubina manja od 2 metra pretvara u dubinu od 2 metra, a kako bih osigurao da neće doći do nestabilnosti.

Tipovi rubnih uvjeta koji se nude standardni su tipovi rubnih uvjeta u numeričkim simulacijama dinamike. Jednostavniji tip rubnih uvjeta koji sam pokušao implementirati je otvoreni (eng. open) rubni uvjet. Ovaj rubni uvjet dopušta prolazak vala preko rubova domene

kao da tih rubova nema. Dinamika razine mora na rubovima računa se po teoriji linearnih dugih valova:

$$\eta = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{gH}},$$

gdje P i Q predstavljaju komponente volumnog toka kroz unutarnje rubove granične ćelije domene u x i y smjeru, g ubrzanje sile teže, a h dubinu mirnog mora u graničnoj ćeliji domene [4]. Međutim, pojavile su se nestabilnosti koje su uobičajene kod korištenja otvorenih rubnih uvjeta u simulacijama plitkog fluida s kompliciranijom batimetrijom [4]. Zato sam odabrao apsorpcijski (eng. absorb) rubni uvjet koji dinamici mora na rubovima dodaje apsorbirajuću shemu koja je dizajnirana na način da priguši oscilacije u određenoj zoni blizu rubova (eng. sponge zone) tako da odgovaraju onome što bismo očekivali. U kartezijevim koordinatama, linearne jednačbe za tu zonu su:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = -(\sigma_x + \sigma_y)(\eta - \eta_e),$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ = -\sigma_x(P - P_e),$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + fP = -\sigma_y(Q - Q_e),$$

gdje su η_e , P_e i Q_e rješenja na rubovima pod rubnim uvjetima bez apsorbirajuće sheme, a σ_x i σ_y apsorbirajući koeficijenti [4].

Vremenski korak u simulaciji postavio sam na 1 sekundu, a prostorni korak na 0.25 kutnih sekundi, što predstavlja domenu s točkama na udaljenosti od otprilike 400 metara. Vremenski korak za generiranje datoteka za izlaz postavio sam na 300 sekundi. Model u svakom koraku, u svakoj točki domene, računa visine razine mora te horizontalne komponente brzine. Također, za svaki puni sat model određuje maksimalne i minimalne vrijednosti visina razina mora simuliranih do tog trenutka.

2.3 Simulacije

U ovom radu napravio sam 12 simulacija koje sam označio brojem i po potrebi slovnim oznakom. Simulacije koje imaju istu lokaciju epicentra označene su istim brojem, a slovne oznake tada označavaju varijacije u ostalim parametrima.

Tijekom izvođenja simulacija, uočio sam da se prvi simulirani val tsunamija u Bariju bilježi u otprilike isto vrijeme kad i prvi mjereni val tsunamija (odnosno 40 min od početnog trenutka modela, tj. vremena potresa). Međutim, za sve simulacija, prvi simulirani val u Baru javlja se ~10-20 min kasnije nego mjereni. Kasnije u radu ću argumentirati da je ovaj pomak vjerojatno posljedica inicijalno krivo zadanog vremena na mareogramu, ili pomaka mareografa tijekom

potresa. S obzirom na napisano, za svaku simulaciju izračunao sam vremenski pomak koji treba napraviti u simuliranom nizu u Baru da se dobije najbolje slaganje (najmanji RMSE) s mjerenim nizom u Baru. Pri usporedbi simulacije i mjerenja u Baru, razmatrat ću preklapanje „pomaknutog“ simuliranog niza, s mjerenim nizom.

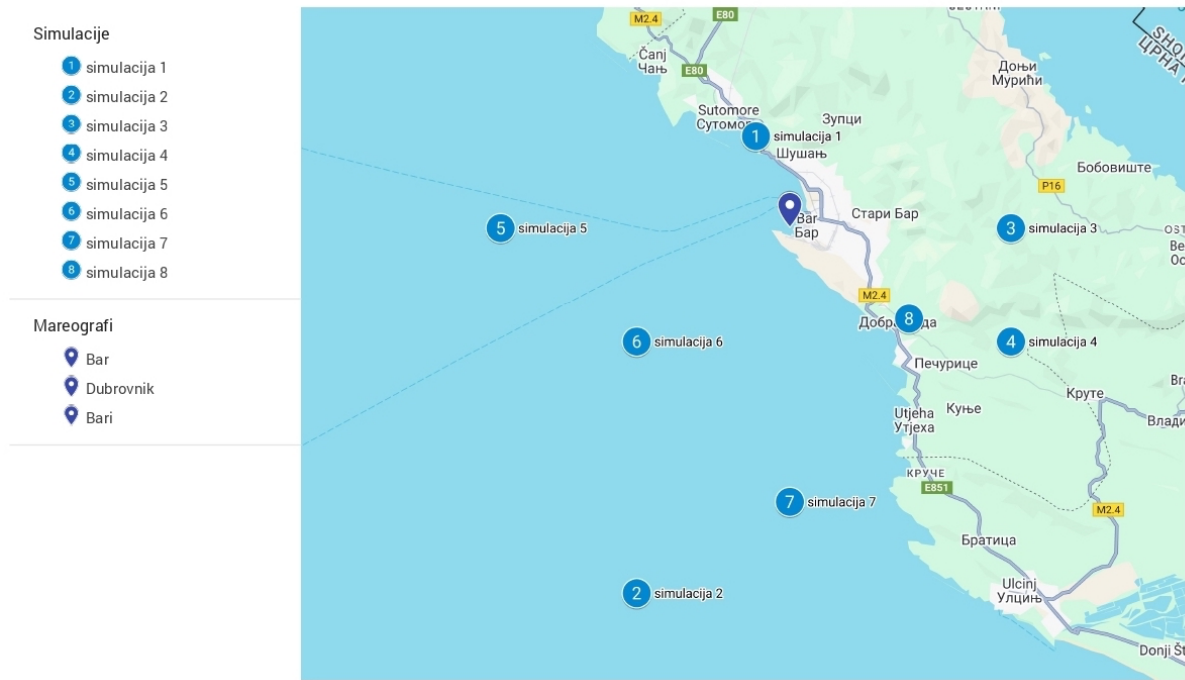
Tablica 1 sadrži vrijednosti svih devet promjenjivih parametara za svaku simulaciju. Devet promjenjivih parametara uključuju lokaciju epicentra (geografska širina i dužina), dubinu potresa (dubinu rasjeda), pomak plohe rasjeda, dimenzije plohe rasjeda (duljina i širina) te kutove rasjeda. Tri kuta rasjeda [10] su:

- smjer rasjeda (eng. Strike) - kut pružanja rasjeda po horizontalnoj ravnini,
- nagib rasjeda (eng. Dip) - kut između plohe rasjeda i horizontalne ravnine,
- smjer pomaka rasjeda (eng. Rake) - kut između smjera pomaka rasjeda i horizontalne ravnine.

Prve četiri simulacije temelje se na parametrima potresa i rasjeda opisanim u radu (C. Benetatos i A. Kiratzi [7]). Parametre ostalih simulacija sam zadavao s namjerom daljnjeg poboljšavanja simulacije koja se pokazala najboljom. Na slici 3 prikazane su sve lokacije epicentara označene brojevima pripadnih simulacija.

Tablica 1. Parametri simulacija.

	Epicentar		Dubina potresa (km)	Pomak rasjeda (m)	Ploha rasjeda				
	φ° N	ψ° E			Duljina (km)	Širina (km)	Strike $^{\circ}$	Dip $^{\circ}$	Rake $^{\circ}$
1	42.13	19.06	22	1.5	45	18	208	15	88
2	41.93	18.99	1	1.5	45	18	312	44	45
3	42.09	19.21	12	1.5	45	18	316	14	90
4	42.04	19.21	7	1.5	45	18	300	14	88
5	42.09	18.91	12	1.5	50	23	316	14	90
5a	42.09	18.91	22	1.5	50	23	316	14	90
5b	42.09	18.91	12	0.8	50	23	316	14	90
5c	42.09	18.91	12	0.6	50	23	316	14	90
6	42.04	18.99	12	0.6	50	23	316	14	90
7	41.97	19.08	12	0.6	50	23	316	14	90
8	42.05	19.15	12	0.6	50	23	316	14	90
8a	42.05	19.15	12	0.6	50	12	316	14	90



Slika 3. Lokacije epicentara svih simulacija označene brojevima.

3 Rezultati

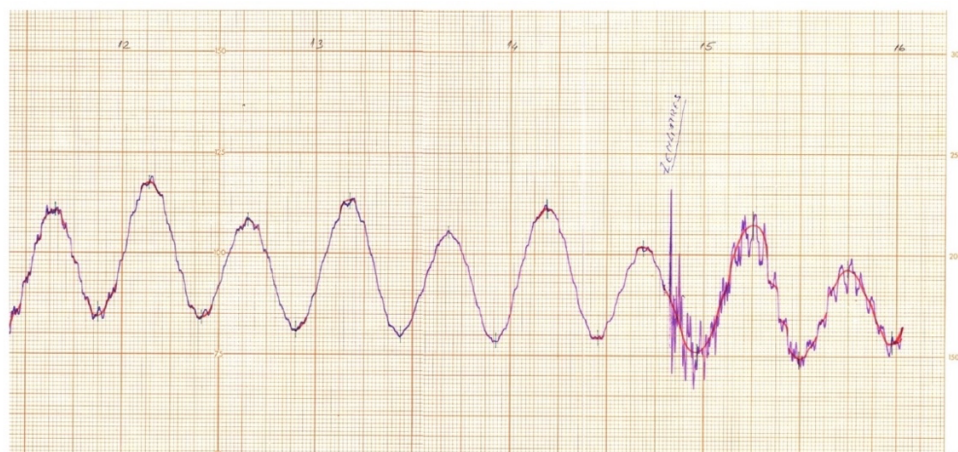
3.1 Analiza podataka

Potres koji je uzrokovao tsunami dogodio se u 7:19 sati po lokalnom vremenu. Lokaciju epicentra nije lako sa sigurnošću znati. Globalni katalog potresa [5] za epicentar uzima (42.03 °N, 19.17 °E) kod mjesta Peručice, Jadranski katalog tsunamija [3] uzima (42.02 °N, 19.07 °E), što je lokacija pod morem između Bara i Ulcinja. U radu (C. Benetatos i A. Kiratzi [7]) predloženo je nekoliko scenarija potresa, koji se između ostaloga razlikuju i po lokaciji epicentra (prva četiri scenarija iz tablice 1).

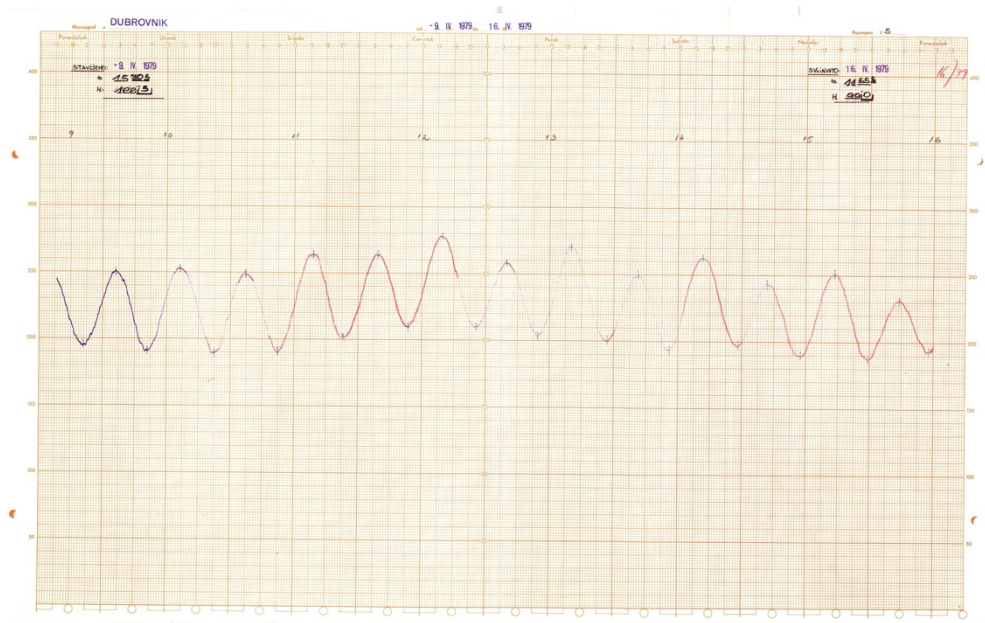
Vrijeme dolaska prvog brijega vala i visina najvišeg vala dani su u tablici 2 za mareografe Bar, Dubrovnik i Bari. Podatci su očitani s mareograma prikazanih na slikama 4, 5 i 6. Očitavanje mareograma nije uvijek lagano jer zapisi mogu biti teško čitljivi. U ovom slučaju mareogram iz Dubrovnika je posebno teško čitljiv te očitane vrijednosti treba uzeti s rezervom. Po očitanim vrijednostima čini se da je prvi brijeg vala došao u Bar pola sata nakon potresa, a u Dubrovnik nakon otprilike 25 minuta. U Bari je stigao otprilike sat vremena nakon potresa. Novinski članak sa slike 7 govori o razornom utjecaju tsunamija u Boki kotorskoj. Zbog nečitljivost mareograma iz Dubrovnika, digitalizirao sam samo mareograme iz Bara i Barija. Digitalizirani nizovi uspoređeni su sa simulacijama u Poglavljima 3.2-3.3.

Tablica 2. Vrijeme dolaska prvog brijega vala i visina najvišeg vala na mareografima.

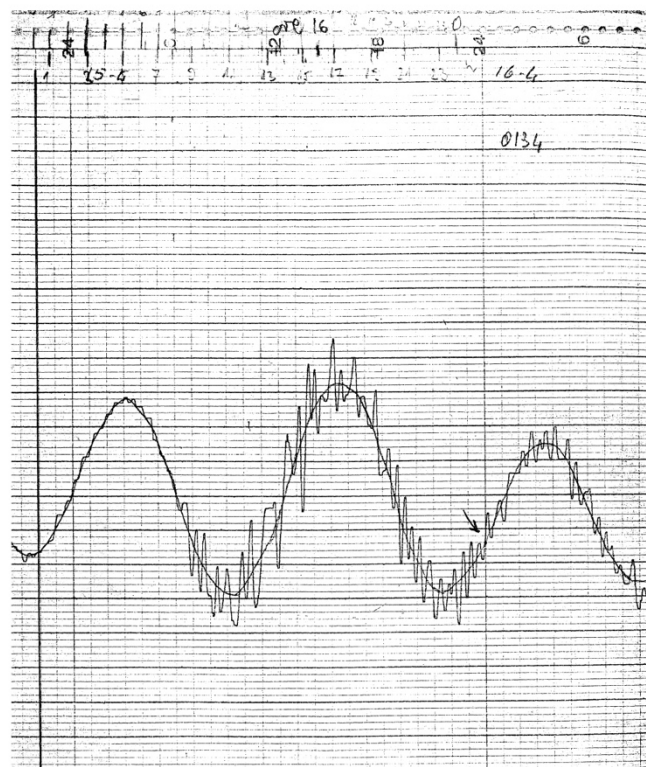
	Lokacija mareografa		Vrijeme dolaska prvog brijega vala (UTC+1)	Visina najvišeg vala (m)
	φ° N	ψ° E		
Bar	42.09	19.08	7:50	0.45
Dubrovnik	42.66	18.06	7:45	0.00-0.05
Bari	41.14	16.86	8:20	0.19



Slika 4. Mareogram iz Bara. Na vrhu su označeni datumi.



Slika 5. Mareogram iz Dubrovnika. Na vrhu su naznačeni datumi i sati.

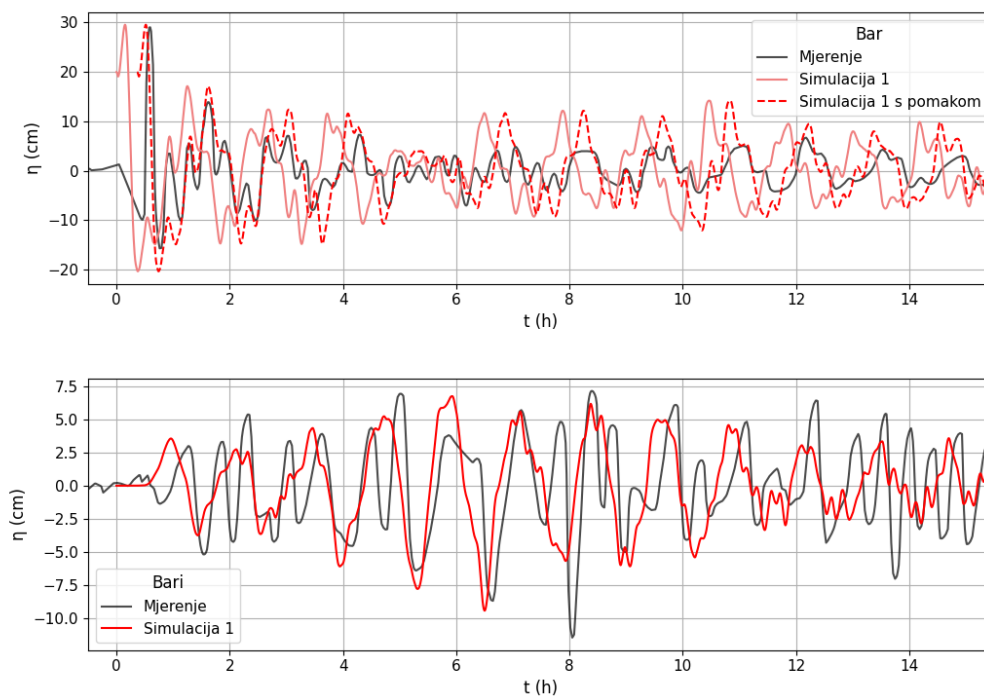


Slika 6. Mareogram iz Barija. Na vrhu su označeni datumi i sati.

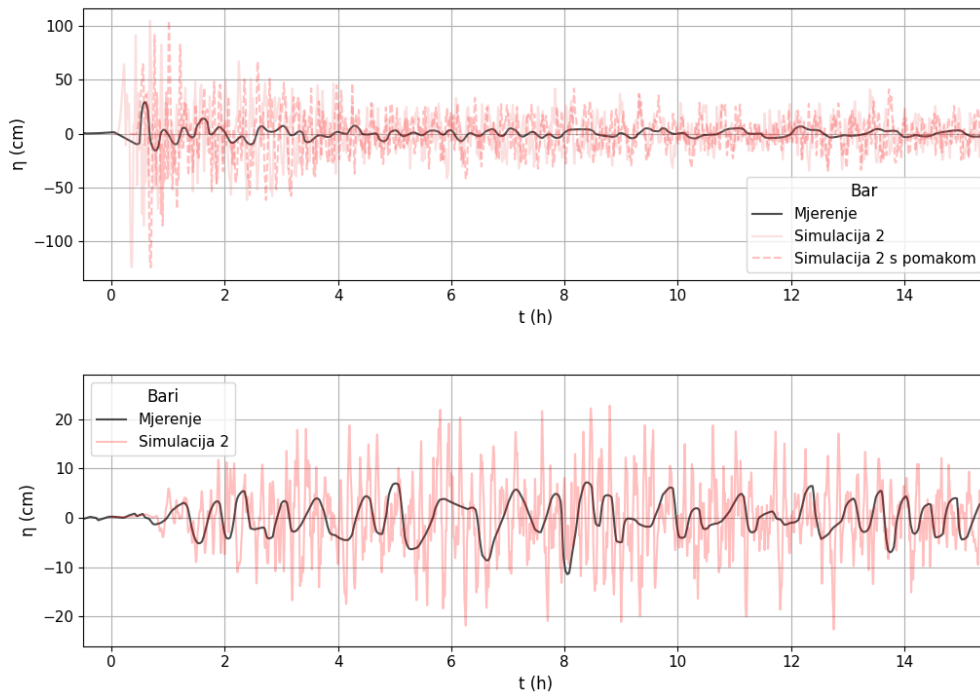
5	1.39	0.31	18.0146	6.7212	-24
5a	0.79	0.21	12.5779	5.2399	-26
5b	0.75	0.19	10.3276	4.3987	-24
5c	0.56	0.15	8.3488	3.9152	-24
6	0.57	0.13	8.6061	3.8107	-23
7	0.42	0.10	8.0019	3.7274	-23
8	0.45	0.11	7.9361	3.2302	-19
8a	0.47	0.09	7.9568	3.2819	-16

3.2 Numeričko modeliranje: početne simulacije

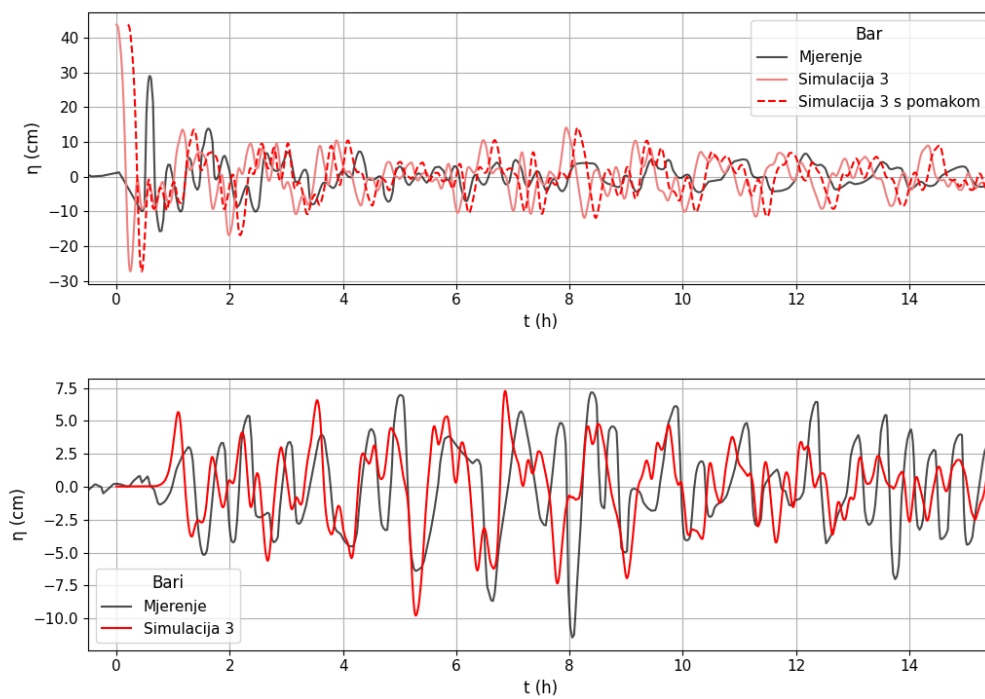
U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacija utemeljenih na početna četiri skupa parametara (Tablica 1). To su scenariji koje predlaže rad (C. Benetatos i A. Kiratzi [7]), a koji imaju potpun skup parametara koji su potrebni za simulaciju. Na Slikama 8-11 prikazani su mjereni i simulirani vremenski nizovi za Bar i Bari za početne četiri simulacije. Za svaki simulirani niz izračunat je, za Bar, optimalan pomak koji daje najbolje slaganje s mjerenjima pa je pomaknuti niz ucrtan crtkanom krivuljom.



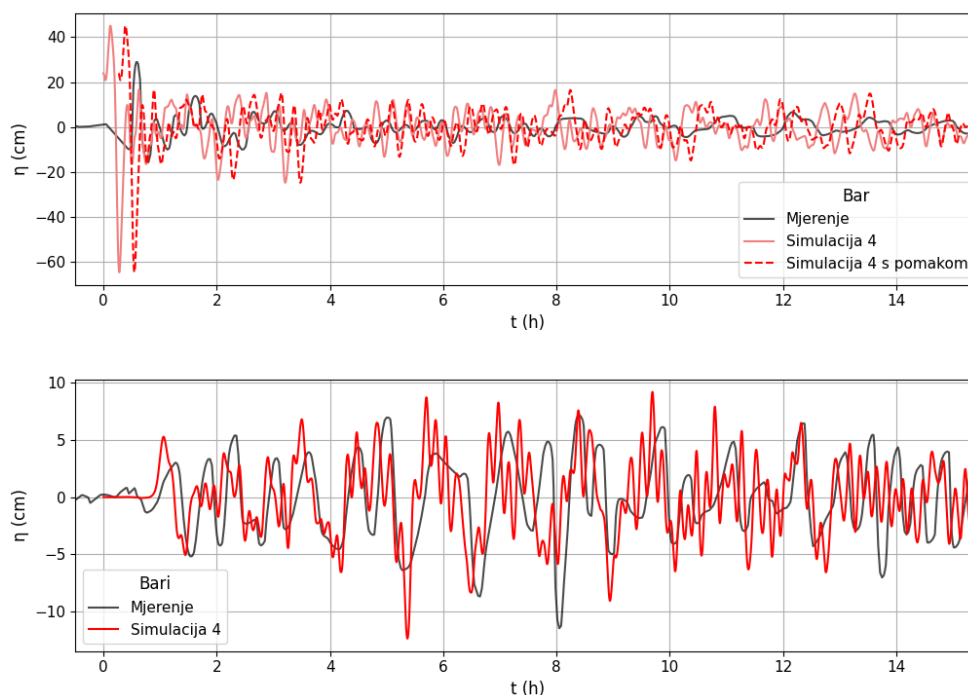
Slika 8. Usporedba simulacije 1 i mjenenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 9. Usporedba simulacije 2 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 10. Usporedba simulacije 3 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 11. Usporedba simulacije 4 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).

Vizualnim pregledom mogu se uočiti dva dominantna perioda na oba mjerena niza. Dulji period ima otprilike 5 titraja u 6 sati, što daje 72 minute, odnosno malo više od jednog sata. Kraći period ima otprilike 6 titraja u 3 sata, što daje 20 minuta. U usporedbi simulacija sa mjerenim nizom referirat će se na ova dva perioda (dulji i kraći period).

Na grafovima se vidi očita sličnost rezultata simulacije s mjerenim nizovima, uz određena odstupanja koja se razlikuju od simulacije do simulacije.

U prvoj simulaciji vidljivo je izvrsno početno poklapanje za Bar (mjerena i modelirana amplituda od ~30 cm i dobro podudaranje oscilacije). Nakon ~7 sati mjereni i simulirani niz počinju odstupati jedan od drugog jer amplituda simuliranog niza trne sporije od mjerene, pa naglo postaje dvostruko veća od stvarne. Oscilacije dužeg perioda (~72 min) simulirane su i za Bar i za Bari. Oscilacije kraćeg perioda nisu izražene u simulacijama, pogotovo za Bari gdje je simulirana krivulja na tim periodima glatka.

Druga simulacija nije dala zadovoljavajuće rezultate. Ova simulacija, koja se od drugih najviše razlikuje po maloj dubini potresa (1 km; Tablica 1), rezultira oscilacijama s amplitudom od preko 1 m u Baru, a preko 20 cm u Bariju. Najizraženiji period simuliranih oscilacija manji je od 10 minuta, što nije u slaganju s mjerenjima. Možemo zaključiti da se epicentar potresa najvjerojatnije nije nalazio na ovako maloj dubini.

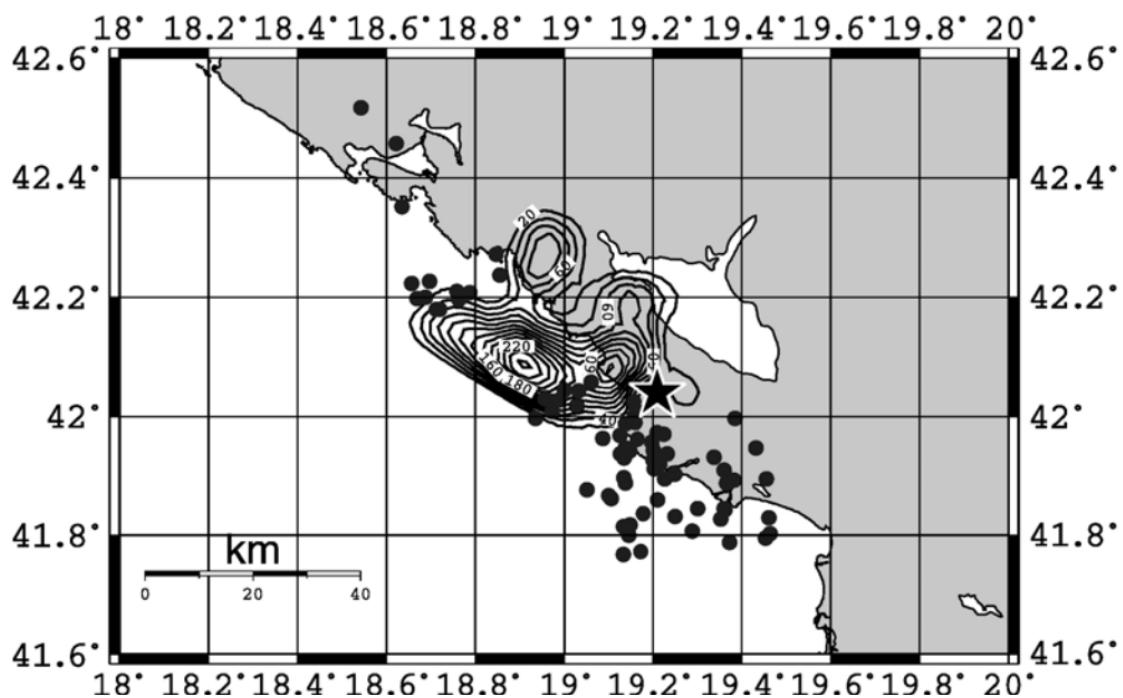
U trećoj simulaciji amplituda prvog vala prelazi 40 cm, dok u stvarnosti ne prelazi 30 cm. Ipak, u ostatku simulacije vidi se dobro vremensko slaganje (uz uvažavanje vremenskog pomaka u Baru) te dobro podudaranje amplituda. Amplituda simuliranog niza u Baru uglavnom ne prelazi 10 cm, za razliku od prve simulacije. U Bariju su prisutne i oscilacije kraćeg perioda, zbog čega je krivulja manje glatka nego kod prve simulacije, te se za nekoliko prvih valova tsunamija simulacija bolje slaže s mjerenjima od prve simulacije. Ovakva razmatranja podupire i izračun RMSE vrijednosti koje su za treću simulaciju manje nego za prvu (Tablica 3). Prva i treća simulacija razlikuju se po dubini (22 km u prvoj i 12 km u trećoj) i položaju epicentra, dok su ostali parametri isti.

U četvrtoj simulaciji također se vidi dobar oblik krivulje, ali su, suprotno nego kod prve simulacije, naglašene kratkovalne oscilacije perioda približno 10 minuta koje nisu vidljive na mjerenom nizu. Ovdje je opet prvi val u Baru jako visok, uz posebno naglašenu negativnu amplitudu koja, umjesto 15 cm, iznosi preko 60 cm. Četvrta simulacija od prve i treće se razlikuje po dubini epicentra (7 km u četvrtoj simulaciji) i položaju epicentra.

RMSE vrijednosti potvrđuju da je, od četiri početne simulacije, treća najbližnja mjerenjima. Prva i četvrta nisu daleko, ali ako izuzmemo prvi val u Baru, kod treće se i vizualno opažaju bolja preklapanja nizova nego kod prve i četvrte.

Faze prvog vala ni u jednoj simulaciji nisu pogođene. Kako bi pokušao postići još bolje slaganje simulacija i mjerenja uključit ću dodatne podatke o rasjedu iz [7].

3.3 Numeričko modeliranje: dodatne simulacije



Slika 12. Preferirani model distribucije rasjeda po [7]. Slika je preuzeta sa [7].

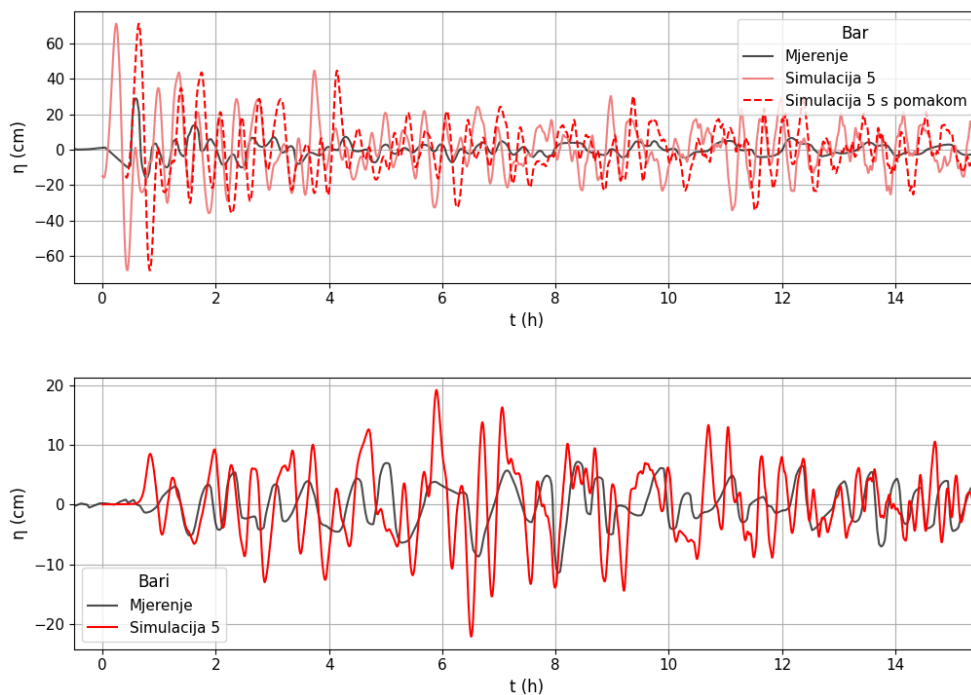
Slika 12 prikazuje preferirani model distribucije rasjeda za ovaj potres po (C. Benetatos i A. Kiratzi [7]). Pomoću njega ću pokušati pronaći bolje parametre simulacije. Stvarna ploha rasjeda nije pravilna kao u simulaciji, pa treba odabrati parametre koji će ju što bolje reproducirati. Prema tome, duljinu plohe rasjeda prilagođavam na 50 km, a širinu na 23 km. Vidljivo je da distribucija ima više lokalnih maksimuma, a onaj jugozapadno, na lokaciji (42.09 °N, 18.91 °E) mogao bi služiti kao novi epicentar u simulaciji, s obzirom na to da se nalazi po sredini duljine rasjeda. Ostale parametre postavljam na vrijednosti kao u trećoj simulaciji koja se do sada pokazala najboljom. Simulacije na ovoj lokaciji imaju brojčanu oznaku 5, a prilagođavanje ostalih parametara bit će praćeno slovnim oznakama a, b i c.

Na slikama 13-16 prikazani su rezultati simulacija 5-5c. Simulacija 5, koja se od simulacije 3 razlikuje po koordinatama epicentra te duljini i širini rasjeda (Tablica 1) rezultira mnogo većim amplitudama na uglavnom cijelom promatranom vremenskom intervalu (za usporedbu, amplituda prvog vala u Baru je oko 70 cm, umjesto 30cm), no period i faze simuliranih oscilacija relativno se dobro slažu s mjerenjima, što ukazuje da bi bilo dobro napraviti sličnu simulaciju, ali s manjom energijom potresa prenesenom u vodeni stupac.

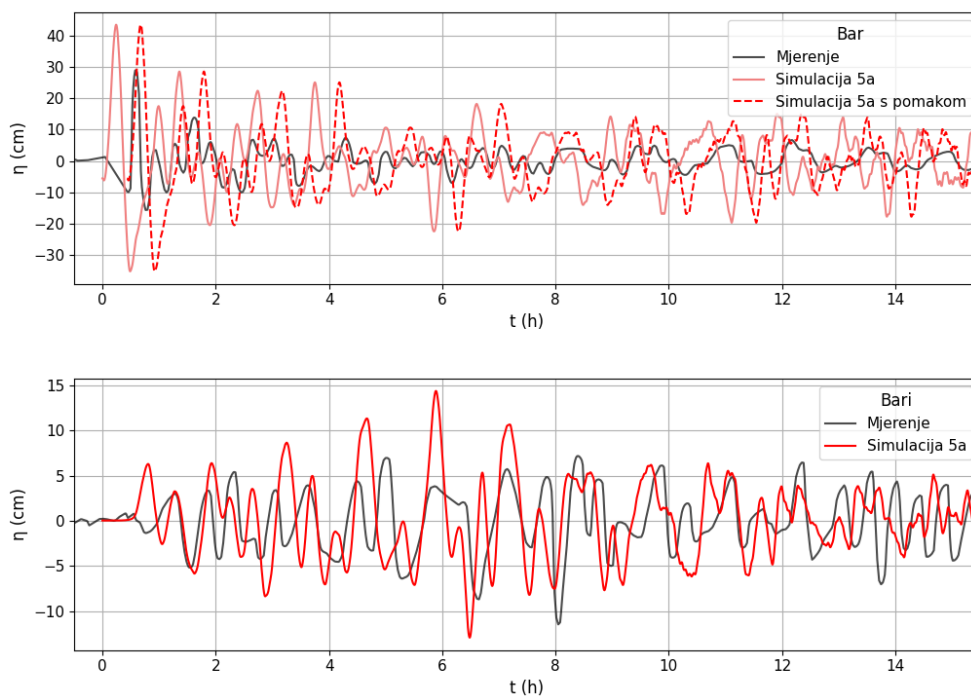
U simulaciji 5a mijenjam samo dubinu potresa na 22 km (kao što je bilo u simulaciji 1; što bi trebalo rezultirati i smanjenjem energije potresa prenesene u vodeni stupac). Postavljanje epicentra na veću dubinu smanjuje amplitude svih valova, a amplitudu prvog simuliranog vala u Baru za ~30%, točnije s ~70 cm (simulacija 5) na ~50 cm (simulacija 5a). U simulacijama 5 i 5a uočljivo je da drugi mjereni val u Baru nije simuliran, što je također bio nedostatak simulacije 1.

Sad vraćam dubinu na 12 km, a smanjujem pomak rasjeda kako bi dobio manje amplitude. S početnih 1.5 m taj parametar smanjujem na 0.8 m te tako pokrećem simulaciju 5b. Prvi val u Baru sada ima amplitudu koja je nešto manja od 40 cm (nasuprot izmjerenih ~30 cm).

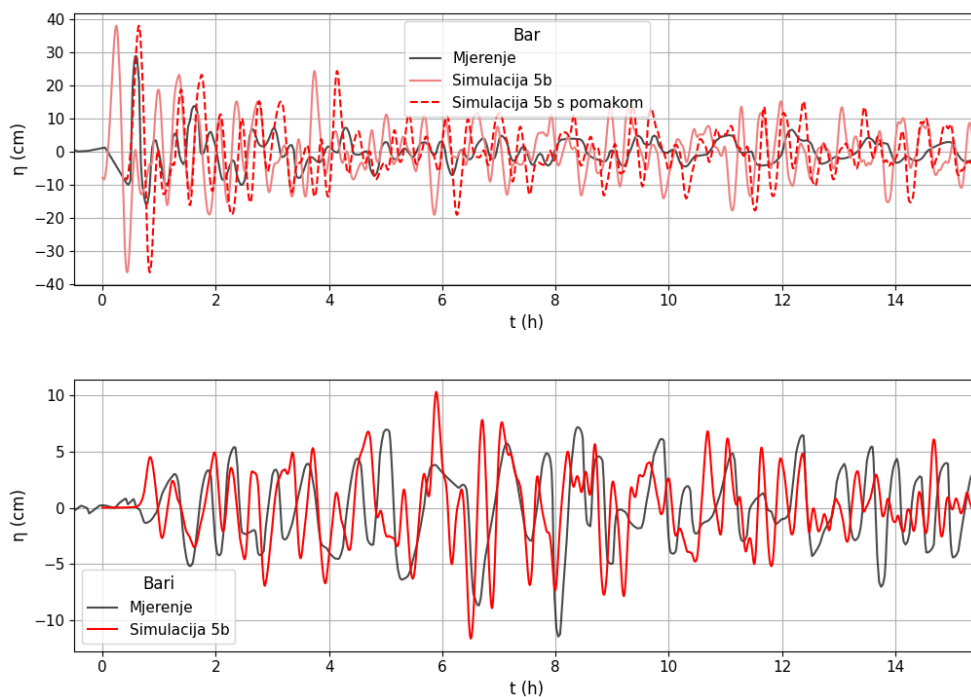
U simulaciji 5c pomak plohe rasjeda dodatno smanjujem na 0.6 m. Sada simulacija, do koje sam došao prilagođavanjem parametara, pokazuje slično slaganje za Bar kao simulacija 3. Najveća prednost ove simulacije je prvi val koji je puno realniji po amplitudi i fazi. Iako su vidljive nešto izraženije kratke oscilacije koje se ne slažu s mjerenjima, RMSE vrijednost za Bar daje prednost simulaciji 5c, u odnosu na dosad najbolju simulaciju 3. Za Bari, simulacija 5c izgleda lošije, što potvrđuje i RMSE (tablica 3).



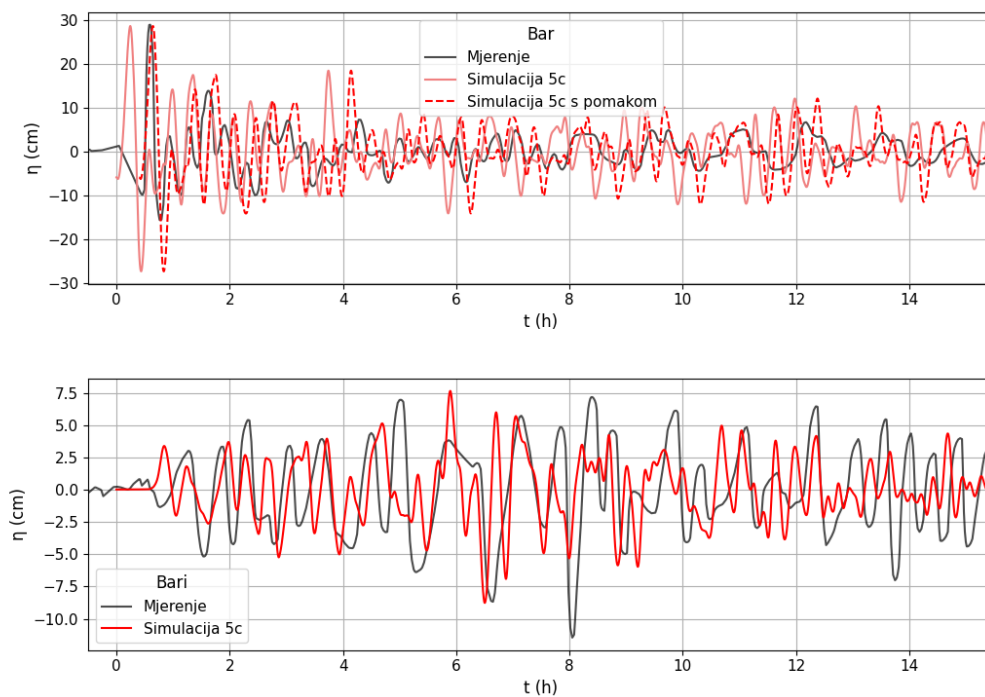
Slika 13. Usporedba simulacije 5 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 14. Usporedba simulacije 5a i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 15. Usporedba simulacije 5b i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).

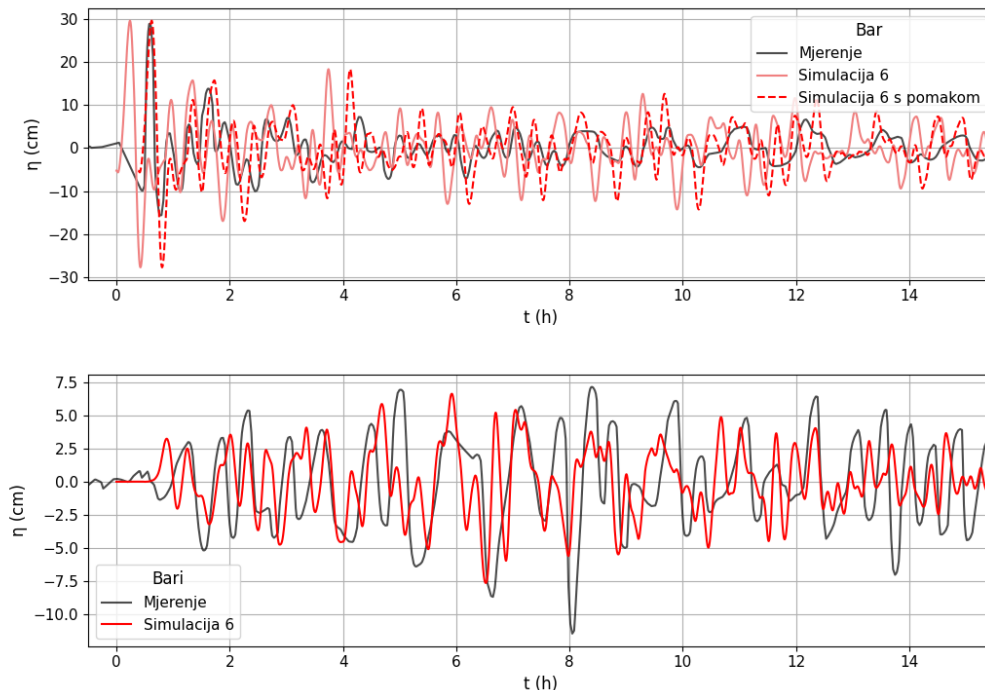


Slika 16. Usporedba simulacije 5c i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).

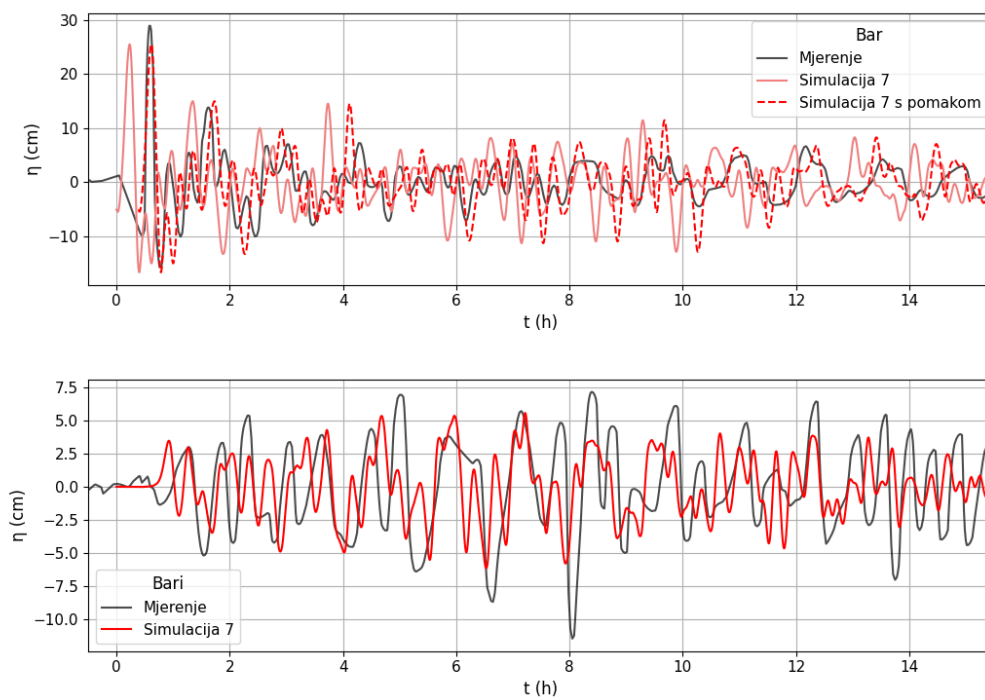
Kako bi vratio točnost koju je imala simulacija 3 za Bari, a zadržao poboljšanja koja je nova simulacija donijela za Bar napraviti ću simulacije s nekoliko novih lokacija epicentra, uz isti pomak plohe rasjeda (0.6 m). S obzirom na to da je distribucija rasjeda po (C. Benetatos i A. Kiratzi [7]), koji se proteže u smjeru sjeverozapad-jugoistok, više koncentrirana na jugoistočnom nego na sjeverozapadnom dijelu, može se pretpostaviti da ima smisla pomaknuti epicentar u simulaciji prema jugoistoku.

Na Slikama 17-20 prikazani su rezultati zadnje četiri simulacije. U simulaciji 6 epicentar je pomaknut desetak kilometara jugoistočno na (42.04 °N, 18.90 °E), a u simulaciji 7 još desetak kilometara jugoistočno na (41.97 °N, 19.08 °E). Za Bar, simulacije pokazuju minimalni napredak (RMSE je najmanji za simulaciju 7), a za Bari RMSE polako opada, ali je još uvijek veći nego kod simulacije 3. Iz ovoga je teško zaključiti je li pomicanje epicentra prema jugoistoku dalo dobre rezultate. Pomicanjem epicentra prema jugoistoku ipak se može primijetiti da reprodukcija faze prvog vala u Baru postaje točna.

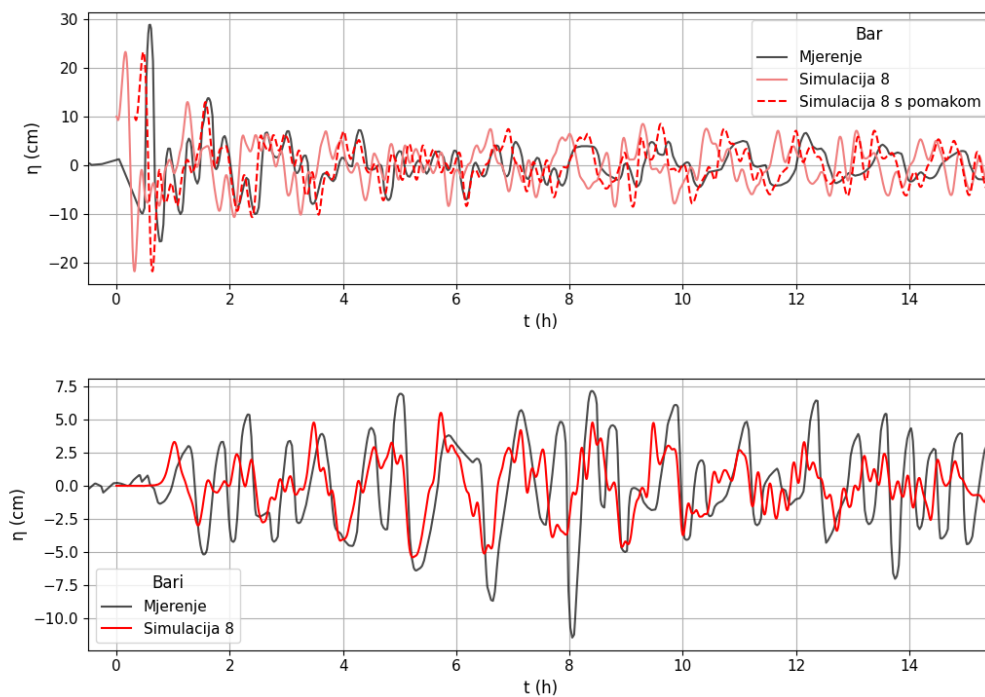
Kako bi dobio bolje rezultate za Bari, epicentar simulacije 8 postavljam na kopno, ali blizu mora, između epicentra posljednje simulacije 7 (koja je dala dosad najbolje rezultate za Bar) i simulacije 3 (koja je dala dosad najbolje rezultate za Bari) na (42.05 °N, 19.15 °E). Ova simulacija daje najniži RMSE za Bar i Bari. U Baru visina prvog vala odgovara mjerenoj, ali su brijeg i dol oko 5 cm niži. Vizualno podudaranje ostatka niza u Baru je bolje nego u prošlim simulacijama, i u Bariju je vidljivo poboljšanje.



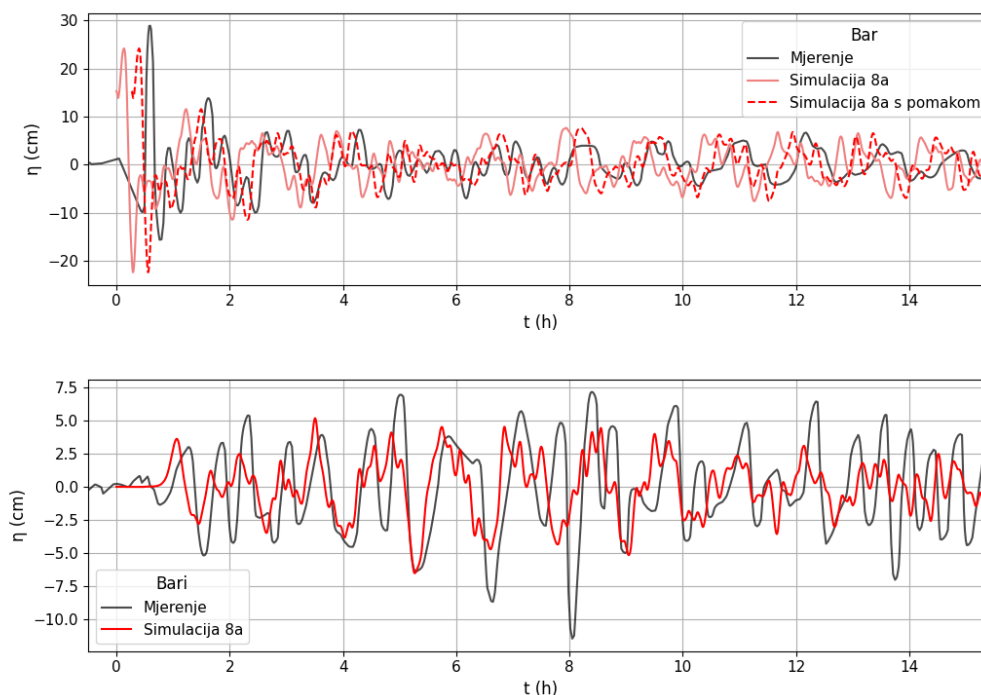
Slika 17. Usporedba simulacije 6 i mjerelog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 18. Usporedba simulacije 7 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



Slika 19. Usporedba simulacije 8 i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).



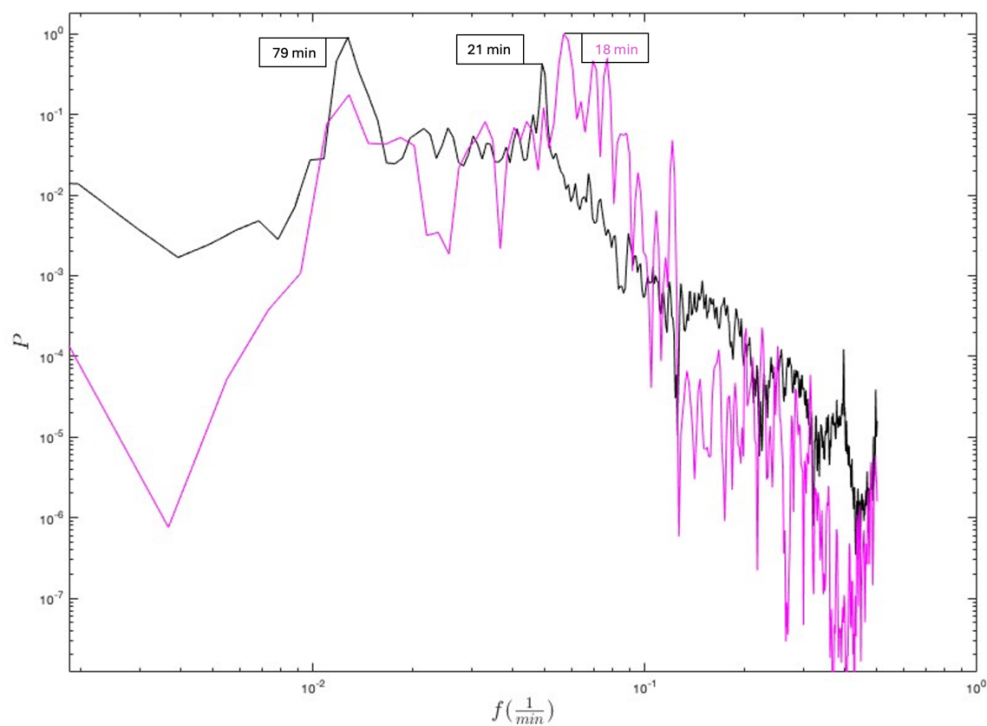
Slika 20. Usporedba simulacije 8a i mjerenog niza za Bar (gore) i Bari (dolje).

Iako je epicentar simulacije 8 (kao i simulacije 3) na kopnu, određeni dio rasjeda je ipak u moru. Kod simulacije 3 manji dio rasjeda ulazi u more, jer je epicentar daleko od obale. Zadnjom simulacijom (8a) pokušao sam dobiti prve valove u Bariju sličnije onima kod simulacije 3 tako da sam smanjio širinu plohe rasjeda na 12 km, kako bi manji dio rasjeda bio u moru. Na Slici 20 prvi simulirani valovi su naizgled nešto sličniji mjerenjima nego u prošloj simulaciji (8), ali ta razlika nije velika, a RMSE se čak neznatno povećao.

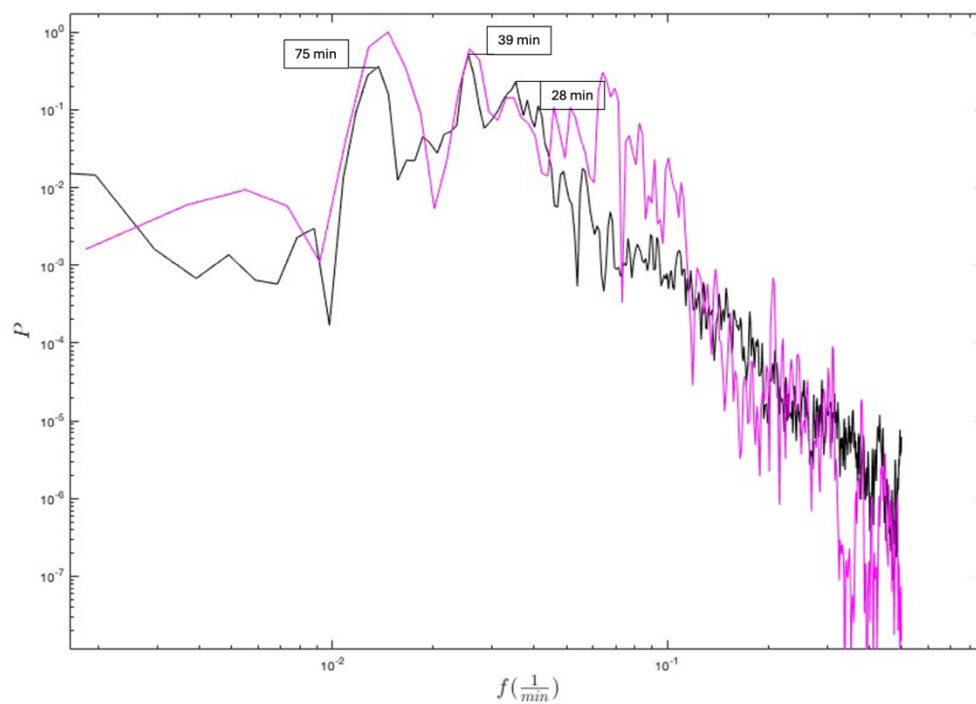
Simulacija 8, osim najboljeg poklapanja po RMSE vrijednosti, i vizualnim pregledom se može prihvatiti kao najbolja. Iako faza prvog vala u Baru nije dobro pogođena, omjeri amplituda i oblik krivulje čine se bolji nego kod ostalih simulacija. S obzirom na navedeno, odabirem simulaciju 8 kao najbolju simulaciju te u nastavku rada prikazujem dodatne karakteristike tsunamija reproduciranog simulacijom 8.

3.4 Karakteristike tsunamija reproduciranog simulacijom 8

Na slici 21 prikazan je spektar simulacije 8 i mjerenog niza za Bar, a na slici 22 za Bari. Na spektrima mjerenih nizova uočavaju se dva izražena perioda za Bar i tri za Bari. Zaokruženo iznose: 79 min i 21 min za Bar, a 75 min, 39 min i 28 min za Bari. Ranije sam u tekstu vizualno procijenio periode na 72 min i 20 min.



Slika 21. Spektar mjenog niza (crna krivulja) i niza simulacije 8 (ljubičasta krivulja) za Bar s naznačenim periodima vršnih frekvencija.



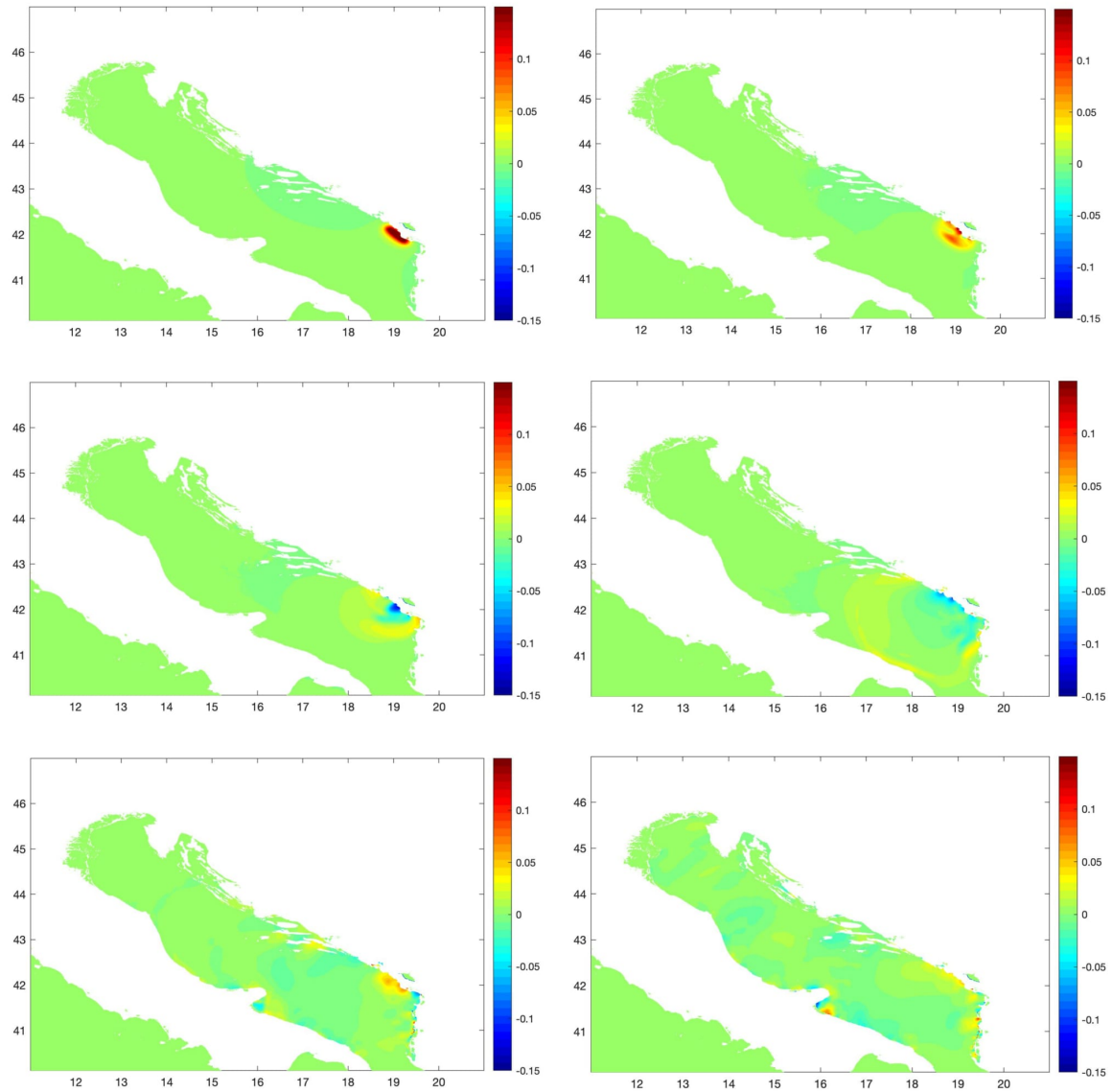
Slika 22. Spektar mjenog niza (crna krivulja) i niza simulacije 8 (ljubičasta krivulja) za Bari s naznačenim periodima vršnih frekvencija.

Iz slika 21 i 22 vidi se da su svi periodi osim najkraćeg perioda u Baru pogođeni simulacijom 8. Period koji je trebao biti 21 min u simulaciji je pomaknut na 18 min. Na periodima kraćim od ~10 min ne javljaju se izraženi šiljci ni u mjerenjima ni u simulaciji.

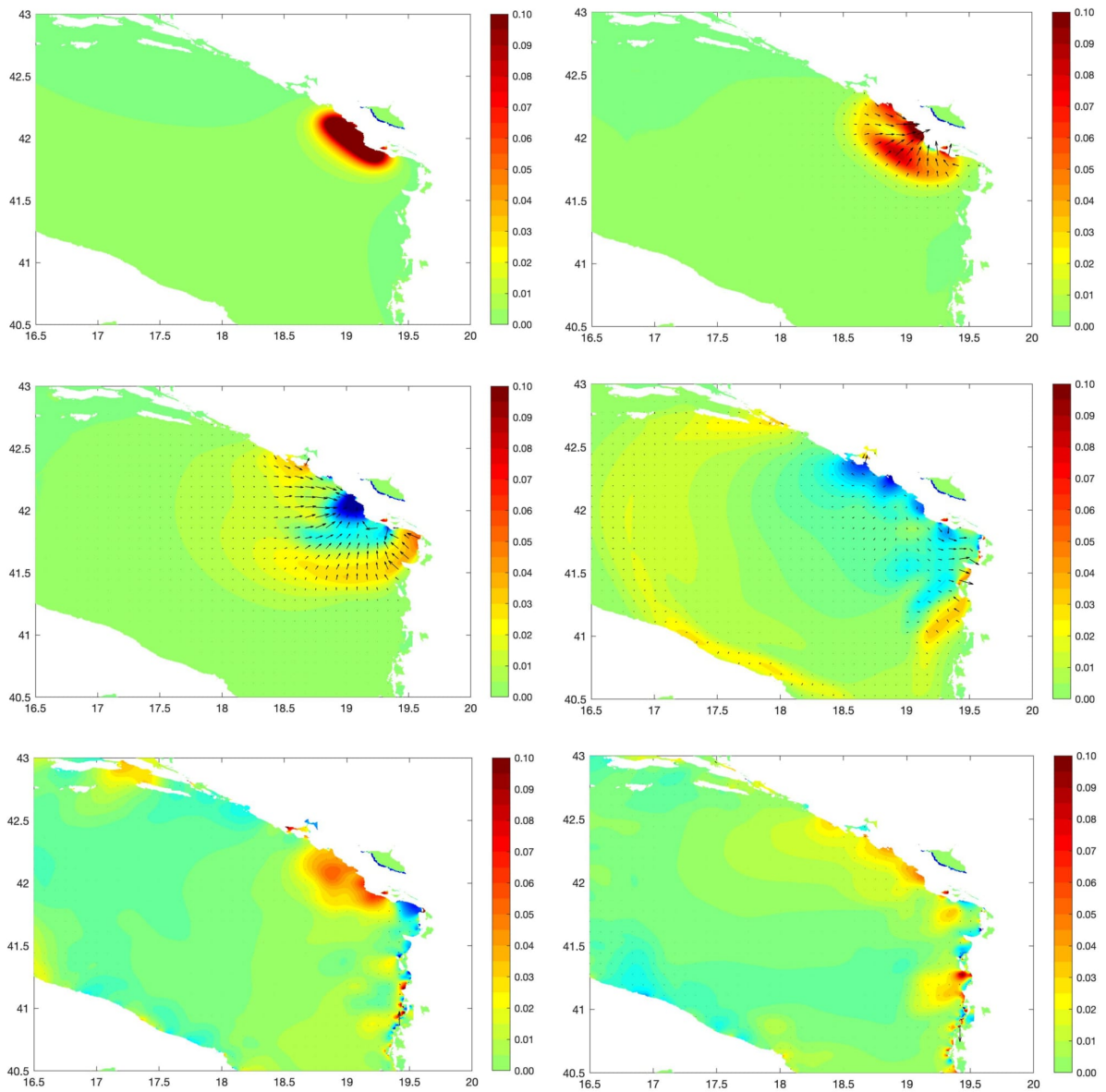
Na slici 23 prikazane su simulirane razine mora iz simulacije 8 za 6 vremenskih trenutaka od početka širenja tsunamija ($t = 0$ s) do 6 sati i 40 minuta ($t = 24\ 000$ s) nakon početka simulacije. U početnom se trenutku vidi područje na kojem je razina mora podignuta. U svim idućim trenucima vidi se širenje vala Jadranom, a sa zadnje slike je jasno da je 6 sati i 40 minuta bilo dovoljno da se tsunami proširi cijelim Jadranskim morem.

Na slici 24 prikazane su ponovno simulirane razine mora, ali samo na južnom Jadranu, skupa s vektorskim prikazom morskih struja, za iste trenutke kao i na slici 23. U početnom trenutku zadan je samo pomak razine mora pa još nema morskih struja. Na drugoj i trećoj podslici (nakon 600 s i 1500 s), jasno se vidi širenje tsunamija uz pojavu snažnih morskih struja usmjerenih uglavnom prema kopnu. Nakon 50 minuta (3000 s; četvrta podslika) kružni val smanjene amplitude se širi morem, a morske struje su oslabljene. Blizu obale još uvijek su aktivne jače struje koje imaju razne smjerove, negdje i vrtložne. U kasnijim trenucima struje su slabije i vektori na slici postaju neprimjetni.

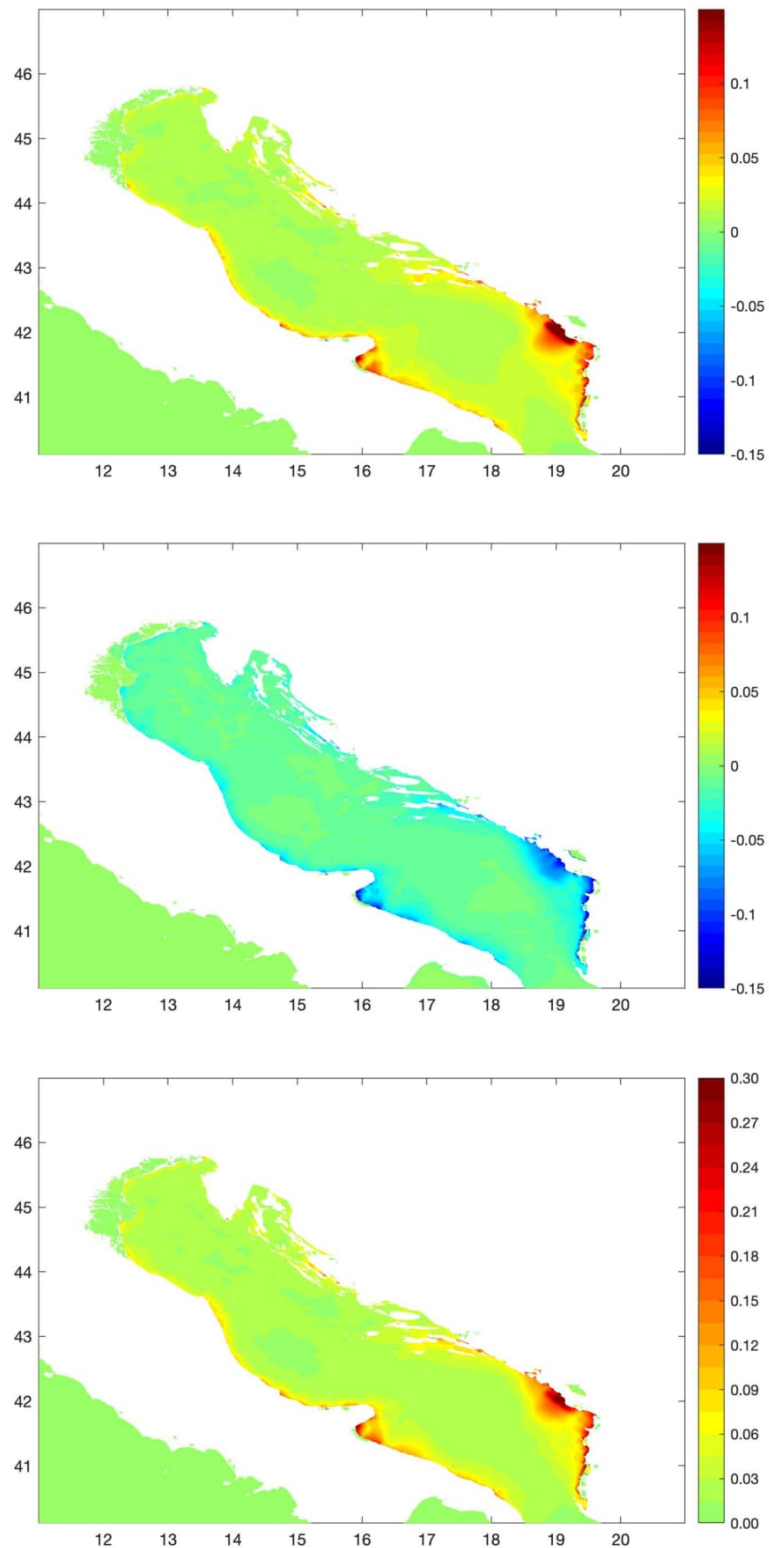
Na slici 25 prikazane su maksimalne i minimalne razine mora za svaku točku, kao i njihov raspon. Uz obalu su dobivene najveće visine valova, što je, zbog utjecaja oplićavanja na amplitudu tsunamija, očekivano. Iz ovog prikaza može se vidjeti koja su područja bila najviše pogođena od strane tsunamija od 15. travnja 1979. godine. U Boki Kotorskoj je vidljiva velika maksimalna amplituda, što se slaže sa svjedočanstvima iz novinskog zapisa (slika 7) o razornom djelovanju tsunamija na tom području. Po velikim amplitudama ističe se posebno obala Albanije te bi bilo dobro promotriti novinske zapise s tog područja, kao i s obale Italije (područje Barija).



Slika 23. Razine mora u simulaciji 8 (0 s, 600 s, 1 500 s, 3 000 s, 9 000 s, 24 000 s). Skala boja je dana u metrima.

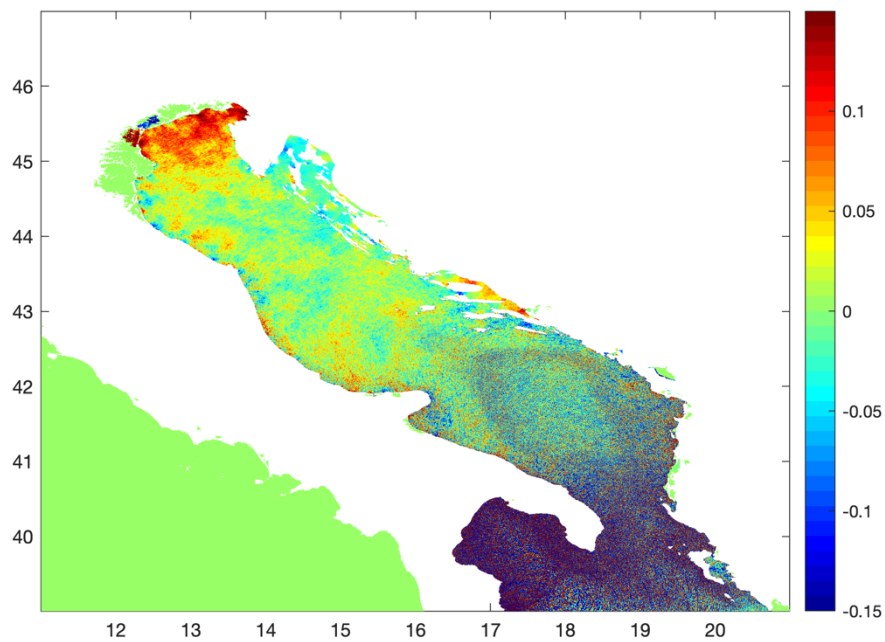


Slika 24. Razine mora s prikazom brzina morskih struja na južnom Jadranu u simulaciji 8 (0 s, 600 s, 1 500 s, 3 000 s, 9 000 s, 24 000 s). Skala boja je dana u metrima.

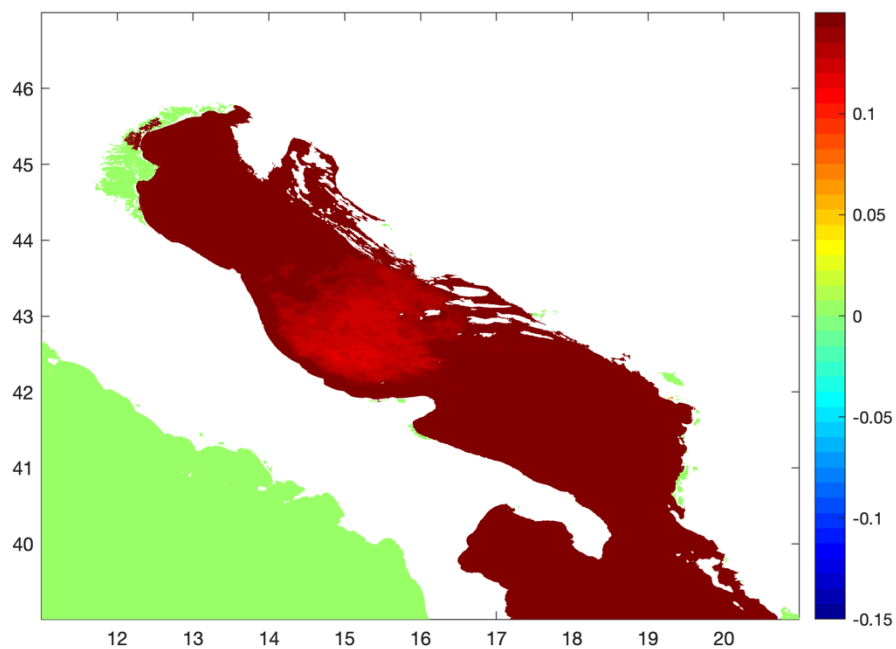


Slika 25. Maksimalne razine mora (gore), minimalne razine mora (sredina) i njihov raspon (dolje) u simulaciji 8. Skala boja je dana u metrima.

3.5 Utjecaj odabira rubnih uvjeta na rješenje



Slika 26. Trenutna simulirana razina mora nakon 40 sati dobivena korištenjem rubnog uvjeta "open". Skala boja je dana u metrima.



Slika 27. Maksimalne razine mora simulirane tijekom 48 sati uz rubni uvjet "open". Skala boja je dana u metrima.

U posljednjem poglavlju rezultata osvrnut ću se na odabir rubnih uvjeta simulacije. Na južnom dijelu domene (Jadranskog mora) nalazi se otvoreni kraj. U COMCOT-u je moguće odabrati rubni uvjet „open“ ili rubni uvjet „absorb“. Primjenom rubnog uvjeta „open“ dobije se divergencija rješenja, kako je vidljivo na slici 26 i slici 27. Na slici 26 prikazane su simulirane razine mora nakon čak 40 sati dobivene u simulaciji s uvjetom „open“. Vidi se da, što je područje bliže otvorenom rubu domene to rješenje više divergira. Analiza vremenskih nizova ukazuje na pojavu oscilacija vrlo kratkih valnih duljina. Ova rješenja su očito nestabilna.

Na Slici 27, koja prikazuje maksimalne razine mora tijekom 48 sati, vidi se da su se numeričke nestabilnosti s ruba proširile preko cijele domene. Primjenom rubnog uvjeta „absorb“ (koji je i korišten u ovom radu) rješava se problem. Rubni uvjet „absorb“ sprječava refleksije koje su posljedica toga što je valna duljina tsunamija velika u usporedbi s dubinom mora [4].

4 Diskusija i zaključci

Uspoređujući simulirane vremenske nizove razina mora sa mjerenim uočio sam da se u Baru redovito javlja vremensko odstupanje simuliranog od mjerenog niza. Za svaku simulaciju posebno računao sam RMSE između mjerenog niza i pomaknutog simuliranog niza pomičući pri tome simulirani niz za jednu po jednu minutu. Nakon što sam našao optimalni pomak, pripadni RMSE sam koristio za međusobnu usporedbu simulacija. Optimalni pomak za Bari se kretao između 16 i 26 minuta s medijanom od 22.5 minute. Za Bari je optimalni pomak nula za svaku simulaciju. Navedeno sugerira da je na mareogramu u Baru pogrešno naznačeno vrijeme mjerenja. Moguće je da je do pomaka u vremenu došlo prilikom postavljanja mareograma ili da sat na mareogramu nije radio pravilno, no također je moguće da je do pomaka mareograma „u vremenu“ došlo zbog trešnje prilikom potresa. Na mareogramu iz Bara vidljiv je prekid u krivulji koji traje maksimalno pola sata, a počinje otprilike u vrijeme potresa. U mom digitaliziranom grafu tog mareograma taj je prekid spojen linijom. S obzirom na to da je mareograf bio smješten jako blizu epicentra, moguće je da je zbog potresa mareogram „preskočio“ 20-ak minuta.

Prve četiri simulacije temeljene na [7] dale su rezultate koji već sugeriraju dobar smjer potrage za parametrima potresa. Simulacija 2 u tome je iznimka jer je pokazala titranje s valnom visinom koja prelazi 2 metra i periodom kraćim od 10 minuta, što nije u skladu s mjerenjima. Ta simulacija je napravljena po parametrima koje sugerira [7] za jedan od scenarija (dubina potresa samo 1 km). Ukoliko je taj scenarij realan, mogli bismo očekivati i da je takav tsunami moguć. Prva simulacija najbolje je reproducirala prvi val u Baru, ali je imala problema sa sljedećih nekoliko valova i sa nedostatkom perioda od 20 minuta u Baru. Treća simulacija nije dobro reproducirala prvi val u Baru, ali je imala bolje slaganje na ostatku niza i niži RMSE.

Skupom simulacija pod brojevnom oznakom 5 došlo se do bolje reproducirane faze i amplitude prvog vala u Baru. Ove simulacije su ipak lošije reproducirale val u Bariju. Simulacije koje su imale potres na velikoj dubini nisu mogle reproducirati drugi val u Baru pa sam odlučio dubinu potresa postaviti na 12 km, kao što je bilo kod treće simulacije.

Sa zadnje četiri simulacije pokušao sam pronaći parametre koji će dobro reproducirati prvi val i periode oscilacija. Simulacija 8 koju sam postavio na kopno, blizu obale, pokazala se najboljom. Ipak, faza prvog vala nije reproducirana dobro kao u prvoj simulaciji, niti prvi valovi u Bariju jednako dobro kao u trećoj. Spektralna analiza je pokazala da su jako dobro reproducirani kratki i dugi periodi titranja, izuzev najkraćeg perioda u Baru koji je trebao biti 21 minutu, a u simulaciji iznosi 18 minuta.

Na prostornim prikazima širenja valova vidi se da je tsunamiju bilo dovoljno 6 sati i 40 minuta da se proširi cijelim Jadranom. Najviše su bili ugroženi obalni dijelovi koji nisu zaklonjeni otocima, ali i zaljevi, zbog plitkog mora. Tako se velika visina valova vidi i u Boki

Kotorskoj, što se slaže sa svjedočanstvima iz novinskog članka. Utjecaj tsunamija na određeni dio obalnog područja mogao bi se simulirati postavljanjem ugniježdene domene veće rezolucije [4].

Kako bi se pronašla simulacija koja je najbolja po svim mjerilima trebalo bi se provesti opsežnije istraživanje u kojem bi se sustavno pratili utjecaji promjene različitih parametara na deterministički ili stohastički način [8]. Također, mogla bi se napraviti realnija simulacija potresa, tako da se simulira dinamika pucanja rasjeda kroz vrijeme.

5 Literatura

- [1] M. Orlić: *Uvod u fizičku oceanografiju*. Zagreb, Element, 2022.
- [2] David R. Tappin: *The generation of tsunamis*, 2017
- [3] *Adriatic tsunami catalogue*, URL: <https://projekti.pmfst.unist.hr/floods/tsunamis/>
- [4] X. Wang, W. Power: *COMCOT user manual*, 2011
- [5] *ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009)*, URL: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/index.php>
- [6] *GEBCO*, URL: <https://www.gebco.net/>
- [7] Christoforos Benetatos, Anastasia Kiratzi: *Finite-fault slip models for the 15 April 1979 Montenegro earthquake and its strongest aftershock*, 2006
- [8] K. Satake: *Effects of uncertainty in fault parameters on deterministic tsunami hazard assessment: examples for active faults along the eastern margin of the Sea of Japan*, 2022
- [9] *MATLAB Documentation*, URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/kaiser.html>
- [10] E. Tarbuck: *Earth: An introduction to physical geology*. Pearson Prentice Hall, 2008