Međudjelovanje atmosfere i mora, oblikovanje valnih paketa na otvorenom moru i poplavljivanje obalnog područja

Bubalo, Maja

Doctoral thesis / Disertacija

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:519082

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Maja Bubalo

MEĐUDJELOVANJE ATMOSFERE I MORA, OBLIKOVANJE VALNIH PAKETA NA OTVORENOMU MORU I POPLAVLJIVANJE OBALNOGA PODRUČJA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Maja Bubalo

MEĐUDJELOVANJE ATMOSFERE I MORA, OBLIKOVANJE VALNIH PAKETA NA OTVORENOMU MORU I POPLAVLJIVANJE OBALNOGA PODRUČJA

DOKTORSKI RAD

Mentori:
prof. dr. sc. Mirko Orlić
dr. sc. Ivica Janeković

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

Faculty of Science
Department of Geophysics

Maja Bubalo

ATMOSPHERE-SEA INTERACTION, FORMATION OF WAVE PACKETS IN THE OPEN SEA AND FLOODING OF THE COASTAL AREA

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:
Prof. Mirko Orlić
Dr. Ivica Janeković

Zagreb, 2019

Ovaj rad u potpunosti je izrađen na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor prof. dr. sc. Mirko Orlić je redoviti profesor u trajnom zvanju na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor dr. sc. Ivica Janeković je pridruženi profesor-istraživač na Sveučilištu Zapadne Australije (UWA) i znanstveni savjetnik na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu.

Zahvalna sam mentorima na brojnim savjetima, ali i strpljenju i potpori bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć. Također sam zahvalna i kolegama, ne samo na moralnoj potpori u ključnim trenucima, već i na raspravama koje su mi pomogle riješiti mnoge sitne, frustrirajuće probleme tijekom istraživanja. Posebno se zahvaljujem roditeljima koji su uvijek spremni pomoći i podržati me bez obzira u kakve se pothvate upuštam.

I na kraju, hvala Vedranu koji je bezrezervno vjerovao u mene.

Sažetak

Ovo istraživanje bavilo se meteorološkim tsunamijima – oscilacijama morske razine čiji se periodi mjere u minutama i meteorološkog su porijekla – i sastojalo se od tri dijela: u prvom je dijelu provedeno testiranje numeričkih modela kako bi se odredila njihova sposobnost reprodukcije Proudmanove rezonancije, a u drugom i trećem je odabrani model korišten za reprodukciju povijesnih događaja meteotsunamija u Jadranu.

Testiranje je provedeno koristeći tri modela, od kojih su dva bili modeli konačnih elemenata (ADCIRC i SCHISM), a jedan model konačnih razlika (ROMS). Modeli su testirani na idealiziranom bazenu uniformne dubine iznad kojeg su numerički nametnuti putujući poremećaji tlaka zraka oblika sinusa ili „boxcar" funkcije, različitih valnih duljina i brzina. Rezultati su pokazali da sinusni poremećaj tlaka zraka višestruko većih horizontalnih dimenzija od dimenzija bazena uzrokuje pojavu Chrystalove rezonancije, odnosno seša u bazenu, dok manji sinusi i „boxcar" funkcije bilo kojih dimenzija uzrokuju pojavu Proudmanove rezonancije, odnosno rezonantno pojačanih dugih valova („long period waves"). Rezultati najbliži analitičkim rješenjima dobiveni su korištenjem modela ROMS. Za daljnja istraživanja ipak je odabran model ADCIRC zbog metode diskretizacije pomoću konačnih elemenata kako bi se u zaljevima od interesa mogla koristiti čim finija rezolucija bez ugnježđivanja domena. SCHISM nije odabran zbog kompliciranijeg CFL uvjeta u odnosu na ADCIRC.

Nakon što je odabran model za daljnji rad, provedene su simulacije četiri povijesna događaja meteotsunamija u Jadranu (Vela Luka 1978., Široka 2007., Mali Lošinj 2008. i Stari Grad 2010.), uz korištenje definirane minimalne dubine u modelu. Za sva četiri slučaja model je pokazao povećane valne visine u zaljevima od interesa, ali ni u jednom nije uspješno reproducirana ekstremna valna visina.

Za dva od četiri slučaja (Vela Luka i Stari Grad) zatim su napravljene simulacije koje su uključivale poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže. Novi set simulacija za Velu Luku povećao je modeliranu valnu visinu u području gdje je iznosila 2,1 m na 3,7–4,1 m, a u području gdje je iznosila 5,5 m na 7,5 m (opažena je iznosila oko 6 m). Uključivanje poplavljivanja i osušivanja u model dodaje procese koji se odvijaju na granici mora i kopna i u svim je simulacijama dovelo do povećane valne visine; ovakav rezultat implicira da je za modeliranje ekstremnih oscilacija poželjno u modelu omogućiti poplavljivanje i osušivanje.

Simulacije za Stari Grad također su dale veće valne visine uključivanjem poplavljivanja i osušivanja čvorova mreže, ali nije uspješno reproducirana opažena valna visina od oko 2 m. U literaturi je prethodno pretpostavljeno da je Stari Grad tada bio potopljen jer se meteotsunami superponirao na olujni uspor koji je već bio podigao razinu mora – ovaj rezultat to potvrđuje.

Ključne riječi: meteotsunami, Chrystalova rezonancija, Proudmanova rezonancija, Jadran, ADCIRC, SCHISM, ROMS, numeričko modeliranje, poplavljivanje i osušivanje

Expanded abstract

This study was focused on meteotsunamis – sea level oscillations with periods similar to those of tsunamis, but caused by meteorological phenomena – and consisted of three parts: first, three numerical models were tested on an idealised basin with synthetic atmospheric forcing and, then, one model was chosen to reproduce several historical meteotsunami events in the Adriatic in two different ways.

Models were tested using an idealised rectangular basin of uniform depth. An air pressure disturbance shaped like a sine wave or a boxcar function travelling over the basin was the only external forcing present in the simulations. Three numerical models were used – two finite element models, ADCIRC and SCHISM, and one finite difference model, ROMS. Two parameters were used to quantify results, wave height and energy.

Results show that for a sinusoidal disturbance with a wavelength twice the size of the basin or larger, Chrystal resonance develops in the basin causing seiches. The periods of the modelled seiches at the left and right sides of the basin are close to the basin's eigen period, especially when considering results obtained through maximum wave heights. All model results obtained through maximum energy tend to overestimate the periods. In the central part of the basin where the second mode is expected to be dominant, all the models overestimate the period regardless of the parameter used for calculation. That difference is explained by considering the analytical solution for sea surface elevation obtained from a 1D system of equations for a basin forced by a travelling sinusoidal air pressure disturbance. A sine wave with a wavelength shorter than the basin length causes Proudman resonance to occur. Although all the models give resonant speed close to the speed of free waves in the basin, none of the results is a complete match to the analytical solution. When the wavelength is the same as the basin length or only slightly larger, neither resonance can be seen clearly as a change in regime occurs. These simulations were then repeated for sine waves with the same wavelengths but doubled lengths (that is, two consecutive sine waves travelling over the basin). Results show that these air pressure disturbances transfer more energy into the sea and the seiche periods are closer to theoretical values but Proudman resonance is clearly visible for smaller wavelengths than it was before. While both sets of simulations have similar results, the double sine wave simulations have a more pronounced transition from one resonance to the other as well as a better representation of Chrystal

resonance whereas the single sine wave simulations represent Proudman resonance more clearly.

Boxcar shaped air pressure disturbances always cause Proudman resonance in the basin regardless of disturbance size, however, not all the models give resonance at the same speed. The best results are obtained with ROMS which gives resonance at the speed of free waves for every simulation. ADCIRC and SCHISM tend to slightly underestimate the results, especially when considering results obtained through maximum energy. Based on these results, ADCIRC was chosen as the model for further work as it is a finite element model which allows for a very fine resolution inside the bays of interest without using nested domains. SCHISM was rejected because it uses a semi-implicit time scheme which makes choosing an adequate time step slightly more complicated and an inadequate time step can affect Proudman resonance in the model.

After the testing phase, modelling of four historical meteotsunami events in the Adriatic was conducted. The simulations used a cut-off depth of 4 m. Results for Vela Luka (21 June 1978), Široka (22 August 2007) and Mali Lošinj (15 August 2008) show that there are significant sea level oscillations in the bays but the amplitudes are, at best, 50% of the observed ones. In the case of Stari Grad (19 February 2010) the modelled oscillations were much smaller, up to 30% of the observed ones. The situation in Stari Grad was very specific that day – sea level was already elevated due to a storm surge and it is assumed that without the storm surge the meteotsunami that hit the bay would not have caused flooding on its own.

The next step were simulations that included flooding and drying of grid nodes and they were conducted for the events in Vela Luka and Stari Grad. Grid resolution was enhanced in the entire Adriatic but especially in the two bays where the spatial step was several tens of meters and topography was included in order to allow for wave runup. Results for Vela Luka show a significant improvement from the simulations that used a cut-off depth. The wave amplitude and energy at the mouth of the bay are larger than in cut-off depth simulations, and better resolution inside the bay coupled with flooding and drying caused the modelled wave heights to be twice as large as in previous simulations and closer to the observations. All modelled wave heights were larger than in cut-off depth simulations and this result is an indication that modelling extreme wave heights of destructive meteotsunamis can benefit from a flooding and drying module incorporated

into the model.

Simulations for the event in Stari Grad were not as successful in reproducing extreme wave heights. Although including the flooding and drying module enlarged the wave height, it was not a significant improvement and there was no flooding in the bay. Since it is assumed that the meteotsunami that hit that day only caused flooding because the sea level was already extremely high due to a storm surge, these results confirm that assumption.

This study shows that in order to model meteotsunamis, it is necessary to understand how the model works and how well it reproduces resonant effects connected to such waves. Further improvements could be made with more accurate modelling of atmospheric pressure disturbances, as well as including a flooding and drying module that enables the reproduction of processes that take place once the waves reach the shore.

Keywords: meteotsunami, Chrystal resonance, Proudman resonance, Adriatic, ADCIRC, SCHISM, ROMS, numerical modelling, flooding and drying

Popis simbola

ζ	denivelacija
f	Coriolisov parametar
l	udaljenost od obale do ulaza u zaljev
L	duljina bazena
c	brzina atmosferskog poremećaja
v	brzina slobodnih valova u moru
u	brzina prisilnih valova u moru
U	x komponenta vertikalno usrednjene horizontalne brzine
V	y komponenta vertikalno usrednjene horizontalne brzine
H	dubina mora/bazena
b	širina zaljeva
T_0	period osnovnog moda zaljeva
t_e	vrijeme otkad je počela pobuda zaljeva
R	koeficijent refleksije na ulazu u zaljev
C	Courantov broj
C_{max}	maksimalni dozvoljeni Courantov broj
u_x	iznos brzine u x smjeru
u_y	iznos brzine u y smjeru
Δt	vremenski korak
Δx	prostorni korak u x smjeru
Δy	prostorni korak u y smjeru
λ	valna duljina poremećaja
T	period seša
p_a	atmosferski tlak
g	ubrzanje sile teže
ρ	gustoća vode
k	valni broj
σ	kružna frekvencija
γ	kut propagacije atmosferskog poremećaja

τ_0	težinski faktor u valno-kontinuitetnoj jednadžbi
η	ravnotežni plimni potencijal
α	efektivni faktor elastičnosti Zemlje
τ_{sx}	x komponenta površinske napetosti
τ_{sy}	y komponenta površinske napetosti
C_f	koeficijent pridnenog trenja
E_{h2}	koeficijent disperzije

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Numerički modeli i njihovo testiranje **6**

2.1 Numerički modeli 6

2.2 Testiranje modela 7

2.3 Rezultati i diskusija 10

3 Simulacije meteotsunamija u Jadranu uz definiranje minimalne dubine u modelu **29**

3.1 Metode 29

3.2 Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine 30

3.3 Široka na Istu 22. kolovoza 2007. godine. 31

3.4 Mali Lošinj na Lošinju 15. kolovoza 2008. godine 32

3.5 Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine 34

3.6 Valni paketi na otvorenom moru 35

4 Simulacije meteotsunamija u Jadranu uz korištenje modula za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže **38**

4.1 Metode 38

4.2 Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine 41

4.3 Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine 51

5 Zaključak **56**

Popis literature **60**

A Prilog A **67**

B Prilog B **71**

Životopis **75**

1. UVOD

Meteotsunamiji su oscilacije morske razine koje imaju periode slične periodima tsunamija – govorimo o dugoperiodičkim valovima čiji se periodi mjere u minutama. Meteorološkog su porijekla i najčešće ih uzrokuju putujući poremećaji tlaka zraka malih amplituda, od samo nekoliko hPa, koji traju nekoliko desetaka minuta [1], iako, na pojedinim lokacijama i u pojedinim slučajevima, glavni uzročnik može biti i vjetar [2]. Poremećaji tlaka zraka mogu biti posljedica različitih procesa u atmosferi kao što su uragani, prolazi fronta, tornada, nizovi atmosferskih težinskih valova ili derehoi – brze linije konvektivnih olujnih fronta koje izazivaju pojavu jakih vjetrova i naglih oluja [3]. Zbog sličnosti ovih valova s tsunamijima, neki povijesni događaji zapisani u katalozima tsunamija kao tsunamiji s neodređenim porijeklom ili pod pretpostavkom da su ih uzrokovali podvodni odroni [4, 5, 6, 7] zapravo su bili uzrokovani meteorološkim pojavama (npr. [1]). Osim velikih materijalnih šteta u nekoliko su navrata meteotsunamiji uzrokovali i gubitak ljudskih života [8, 9]. Zabilježeni su diljem svijeta, međutim u područjima s velikim plimnim oscilacijama i malim potencijalom za meteotsunamije oni su od manje važnosti i slabije se istražuju. Područje Britanske Kolumbije i Washingtona osjetljivo je na tsunamije u Tihom oceanu, ali pokazalo se da je kompleksna geometrija obale pogodna i za razvoj meteoroloških tsunamija. Ipak, njihove su amplitude značajno manje od plime koja na tom području ima raspon od 3 do 8 metara, a mareografi nisu namijenjeni za mjerenje oscilacija takvog perioda te su meteotsunamiji slabo dokumentirani [10]. U područjima s manjim plimnim oscilacijama gdje se meteotsunamiji često javljaju puno se više i istražuju. Na području Sredozemlja najpoznatija lokacija za pojavu meteotsunamija je Ciutadella na Menorci. Ciutadella se nalazi na vrhu dugačkog ljevkastog zaljeva čija geometrija značajno amplificira ulazne valove dok ih šelfovi oko Mallorce i između Mallorce i Menorce usmjeravaju prema zaljevu [11]. Na tom su području meteotsunamiji poznati pod nazivom rissaga, a drugdje u svijetu također imaju svoja lokalna imena. Malteža̧ni ih tako nazivaju milghuba, Talijani marrobbio, Japanci abiki, a kod nas su poznati kao šćige.

U Jadranu se bilježi i do nekoliko događaja godišnje, s time da nisu svi jednako jaki, odnosno ne uzrokuje svaki događaj poplavljivanje. Mehanizam nastanka je takav da su meteotsunamiji, za razliku od tsunamija, lokalnog karaktera. Primjer mehanizma dali su

Orlić i sur. [12] prilikom objašnjavanja poplave koja je zadesila Velu Luku 21. lipnja 1978. godine (slika 1.1). Nekoliko je faza nastanka:

1. Poremećaj tlaka zraka putuje iznad otvorenog mora te zbog efekta inverznog barometra izaziva podizanje ili spuštanje morske razine. U slučaju da poremećaj putuje brzinom slobodnih valova u moru, dolazi do Proudmanove rezonancije [13, 14] te se veće količine energije prenose iz atmosfere u more i val raste. Izraz za denivelaciju na ulazu u zaljev (indeks m) glasi:

$$\zeta_m = F_1 \left[f\left(t - \frac{l}{c}\right) - \frac{c}{v} f\left(t - \frac{l}{v}\right) \right],\ F_1 = \frac{1}{1 - \frac{c^2}{v^2}}, \tag{1.1}$$

   pri čemu je f Coriolisov parametar, t vrijeme, l put koji je poremećaj prešao od obale do ulaza u zaljev, c brzina atmosferskog poremećaja i $v = \sqrt{gh}$ brzina slobodnih valova u moru.

2. Val s otvorenog mora ulazi u zaljev. Ako je zaljev ljevkastog oblika onda će zbog smanjenja širine zaljeva i dubine mora doći do porasta vala u skladu s Greenovim zakonom [15]:

$$\zeta_h' = F_2 \zeta_m,\ F_2 = \left(\frac{b_m}{b_h}\right)^{1/2} \left(\frac{H_m}{H_h}\right)^{1/4}, \tag{1.2}$$

   gdje su b širine zaljeva, H dubine mora, a indeksi m i h označavaju ulaz (otvoreni kraj) i vrh (zatvoreni kraj) zaljeva.

3. Na vrhu zaljeva val se reflektira i amplificira [15]:

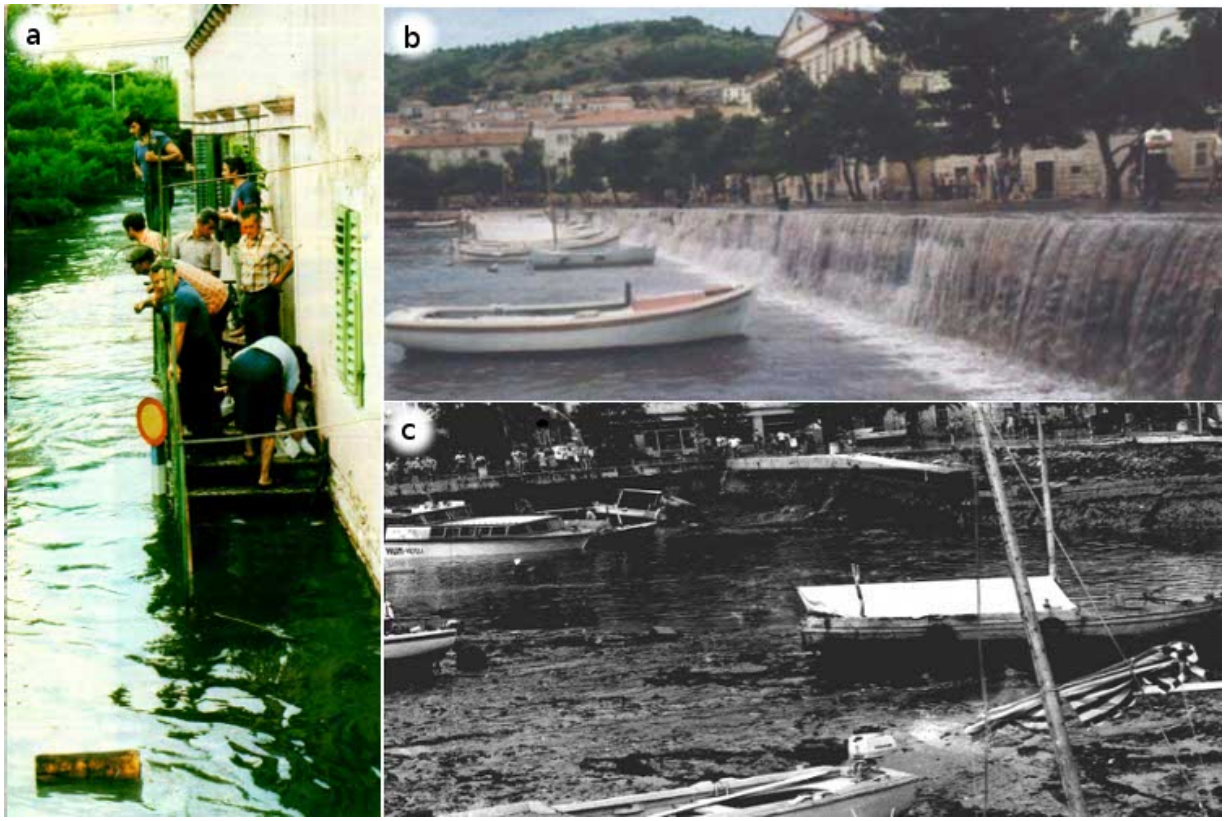
$$\zeta_h'' = F_3 \zeta_h',\ F_3 = 2. \tag{1.3}$$

4. Pri izlasku iz zaljeva dio vala se ponovno reflektira natrag u zaljev i pritom može doći do superpozicije s valovima koji tek ulaze u zaljev što dovodi do daljnjeg rasta amplitude, a poklapanje perioda ulaznih valova s normalnim modovima bazena dovodi do lučke rezonancije [16]:

$$\zeta_h''' = F_4 \zeta_h'',\ F_4 = \frac{1 - exp\left[-\frac{2(1-R)}{T_0} t_e\right]}{1 - R}, \tag{1.4}$$

pri čemu je T_0 period osnovnog moda zaljeva, t_e vrijeme otkad je počela pobuda zaljeva, a R koeficijent refleksije na ulazu u zaljev ($R = 0$ implicira maksimalno gušenje, $R = 1$ implicira da nema gubitka energije). Ukupni faktor amplifikacije je $F = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4$.

Očito je za nastanak meteotsunamija potrebno zadovoljiti velik broj lokalno specifičnih uvjeta, uslijed čega meteotsunamiji svoju razornu moć dostižu samo na usko ograničenim područjima – početni val na otvorenom moru ima amplitudu od nekoliko centimetara koja u zaljevu može narasti do nekoliko metara tj. faktor amplifikacije može dosegnuti $O(100)$.



Slika 1.1: Fotografije Vele Luke za vrijeme meteotsunamija 21. lipnja 1978. godine: (a) visoka voda, (b) povlačenje mora i (c) niska voda. Vremenski interval između visoke i niske vode bio je oko 10 minuta.

Naziv meteorološki tsunami ili meteotsunami datira iz 1935. godine [17] kad je Nomitsu opisao oscilacije slične tsunamijima uzrokovane atmosferskim poremećajima u pojedinim zaljevima i lukama Japanskog otočja. Defant je 1961. godine [18] ukazao na slične oscilacije morske razine koje se javljaju u drugim dijelovima svijeta. U Jadranu je tijekom 20. stoljeća zabilježeno više slučajeva meteotsunamija [19] od kojih je najpoznatiji onaj koji je zahvatio srednji Jadran, a osobito Velu Luku na Korčuli 21. lipnja 1978. godine.

Iako su ga neka od prvih istraživanja klasificirala kao tsunami [20, 21], druga su ukazala na meteorološko porijeklo – Hodžić je povezao događaj sa sinoptičkom situacijom u atmosferi [22, 23] dok je Orlić istaknuo utjecaj mezoskalnih atmosferskih procesa [24] i to je bio početak istraživanja meteotsunamija u Jadranu. Kako je rasla svijest o postojanju tog fenomena na našem području, počelo ih se bilježiti sve više te su se intenzivirala i istraživanja. Napravljeni su brojni radovi na tu temu; neki su se bavili povezivanjem pojedinih poplava s mogućim meteorološkim uzrocima (npr. [25]), neki su se fokusirali na numeričko modeliranje (npr. [26, 27, 28]), a bilo je i onih koji su koristili oba pristupa (npr. [12]). S obzirom na potencijalnu opasnost koju ovaj fenomen predstavlja, razvijena je mreža koja bi služila za rano upozoravanje na moguće događaje u Jadranu, a sastoji se od devet mikrobarografskih meteoroloških postaja na području srednjeg Jadrana (koji je najosjetljiviji na takve događaje) i četiri mareografa. Trenutno su dostupne 48-satne prognoze meteoroloških polja načinjene WRF modelom i oceanskih polja načinjenih ROMS modelom [29, 30]. Sličan sustav za upozoravanje postoji na Balearima gdje se radi na razvoju operativne prognoze za Ciutadellu na Menorci koju često pogađaju meteotsunamiji čije su amplitude, ali i popratne morske struje, opasne za infrastrukturu i brodove, i koji su dosad uzrokovali desetke milijuna eura štete [1].

S obzirom na potencijalnu opasnost koju meteotsunamiji predstavljaju na području Jadrana, cilj ovog istraživanja bio je pronaći način za što preciznije modeliranje tog fenomena na području Jadrana. U tu svrhu u ovom će radu biti predstavljeni rezultati modeliranja za četiri povijesna događaja:

1. Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine,
2. Široka na Istu 22. kolovoza 2007. godine,
3. Mali Lošinj na Lošinju 15. kolovoza 2008. godine i
4. Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine.

Za te četiri poplave istraživanja su pokazala da su bile uzrokovane meteotsunamijima čije su se valne visine kretale od oko 2 m pa sve do 6 m. Kako bi modeliranje tih događaja bilo što uspješnije, bilo je potrebno odabrati adekvatan numerički model. U drugom su poglavlju opisana tri numerička modela i testirana njihova uspješnost reprodukcije odziva idealiziranog bazena na dvije vrste atmosferskih poremećaja. Na temelju testiranja

odabran je numerički model kojim su se reproducirala četiri gore spomenuta povijesna događaja uz korištenje minimalne dubine u modelu (tzv. „cut-off depth") i ti su rezultati dani u trećem poglavlju. Posljednji korak u modeliranju bio je uključivanje modula za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže kako bi se omogućila što preciznija reprodukcija ekstremnih događaja. Simulacije s poplavljivanjem i osušivanjem provedene su za događaje u Veloj Luci i Starom Gradu te su rezultati prikazani u četvrtom poglavlju. Zadnje poglavlje sadrži kratak sažetak rezultata istraživanja.

2. NUMERIČKI MODELI I NJIHOVO TESTIRANJE

2.1 Numerički modeli

Da bi se napravilo numeričko modeliranje meteotsunamija u Jadranu, prvo je bilo potrebno odabrati numerički model. U tu svrhu provedeno je testiranje tri modela od kojih su dva modeli konačnih elemenata (ADCIRC i SCHISM) i jedan model konačnih razlika (ROMS). Namjera je bila koristiti model konačnih elemenata jer to omogućuje prelazak s relativno grube rezolucije na otvorenom moru (nekoliko kilometara) do relativno fine rezolucije u zaljevima od interesa (nekoliko desetaka metara) na jednoj mreži bez potrebe za ugnježđivanjem domena, ali je u testiranje dodan i jedan model konačnih razlika kako bi se usporedili različiti modeli.

ADCIRC (ADvanced CIRCulation model for shelves, coasts and estuaries) je nestrukturirani hidrodinamički model konačnih elemenata koji se koristi za modeliranje obalnih mora, zaljeva, rijeka, itd. Denivelacija se dobiva rješavanjem vertikalno integrirane jednadžbe kontinuiteta u generaliziranom obliku valno-kontinuitetne jednadžbe („generalized wave-continuity equation form" ili GWCE), dok se brzina računa iz jednadžba gibanja [31]. ROMS (Regional Ocean Modeling System) je oceanski model koji prati teren i ima slobodnu površinu. U ROMS-u se primitivne jednadžbe rješavaju koristeći centralne sheme konačnih razlika na posmaknutim mrežama. U znanstvenoj zajednici koristi se za čitav niz primjena, primarno za promatranje odziva oceana na fizikalna forsiranja kao što su zagrijavanje i vjetar [32]. SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) je model koji se bazira na nestrukturiranim mrežama, a razvijen je za simulaciju trodimenzionalne barokline cirkulacije na skalama od potoka do oceana. U modelu se koristi veoma efikasna i precizna semi-implicitna metoda konačnih elemenata/volumena za rješavanje Navier-Stokesovih jednadžbi (i u hidrostatičkom i u nehidrostatičkom obliku), kako bi se simulirao niz fizikalnih i bioloških procesa [33].

ADCIRC i ROMS koriste eksplicitne numeričke sheme u vremenu i analogno tome CFL kriterij glasi:

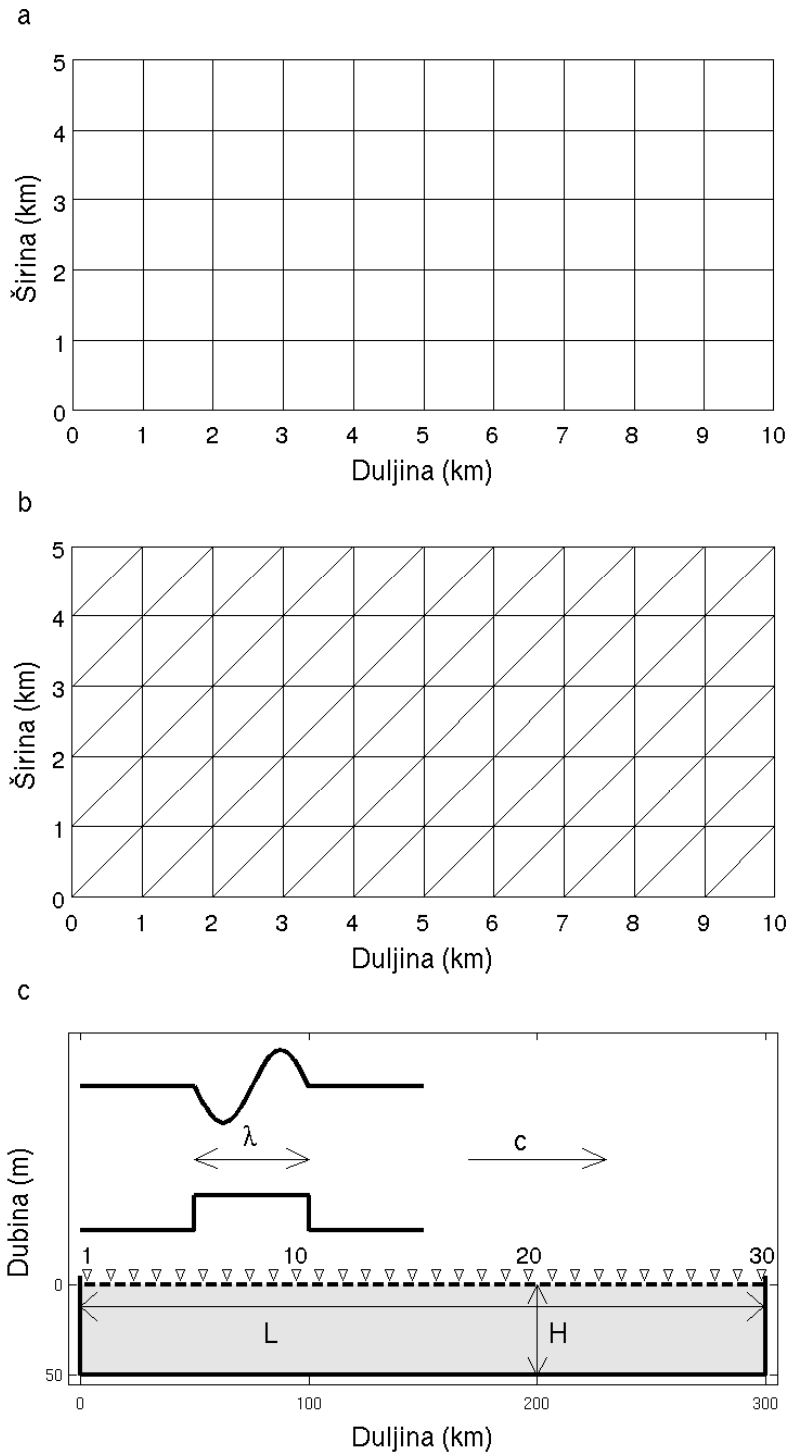
$$C = \frac{u_x \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \Delta t}{\Delta y} \leqslant C_{max} \tag{2.1}$$

pri čemu je C Courantov broj, u_x i u_y iznosi brzine u x i y smjeru, Δt vremenski korak, Δx i Δy prostorni koraci u x i y smjeru te C_{max} maksimalni dozvoljeni Courantov broj koji za eksplicitne sheme standardno iznosi 1, iako se u praksi često uzima 0,9 [34]. SCHISM koristi semi-implicitnu vremensku shemu što znači da postoji raspon Courantovih brojeva za koje je model stabilan. Konkretno, za Courantove brojeve ispod 0,4 greška difuzije će postati dovoljno velika da preuzme rješenje, ali isto tako odabir prevelikog vremenskog koraka znači da će rješenje preuzeti greška odsijecanja [35].

2.2 Testiranje modela

Generalno govoreći, odgovor razine mora na atmosfersko forsiranje putujućim poremećajem tlaka zraka pod utjecajem je dva tipa rezonancije. U jednom je slučaju period forsiranja jednak periodu osnovnog moda u moru i izaziva pojavu seša, a u drugom period i valna duljina forsiranja odgovaraju periodu i valnoj duljini progresivnih valova u moru (tj. brzina forsiranja i morskog vala su jednake) i dolazi do amplifikacije morskog vala. Oba tipa rezonancije proučavali su prvo istraživači koji su se bavili plimnom teorijom (npr. [36]), a zatim i oni zainteresirani za interakciju atmosfere i mora. Chrystal [37] se bavio odgovorom mora u zatvorenom bazenu na putujući atmosferski poremećaj i bio je među prvima koji su proučavali prvi tip rezonancije, a Proudman [13] odgovorom mora u beskonačnom kanalu na putujući atmosferski poremećaj čime je započeo istraživanje drugog tipa rezonancije. Drugi tip rezonancije već nosi Proudmanovo ime [24], a za prvi tip će se u daljnjem tekstu koristiti naziv Chrystalova rezonancija zbog jednostavnosti i priznanja autoru za doprinos u tom području. Potrebno je napomenuti da se rezonancija slična Proudmanovoj može javiti kad se putujući atmosferski poremećaj združi s rubnim valovima [38] ili Kelvinovim valovima [39]; međutim u ovom se istraživanju nisu proučavali ti tipovi rezonancija.

Nakon Chrystala i Proudmana, problemom odgovora mora na atmosfersko forsiranje bavio se niz drugih autora. Od najvećeg su interesa radovi koji nude eksplicitna rješenja i rezultate numeričkog modeliranja mora u zatvorenom bazenu [40, 41, 42, 43, 44]. Ti su autori pokazali da dinamika u zatvorenom bazenu ovisi o relativnoj veličini atmosferskog poremećaja u odnosu na duljinu bazena te o brzini propagacije poremećaja, a ne samo o njegovom periodu. Međutim, ispostavilo se da ovisnost dva navedena tipa rezonancije



Slika 2.1: Isječak iz mreže za (a) ROMS i (b) ADCIRC i SCHISM; (c) skica idealiziranog bazena i poremećaja tlaka zraka. H označava dubinu bazena, L duljinu bazena, λ valnu duljinu poremećaja, a c brzinu propagacije poremećaja. Trokutima su označene postaje na kojima se bilježila razina vode u bazenu i numerirane su od 1 do 30, s lijeve na desnu stranu bazena.

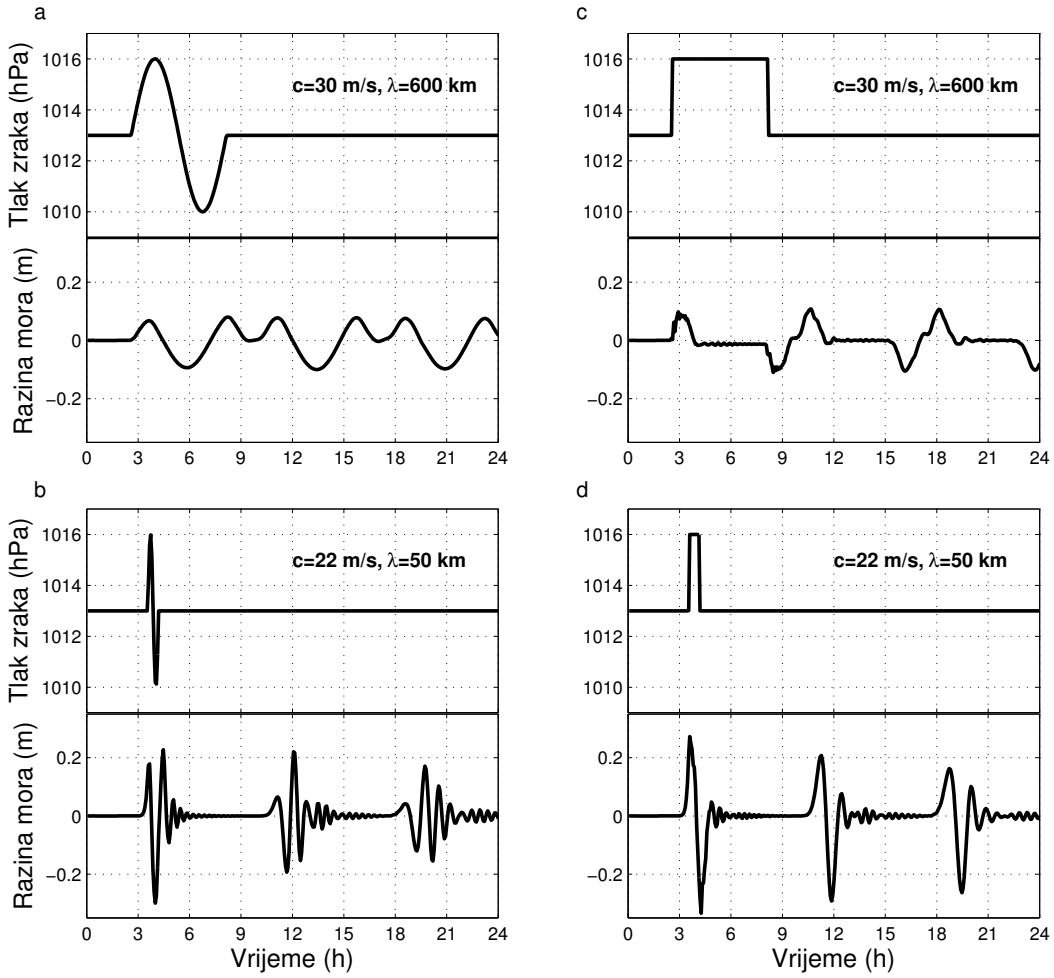
o specifičnom atmosferskom forsiranju i uvjeti koji utječu na prijelaz iz jedne u drugu rezonanciju dosada nisu bili detaljno istraženi pa se to istraživanje provelo u ovom radu prilikom testiranja tri numerička modela.

Testiranje modela provelo se na idealiziranom pravokutnom bazenu uniformne dubine iznad kojeg su se širili sintetički poremećaji tlaka zraka. Ovakva shema odabrana je zato što su za bazen poznatih dimenzija poznate brzina i period pri kojima se javljaju rezonancije i jednostavno je usporediti rezultate modela s očekivanim vrijednostima.

Na slici 2.1 prikazani su isječci iz pravokutne mreže za ROMS čija je rezolucija bila 1 x 1 km te nestrukturirane mreže za ADCIRC i SCHISM koja je ovdje dobivena tako da se svaki pravokutnik ROMS-ove mreže podijelio na dva trokuta. Na taj način svi čvorovi mreža nalaze se na istim lokacijama te je lakše uspoređivati rezultate. Idealizirani bazen bio je dugačak 300 km, širok 50 km i dubok 50 m. Simulacije su napravljene u 2D barotropnom modu bez efekata rotacije. Jedino vanjsko forsiranje bili su poremećaji tlaka zraka koji su imali dva oblika (sinus i „boxcar" funkcija) različitih valnih duljina i brzina propagacije. Amplituda poremećaja iznosila je 3 hPa, a svaka simulacija započela je s bazenom u ravnoteži nakon čega bi poremećaj tlaka počeo propagirati od lijeve prema desnoj strani brzinom od 10 do 99 m/s (s korakom od 1 m/s) i raznim duljinama (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800 i 3000 km). Ukupan broj simulacija iznosio je 2250 za pojedini tip poremećaja tlaka zraka, za svaki model. Svaka simulacija trajala je četiri dana (kako bi najveći i najsporiji poremećaji stigli prijeći preko bazena).

Vremenski koraci određeni su uzimajući u obzir CFL uvjet i vrijeme računanja te su iznosili 10 s za ADCIRC, 5 s za ROMS i 90 s za SCHISM. Napravljen je i set simulacija s dvostrukim sinusom te su rezultati uspoređeni s onima za jednostruki, kao i s analitičkim slučajem sinusa koji se ponavlja u beskonačnost. Duž bazena, na jednakim udaljenostima, postavljeno je 30 postaja na kojima se bilježila razina mora svakih 60 s za ADCIRC i ROMS te 90 s za SCHISM.

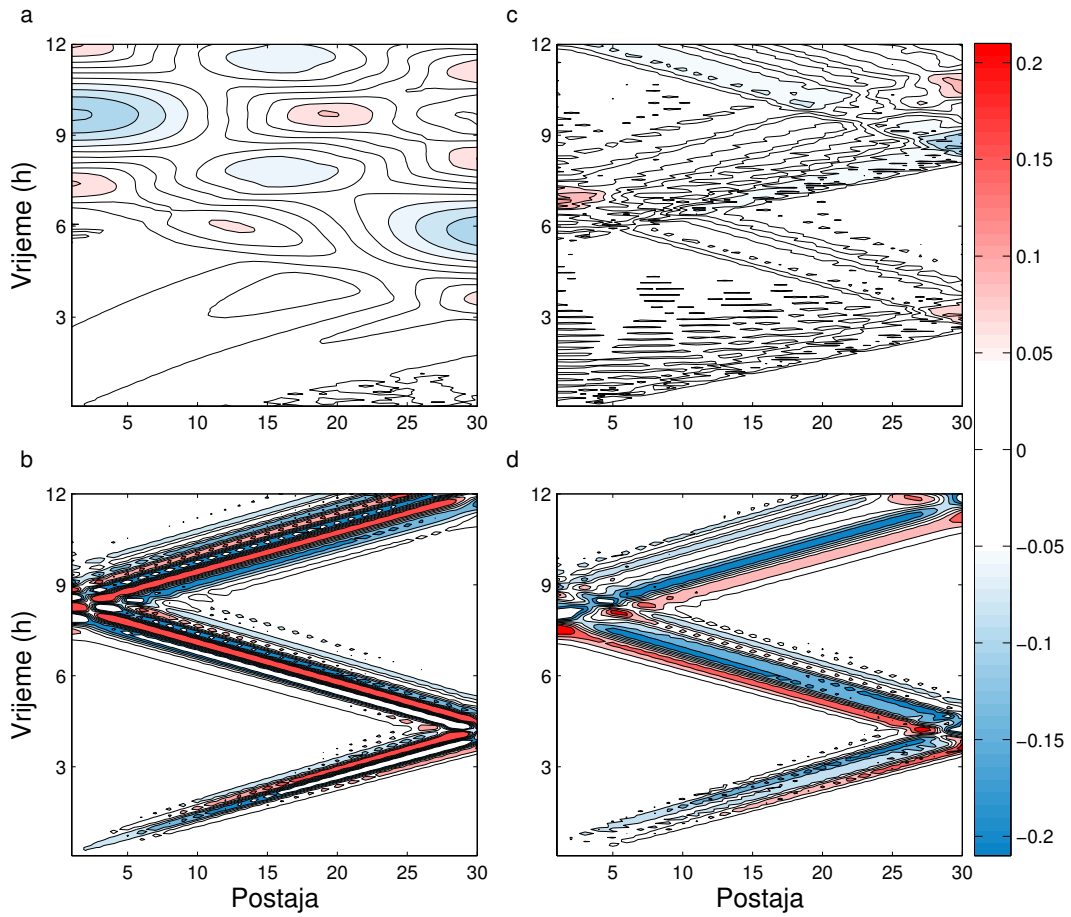
Odabrana su dva parametra za prikaz odziva bazena na putujući poremećaj tlaka zraka: na svakoj postaji izračunata je maksimalna valna visina kao razlika maksimalne i minimalne zabilježene razine vode tijekom četverodnevne simulacije i ukupna energija dobivena integracijom spektra gustoće energije razine mora, također za svaku simulaciju.



Slika 2.2: Tlak zraka i razina mora za prva 24 h simulacije, zabilježeni na postaji 30, za četiri različita poremećaja tlaka zraka: (a) sinus valne duljine 600 km koji putuje brzinom od 30 m/s; (b) sinus valne duljine 50 km koji putuje brzinom od 22 m/s; (c) „boxcar" funkcija duljine 600 km koja putuje brzinom od 30 m/s; (d) „boxcar" funkcija duljine 50 km koja putuje brzinom od 22 m/s. Svi vremenski nizovi uzeti su iz simulacija SCHISM-om.

2.3 Rezultati i diskusija

Na slici 2.2 prikazani su vremenski nizovi tlaka zraka i razine mora u jednoj točki bazena za četiri različita poremećaja što nam omogućuje da vidimo različite režime koji se mogu uspostaviti u bazenu, ovisno o tome kakav poremećaj prolazi preko njega. Za slučaj dugačkog sinusa valne duljine od 600 km (slika 2.2a), koji je dvaput veći od duljine bazena, javlja se Chrystalova rezonancija, odnosno u bazenu se razvijaju seši [37]. Sinus valne duljine od 50 km kao i „boxcar" funkcija duljine 50 km, koji putuju brzinom slobodnih valova u bazenu ($c = \sqrt{gh} \approx 22,15$ m/s), uzrokuju pojavu Proudmanove rezonancije: valna visina je za red veličine veća od one koja bi se očekivala od efekta inverznog barome-



Slika 2.3: Hovmoellerovi dijagrami razine mora (m) – na x osi označene su postaje duž bazena (skiciranog na slici 2.1c), a na y osi vrijeme (prvih 12 sati simulacije) za četiri različita poremećaja tlaka zraka: (a) sinus valne duljine 600 km koji putuje brzinom od 30 m/s; (b) sinus valne duljine 50 km koji putuje brzinom od 22 m/s; (c) „boxcar" funkcija duljine 600 km koja putuje brzinom od 30 m/s; (d) „boxcar" funkcija duljine 50 km koja putuje brzinom od 22 m/s. Svi vremenski nizovi uzeti su iz simulacija SCHISM-om.

tra (slika 2.2b, d). Sličan rezultat dobili su Pattiaratchi i Wijeratne [45] koji su istraživali rezonanciju za razne dubine mora u uskom dugačkom kanalu. Za slučaj „boxcar" funkcije duljine 600 km koja putuje brzinom od 30 m/s (slika 2.2c), prisilni val putuje brzinom poremećaja, a slobodni val generiran na lijevom kraju bazena, s obzirom da mu je brzina manja nego ona prisilnog vala, putuje za njim [13].

Ako pobliže pogledamo što se događa na pojedinoj postaji tijekom vremena (slika 2.3) onda za dugački sinus vidimo izmjenične intervale povišene i snižene razine mora (slika 2.3a). Ako odaberemo jednu točku u vremenu i promatramo razinu mora duž bazena ponovno vidimo izmjenične intervale povišene i snižene razine mora, dakle u tom se slučaju

u bazenu očito javljaju seši. Za preostala tri poremećaja (slika 2.3b, c i d) jasno je da se u bazenu javlja drugi režim. Valovi putuju duž bazena, stižu do desnog kraja i reflektiraju se natrag. Nakon što val prođe pojedinu postaju razina mora vraća se na nulu sve dok reflektirani val ne stigne ponovno do nje. Valna visina je najveća oko rezonantne brzine, ali je ponašanje slično u sva tri slučaja.

Kad smo ustanovili različite režime koji se javljaju u bazenu u ovisnosti o svojstvima poremećaja tlaka zraka koji putuje iznad njega, sljedeći je korak simulirati ih pomoću sva tri modela.

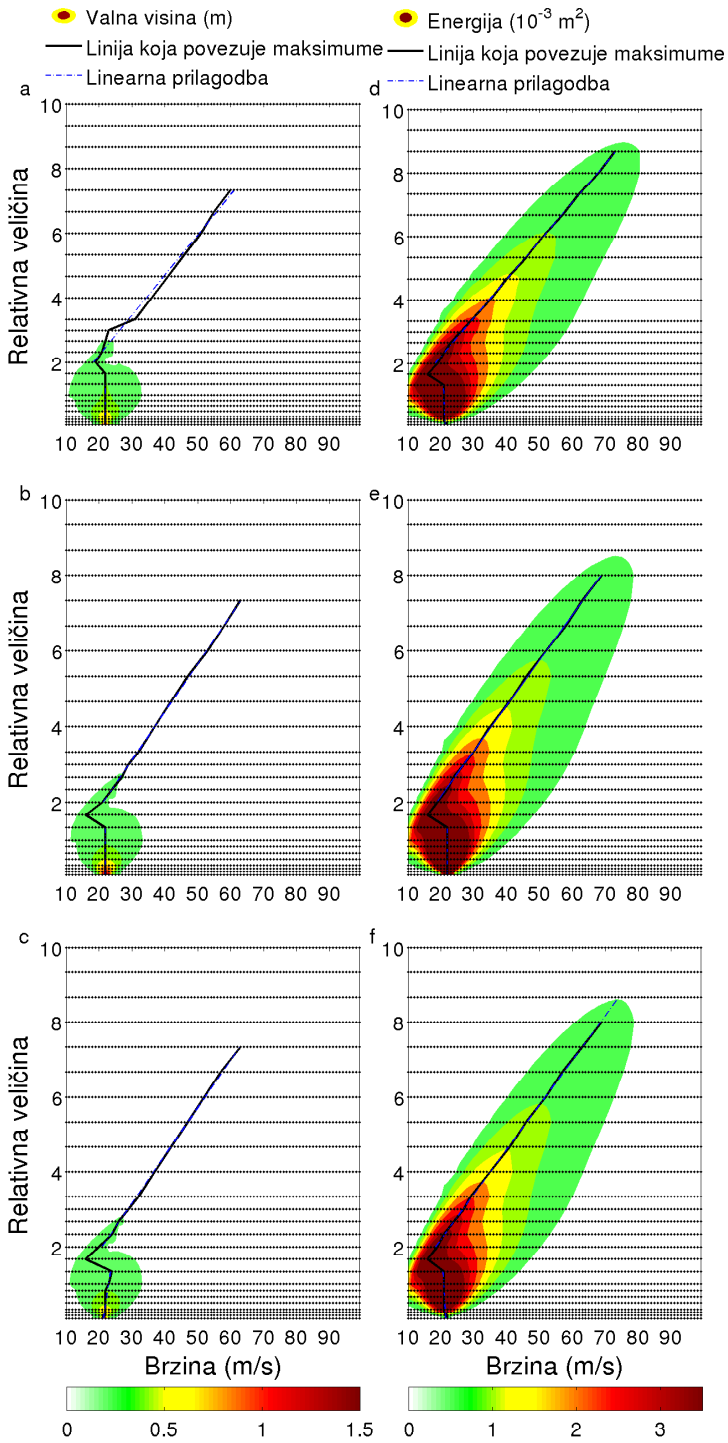
Tablica 2.1: Usrednjena rezonantna brzina (m/s) za 30 postaja i poremećaje s valnom duljinom do 400 km (jednostruki sinus) odnosno 200 km (dvostruki sinus) izračunata iz valnih visina ($\overline{c_{s1w}}$ i $\overline{c_{s2w}}$) i integriranih spektara gustoće energije ($\overline{c_{s1e}}$ i $\overline{c_{s2e}}$), gdje indeks 1 označava jednostruki, a indeks 2 dvostruki sinus; usrednjena rezonantna brzina (m/s) za 30 postaja i sve duljine „boxcar" funkcije izračunata iz valnih duljina ($\overline{c_{bw}}$) i integriranih spektara gustoće energije ($\overline{c_{be}}$). Analitička rezonantna brzina je 22,15 m/s.

Model	$\overline{c_{s1w}}$	$\overline{c_{s1e}}$	$\overline{c_{s2w}}$	$\overline{c_{s2e}}$	$\overline{c_{bw}}$	$\overline{c_{be}}$
ADCIRC	22,03	21,12	21,98	21,09	21,97	21,32
ROMS	22,12	21,86	22,21	21,67	22,00	22,00
SCHISM	21,89	21,13	21,98	21,14	2 1,93	21,47

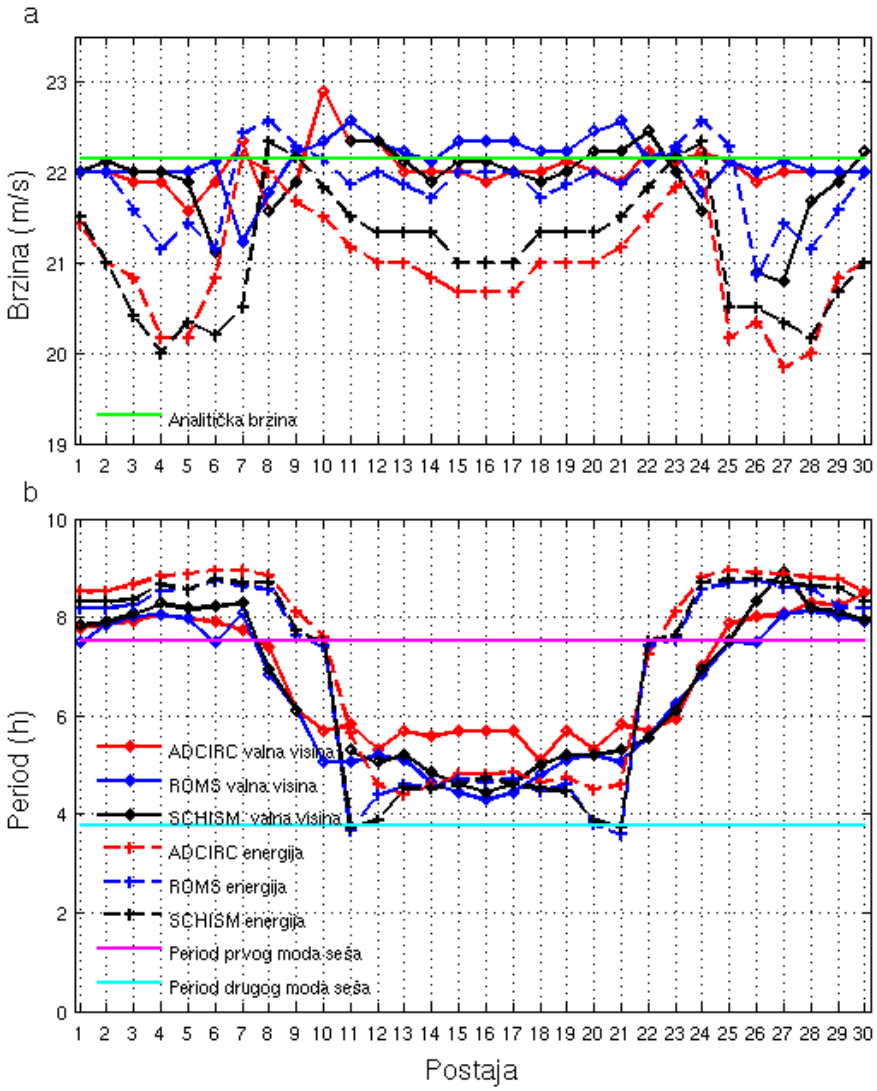
Tablica 2.2: Period seša (h) na lijevom (drugi indeks 1) i desnom (drugi indeks 30) kraju bazena, izračunat iz maksimalnih valnih visina (indeks w) i integriranih spektara gustoće energije (indeks e), usrednjeni preko valnih duljina poremećaja većih od 400 km, za pojedine modele, za jednostruki (prvi indeks 1) i dvostruki (prvi indeks 2) sinus. Analitički period prvog moda seša je 7,53 h.

Model	$\overline{T_{1w1}}$	$\overline{T_{1w30}}$	$\overline{T_{1e1}}$	$\overline{T_{1e30}}$	$\overline{T_{2w1}}$	$\overline{T_{2w30}}$	$\overline{T_{2e1}}$	$\overline{T_{2e30}}$
ADCIRC	7,77	8,48	8,52	8,52	7,83	7,84	7,90	7,96
ROMS	7,47	7,90	8,29	8,20	7,64	7,72	7,78	7,81
SCHISM	7,83	7,94	8,31	8,31	7,20	7,50	7,81	7,81

Maksimalna valna visina i integrirani spektar gustoće energije za sinusne poremećaje na desnom kraju bazena (slika 2.4) pokazuju da se za valne duljine poremećaja do oko 1,4 dimenzija bazena u bazenu javlja Proudmanova rezonancija. Može se primijetiti da se rezonancija ne javlja na 22,15 m/s za sve simulacije. Slika 2.5a pokazuje usrednjenu rezonantnu brzinu po postajama, izračunatu iz maksimalne valne visine i integriranog



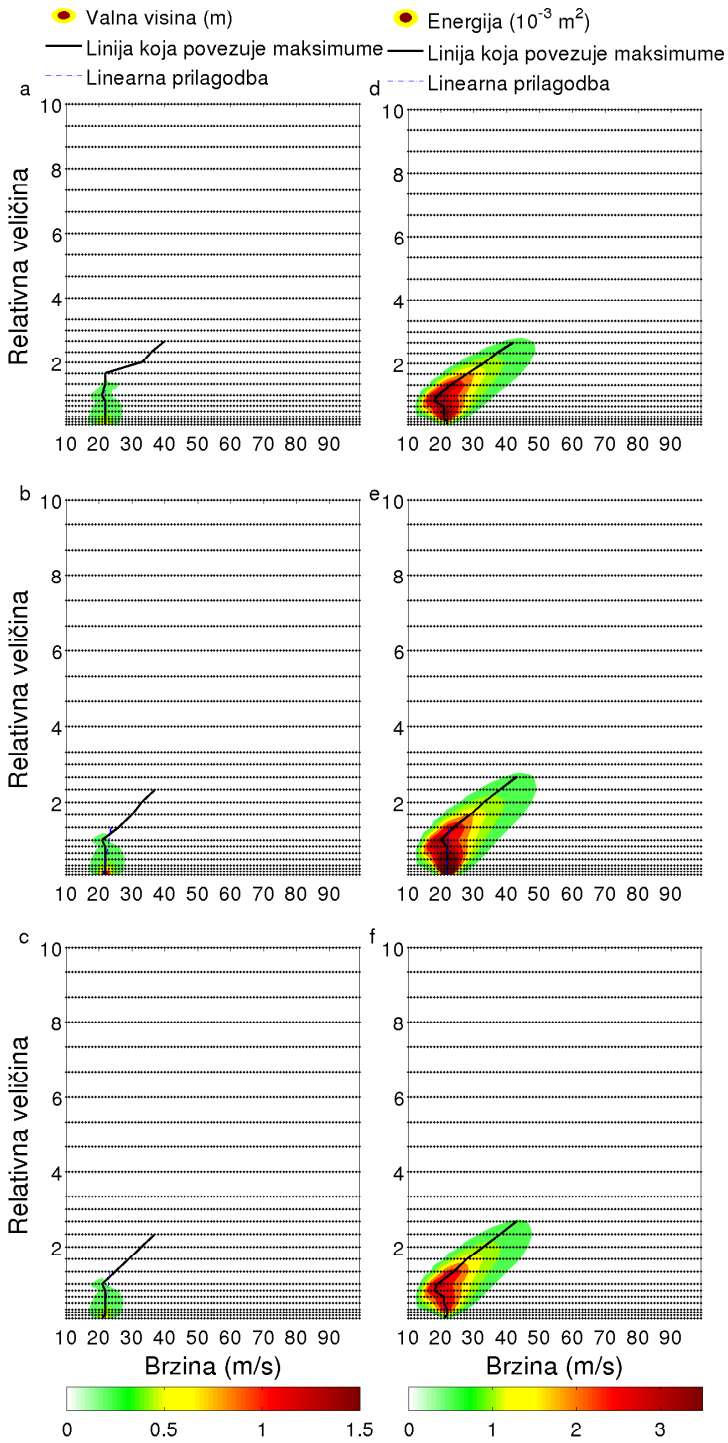
Slika 2.4: Odozgora prema dolje, rezultati dobiveni modelom: ADCIRC (a i d), ROMS (b i e) i SCHISM (c i f). Na lijevoj strani (a–c) je maksimalna valna visina (m), a na desnoj (d–f) integrirani spektar gustoće energije (10^{-3} m^2) za sinusne poremećaje tlaka zraka na postaji 30, za jednostruki sinus. Apscisa pokazuje brzinu propagacije poremećaja, a ordinata omjer veličine poremećaja i bazena. Crne točke označavaju simulacije, crna linija povezuje maksimalne vrijednosti simulacija po pojedinim duljinama poremećaja, a isprekidana plava linija linearnu prilagodbu za te maksimume. Ignorirale su se vrijednosti manje od 0,08 m za valnu visinu i 0,0005 m^2 za energiju.



Slika 2.5: (a) Rezonantna brzina za jednostruki sinus, usrednjena preko sinusnih poremećaja valne duljine do 400 km, izračunata iz valnih visina (puna linija) i integriranog spektra gustoće energije (isprekidana linija) za sva tri modela na svim postajama. (b) Period seša za jednostruki sinus, usrednjen preko sinusnih poremećaja valne duljine veće od 400 km, izračunat iz valnih visina (puna linija) i integriranog spektra gustoće energije (isprekidana linija) za sva tri modela na svim postajama.

spektra gustoće energije. Vrijednosti dobivene iz valnih visina bliže su analitičkom rješenju od onih izračunatih iz integriranog spektra gustoće energije koji uglavnom podcjenjuje rezonantnu brzinu. Vrijednosti rezonantne brzine usrednjene preko svih postaja dane su u tablici 2.1.

Kad valna duljina poremećaja postane veća od duljine bazena dolazi do promjene režima i vidljiva je Chrystalova rezonancija. Nagib pravca pokazuje da se s povećanjem valne duljine poremećaja mora povećati i brzina propagacije poremećaja kako bi period



Slika 2.6: Odozgora prema dolje, rezultati dobiveni modelom: ADCIRC (a i d), ROMS (b i e) i SCHISM (c i f). Na lijevoj strani (a–c) je maksimalna valna visina (m), a na desnoj (d–f) integrirani spektar gustoće energije (10^{-3} m^2) za sinusne poremećaje tlaka zraka na postaji 16, za jednostruki sinus. Apscisa pokazuje brzinu propagacije poremećaja, a ordinata omjer veličine poremećaja i bazena. Crne točke označavaju simulacije, crna linija povezuje maksimalne vrijednosti simulacija po pojedinim duljinama poremećaja, a isprekidana plava linija linearnu prilagodbu za te maksimume. Ignorirale su se vrijednosti manje od 0,08 m za valnu visinu i 0,0005 m^2 za energiju.

forsiranja ostao jednak periodu seša u bazenu, odnosno da u tom slučaju dolazi do razvoja rezonancije. S daljnjim porastom valne duljine opadaju vrijednosti valne visine i energije. To smanjenje izraženije je u centru bazena gdje prvi mod ima čvor (slika 2.6). Periodi vlastitih modova pravokutnog bazena uniformne dubine dani su Merianovom formulom: $T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}}$, gdje je $n = 1, 2, 3, ...$ [46, 47]. Analitički izračun perioda prvog moda bazena duljine 300 km i dubine 50 m daje vrijednost 7,53 h, a drugog 3,76 h. Usrednjeni periodi seša izračunati iz valnih visina na lijevom i desnom kraju bazena daju vrijednosti bliže analitičkoj od onih izračunatih iz integriranih spektara gustoće energije (tablica 2.2). Na lijevom i desnom kraju bazena dominira prvi mod. U centralnom dijelu bazena periodi su bitno manji, ali veći od 3,76 h koliko se očekuje za drugi mod – sljedeći viši mod u bazenu [14].

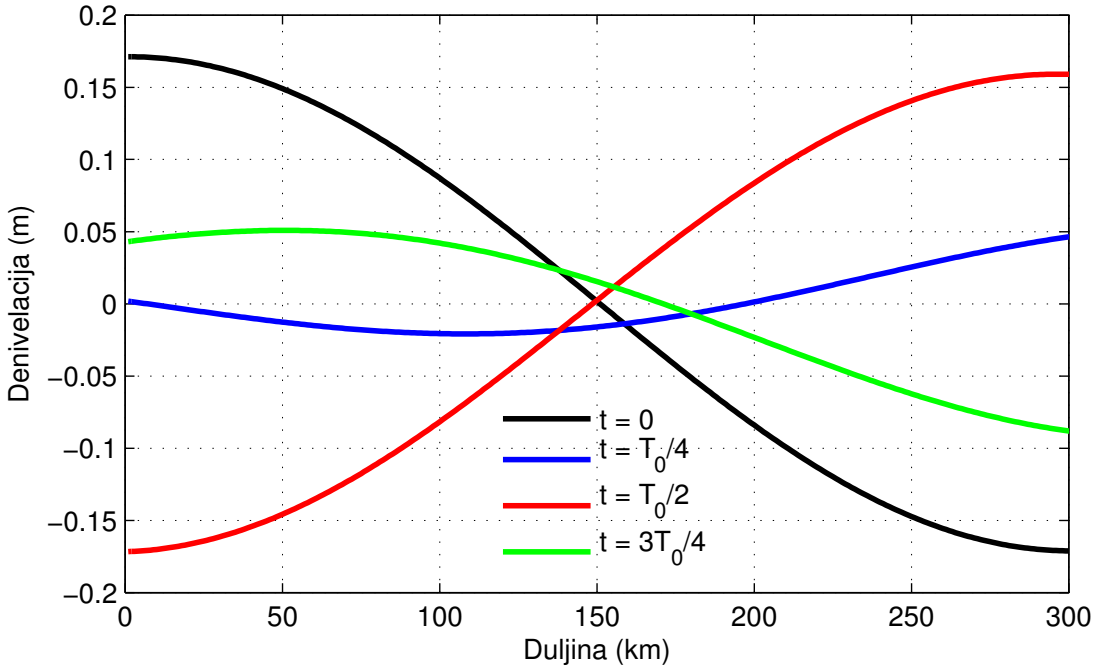
Rezultati dobiveni iz maksimalnih valnih visina uglavnom su bliži analitičkim rješenjima od onih dobivenih iz integriranih spektara gustoće energije. Uzrok tome vjerojatno je činjenica da početne greške u valnim visinama propagiraju i povećavaju se kroz izračun energije. Sinusni poremećaji uzrokuju pojavu dva tipa rezonancije, ovisno o omjeru dimenzije poremećaja i bazena, a za vrijednosti omjera između jedan i dva dolazi do promjene režima. Valne duljine do dimenzija bazena ili malo veće uzrokuju pojavu Proudmanove rezonancije, a one dva i više puta veće od dimenzija bazena uzrokuju pojavu Chrystalove rezonancije. U području gdje je omjer između jedan i dva rezonantna brzina opada kako kreće promjena tipa rezonancije i niti jedna od navedenih rezonancija ne može se direktno prepoznati. Sva tri modela pokazuju isto ponašanje, iako je SCHISM u području Proudmanove rezonancije manje konzistentan.

Periodi seša najbliži su analitičkim vrijednostima na lijevom kraju bazena nakon čega se malo povećavaju. U centralnom dijelu bazena vrijednosti opadaju, zatim se prema desnoj strani ponovno povećavaju da bi na samom kraju vrijednosti ponovno malo pale. Da bismo objasnili ovo ponašanje, razmatra se oblik rješenja za denivelaciju kad bazen pobuđuje beskonačni putujući sinusni poremećaj tlaka zraka. Sustav jednadžbi za 1D slučaj glasi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial x}, \\ H\frac{\partial u}{\partial x} &+ \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0, \end{aligned} \tag{2.2}$$

gdje je H dubina bazena, g ubrzanje sile teže, a ρ gustoća vode. Izraz za atmosferski tlak je $p_a(x,t) = Re[P_0 e^{i(kx-\sigma t)}]$, gdje je k valni broj, a σ kružna frekvencija. Rubni uvjeti za struju su: $u(x = 0, L) = 0$, gdje je L duljina bazena. Rješavanje sustava 2.2 daje izraz za denivelaciju ζ [48]:

$$\zeta(x,t) = \frac{HU_0 k}{\sigma} cos(kx - \sigma t) - \frac{HU_0}{\sqrt{gH}} \frac{cos(\frac{\sigma x}{\sqrt{gH}})}{sin(\frac{\sigma L}{\sqrt{gH}})} sin(kL - \sigma t) -$$
$$- \frac{HU_0}{\sqrt{gH}} \frac{cos[\frac{\sigma}{\sqrt{gH}}(x - L)]}{sin(\frac{\sigma L}{\sqrt{gH}})} sin(\sigma t), \tag{2.3}$$
$$U_0 = \frac{\sigma k}{\sigma^2 - k^2 gH} \frac{P_0}{\rho}.$$



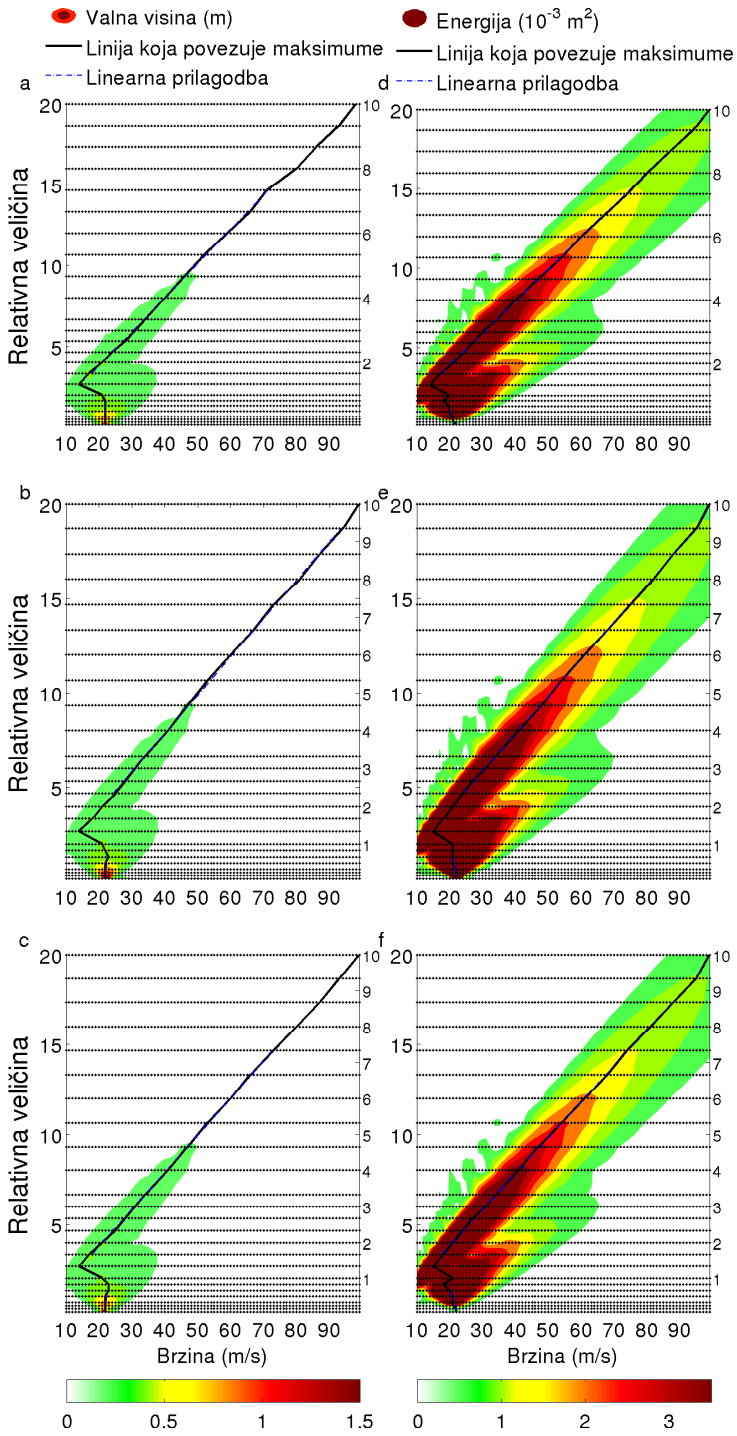
Slika 2.7: Denivelacija duž bazena (ζ, jednadžba 2.3) nacrtana za različite vremenske korake ovisne o vlastitom periodu bazena T_0, pri čemu je $P_0 = 3$ hPa, $\rho = 1025$ kg/m^3, $H = 50$ m, $g = 9,81$ m/s^2, $L = 300$ km, a kružna frekvencija σ i valni broj k odgovaraju beskonačnom sinusnom poremećaju valne duljine 600 km koji se kreće brzinom od 24 m/s.

Denivelacija je superpozicija putujućeg vala i dva stojna vala (jednadžba 2.3). Član U_0 sadrži u sebi Proudmanovu rezonanciju (poklapanje brzine poremećaja i brzine slobodnih valova dovodi do pojave rezonancije) dok član $sin(\frac{\sigma L}{\sqrt{gh}})$ sadrži Chrystalovu rezonanciju

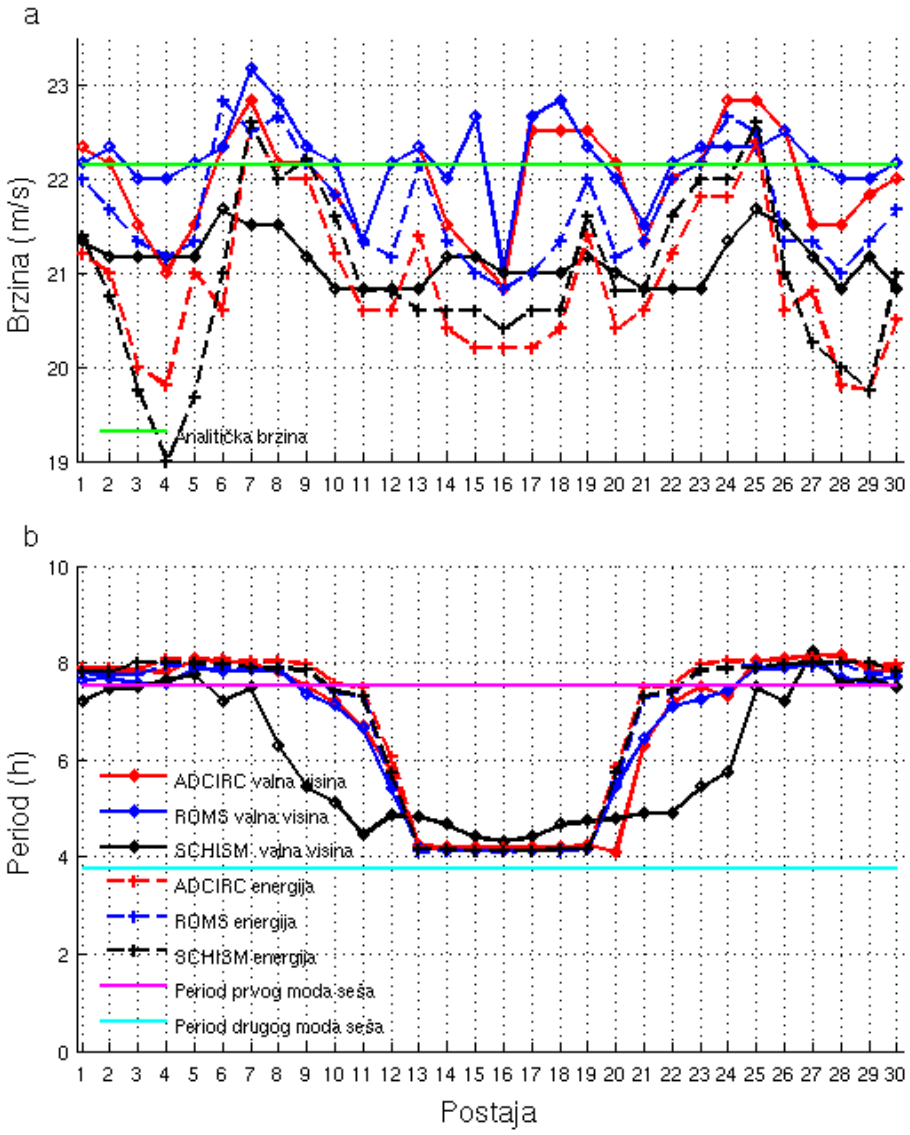
(kad $\frac{\sigma L}{\sqrt{gh}} = n\pi$, $n = 0, 1, 2, ...$ javlja se beskonačno povećanje amplitude). Slika 2.7 prikazuje denivelaciju u bazenu za nekoliko vremenskih koraka. Očito je da u centru bazena nema čvora i iz tog razloga razina mora u centru bazena nije ista kao ona koja se očekuje kod osnovne oscilacije seša. Posljedica toga je da se periodi izračunati iz maksimalnih valnih visina (i integriranih spektara gustoće energije) razlikuju od vlastitih perioda bazena. Ta razlika mogla bi objasniti i manja odstupanja koja se javljaju na lijevom i desnom kraju bazena.

Na slici 2.8 prikazane su maksimalna valna visina i integrirani spektar gustoće energije za dvostruki sinusni poremećaj, za sva tri modela. Očito je da dvostruki sinusni poremećaj prenosi više energije u bazen nego jednostruki pa su u skladu s time i vrijednosti valne visine i energije veće za taj slučaj. Vidljiva je razlika i u Proudmanovoj rezonanciji. Ona se za jednostruki sinus može razaznati do valne duljine 400 km (omjer 1,3) i bolje je definirana preko valne visine nego energije. Kod dvostrukog se sinusa Proudmanova rezonancija javlja za još kraće valne duljine (omjer valne duljine i duljine bazena do 1, odnosno omjer ukupne duljine poremećaja i duljine bazena do 2) s time da je i dalje bolje definirana preko valne visine nego energije. Prijelaz iz jedne rezonancije u drugu za dvostruki sinus počinje već oko omjera 1 na rubovima bazena, prema sredini i na manjim omjerima, a s obzirom da je u sustavu više energije, na slikama se bolje vidi da je riječ o dva odvojena režima. Chrystalova rezonancija također nije jednako prikazana u oba seta simulacija. Osim što su za dvostruki sinus energije veće, maksimumi se ne javljaju na istim mjestima, odnosno period seša je manji za dvostruki sinus nego za jednostruki (na rubovima bazena to vrijedi za prikaz preko energija, dok u sredini bazena vrijedi općenito, slika 2.9). Osim toga, vrijednosti su ujednačenije za dvostruki sinus nego jednostruki. Moguće je da se to događa zato što je u sustavu više energije pa su i maksimumi jače izraženi u odnosu na okolne vrijednosti. Na nekim se postajama (npr. postaja 10, slika 2.10) Proudmanova rezonancija javlja samo za najmanje valne duljine, a već nakon toga se vidi prijelaz u Chrystalovu rezonanciju i to u viši mod što je vidljivo iz nagiba pravca odnosno omjera valne duljine i brzine propagacije poremećaja, dok nakon omjera 2 ipak prevlada prvi mod. Naznake takvog ponašanja vidljive su kod jednostrukog sinusa, ali su očitije kod dvostrukog, gdje je ponašanje vidljivo i za valne visine, a ne samo energije.

Zaključno, oba seta simulacija daju slične rezultate, ali je kod dvostrukog sinusa prijelaz iz jedne u drugu rezonanciju jasnije naglašen, a Chrystalova rezonancija pokazuje periode



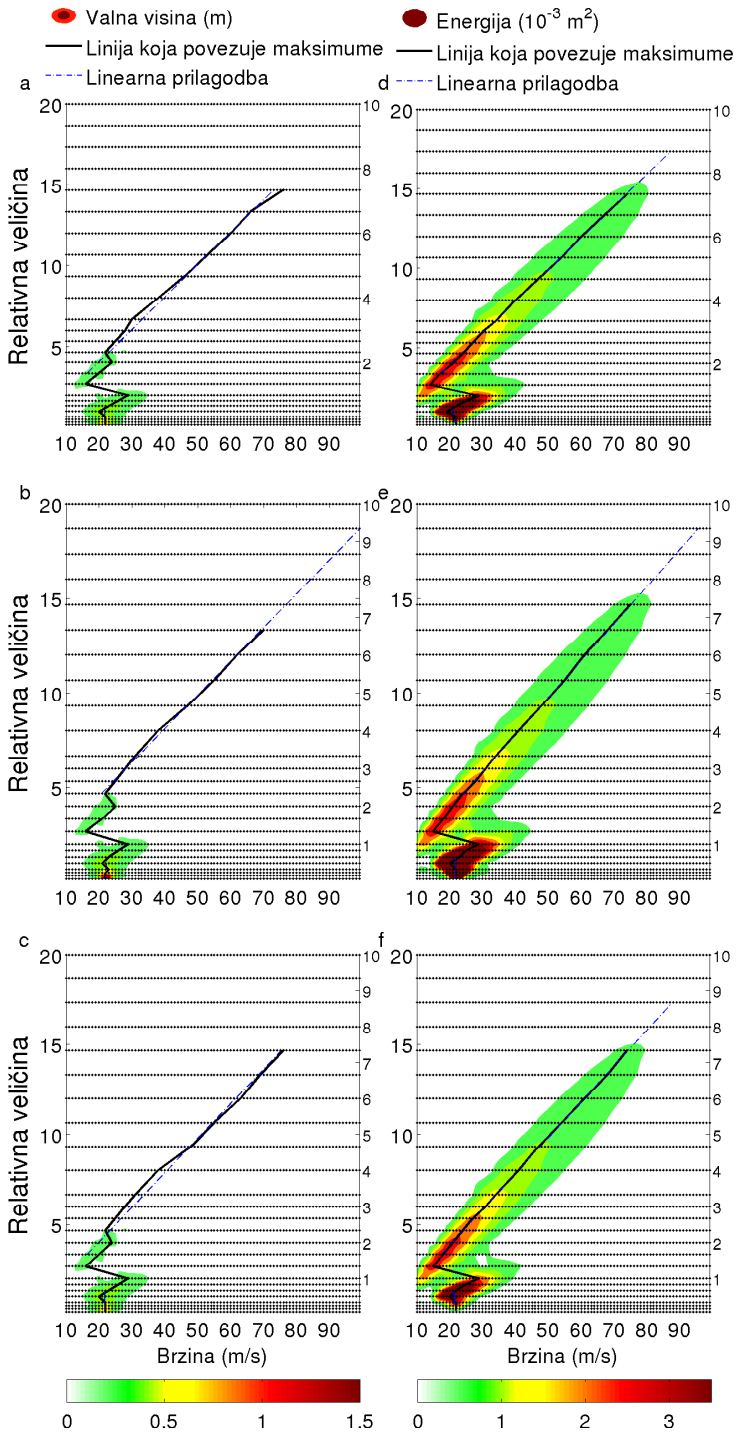
Slika 2.8: Odozgora prema dolje, rezultati dobiveni modelom: ADCIRC (a i d), ROMS (b i e) i SCHISM (c i f). Na lijevoj strani (a–c) je maksimalna valna visina (m), a na desnoj (d–f) integrirani spektar gustoće energije (10^{-3} m^2) za sinusne poremećaje tlaka zraka na postaji 30, za dvostruki sinus. Apscisa pokazuje brzinu propagacije poremećaja, a ordinata na lijevoj strani omjer veličine poremećaja i bazena a na desnoj omjer valne duljine poremećaja i duljine bazena. Crne točke označavaju simulacije, crna linija povezuje maksimalne vrijednosti simulacija po pojedinim duljinama poremećaja, a isprekidana plava linija linearnu prilagodbu za te maksimume. Ignorirale su se vrijednosti manje od 0,08 m za valnu visinu i 0,0005 m^2 za energiju.



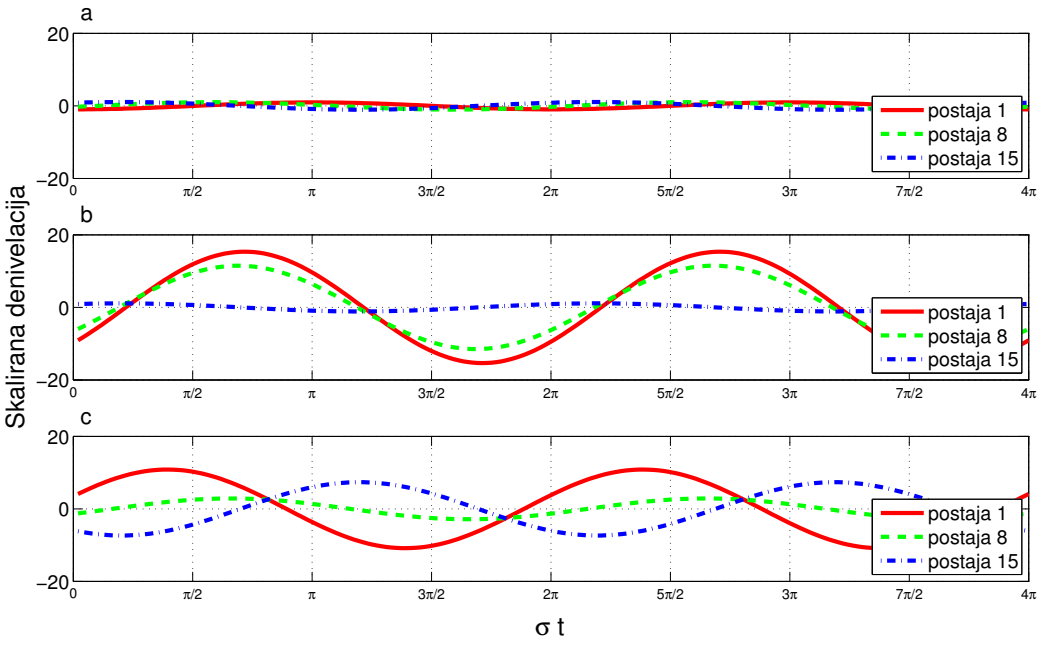
Slika 2.9: Rezonantna brzina za dvostruki sinus usrednjena preko sinusnih poremećaja valne duljine do 200 km, izračunata iz valnih visina (puna linija) i integriranog spektra gustoće energije (isprekidana linija) za sva tri modela na svim postajama (a). Period seša za dvostruki sinus usrednjen preko sinusnih poremećaja valne duljine veće od 400 km, izračunat iz valnih visina (puna linija) i integriranog spektra gustoće energije (isprekidana linija) za sva tri modela na svim postajama (b).

bliže teoretskima nego kod jednostrukog sinusa. S druge strane, dvostruki sinus slabije prikazuje Proudmanovu rezonanciju koja se javlja na manjim valnim duljinama nego kod jednostrukog sinusa.

Zanimljivo je detaljnije promotriti i analitički slučaj propagacije sinusnog poremećaja koji se ponavlja u beskonačnost iznad idealiziranog pravokutnog bazena uniformne dubine [48]. Polazne jednadžbe dane su izrazom 2.2, a rješenje za denivelaciju izrazom 2.3.



Slika 2.10: Odozgora prema dolje, rezultati dobiveni modelom: ADCIRC (a i d), ROMS (b i e) i SCHISM (c i f). Na lijevoj strani (a–c) je maksimalna valna visina (m), a na desnoj (d–f) integrirani spektar gustoće energije (10^{-3} m^2) za sinusne poremećaje tlaka zraka na postaji 10, za dvostruki sinus. Apscisa pokazuje brzinu propagacije poremećaja, a ordinata na lijevoj strani omjer veličine poremećaja i bazena a na desnoj omjer valne duljine poremećaja i duljine bazena. Crne točke označavaju simulacije, crna linija povezuje maksimalne vrijednosti simulacija po pojedinim duljinama poremećaja, a isprekidana plava linija linearnu prilagodbu za te maksimume. Ignorirale su se vrijednosti manje od 0,08 m za valnu visinu i 0,0005 m^2 za energiju.



Slika 2.11: Denivelacija (jednadžba 2.3) skalirana s $P_0/g\rho$: odziv mora na forsiranje koje ne izaziva rezonanciju ($c \ll \sqrt{gH}$, a); rezonantno pobuđivanje osnovnog moda bazena (Chrystalova rezonancija, $c < \sqrt{gH}$, b); rezonantno pobuđivanje višeg moda i progresivnog vala u bazenu (kombinirana Chrystalova i Proudmanova rezonancija, $c \approx \sqrt{gH}$, c), za omjer dimenzija poremećaja i bazena 0,3.

Rješenje za brzinu glasi:

$$u = U_0 cos(kx - \sigma t) - U_0 \frac{sin\left(\frac{\sigma x}{\sqrt{gH}}\right)}{sin\left(\frac{\sigma L}{\sqrt{gH}}\right)} cos(kL - \sigma t) +$$

$$+ U_0 \frac{sin[\frac{\sigma}{\sqrt{gH}}(x - L)]}{sin\left(\frac{\sigma L}{\sqrt{gH}}\right)} cos(\sigma t), \tag{2.4}$$

$$U_0 = -\frac{c}{1 - \frac{c^2}{gH}} \frac{P_0}{\rho g H},$$

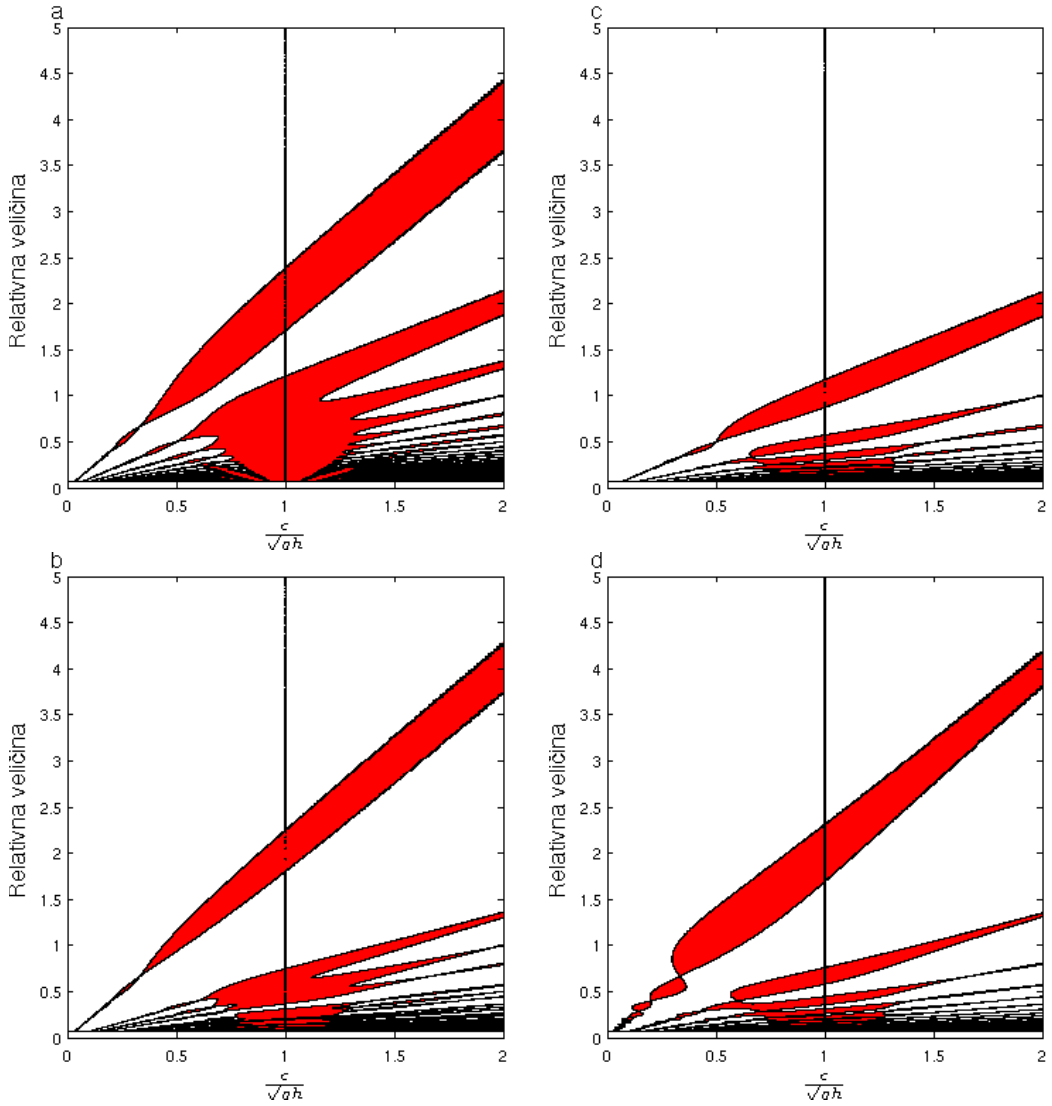
pri čemu je $c = \sigma/k$. U tom je slučaju izraz za potencijalnu energiju:

$$
\begin{aligned}
E_p &= \frac{1}{T}\int_0^{2\pi/\sigma} \zeta^2 dt = \frac{1}{2}(A^2+B^2),\\
A &= -\frac{P_0}{g\rho}\frac{1}{1-\frac{c^2}{gH}}\left[cos(\alpha kL) - \frac{c}{\sqrt{gH}}\frac{sin(kL)}{sin(\frac{ckL}{\sqrt{gH}})}cos\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right)\right],\\
B &= -\frac{P_0}{g\rho}\frac{1}{1-\frac{c^2}{gH}}\left[sin(\alpha kL) + \frac{c}{\sqrt{gH}}\frac{cos(kL)}{sin(\frac{ckL}{\sqrt{gH}})}cos\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right) - \right.\\
&\quad \left. -\frac{c}{\sqrt{gH}}ctg\left(\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right)cos\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right) - \frac{c}{\sqrt{gH}}sin\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right)\right],
\end{aligned}
\tag{2.5}
$$

a izraz za kinetičku energiju:

$$
\begin{aligned}
E_k &= \frac{1}{T}\int_0^{2\pi/\sigma} u^2 dt = \frac{1}{2}(C^2+D^2),\\
C &= -\frac{c}{H}\frac{P_0}{g\rho}\frac{1}{1-\frac{c^2}{gH}}\left[cos(\alpha kL) - \frac{sin\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right)}{sin(\frac{ckL}{\sqrt{gH}})}cos(kL) + \frac{sin[\frac{ckL}{\sqrt{gH}}(\alpha-1)]}{sin(\frac{ckL}{\sqrt{gH}})}\right],\\
D &= -\frac{c}{H}\frac{P_0}{g\rho}\frac{1}{1-\frac{c^2}{gH}}\left[sin(\alpha kL) - \frac{sin\left(\alpha\frac{ckL}{\sqrt{gH}}\right)}{sin(\frac{ckL}{\sqrt{gH}})}sin(kL)\right],
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

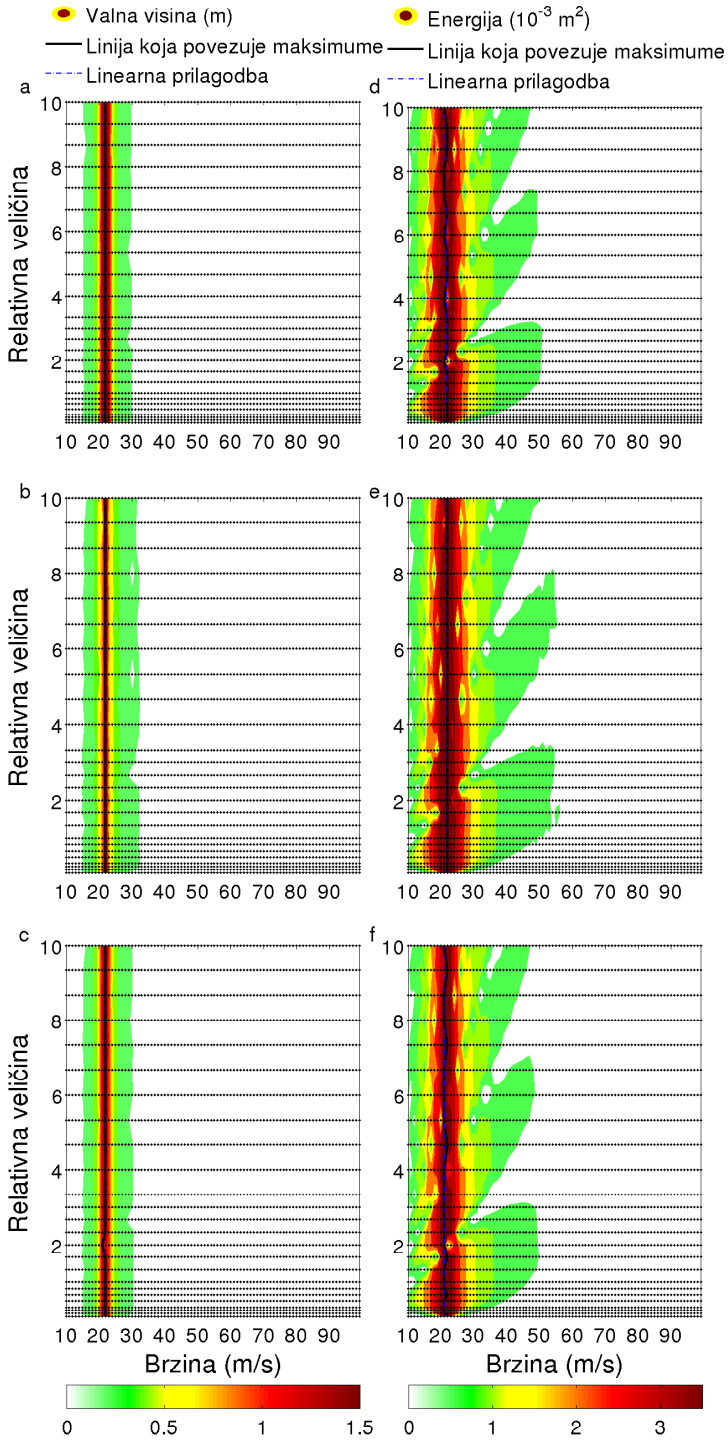
pri čemu je $\alpha = x/L$ i vrijedi $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$. Grafički prikazi rješenja za denivelaciju i potencijalnu energiju vidljivi su na slikama 2.11 i 2.12a, b i c. Chrystalova rezonancija javlja se u bazenima svih dimenzija i izaziva značajne oscilacije razine mora. Proudmanova rezonancija također izaziva oscilacije morske razine, ali one dolaze do izražaja u bazenima koji su veliki u odnosu na valnu duljinu atmosferskog poremećaja. Moguće je da se u bazenu istovremeno javljaju obje vrste rezonancije. Ako se pogleda slika 2.12 i fiksira relativna veličina na 0,3, tada se vidi da za $c \ll \sqrt{gh}$ nema značajnog odziva u bazenu. U području gdje je $c < \sqrt{gh}$ može se naći Chrystalova rezonancija, dok se u području $c \approx \sqrt{gh}$ mogu istovremeno javiti obje vrste rezonancija. Iz rješenja za kinetičku energiju (slika 2.12d) vidljivo je da Chrystalova rezonancija može prouzročiti jake struje, neovisno o dimenziji bazena. Proudmanova rezonancija također izaziva promjene u strujanju koje postanu izraženije kad je dimenzija bazena velika u odnosu na valnu duljinu poremećaja.



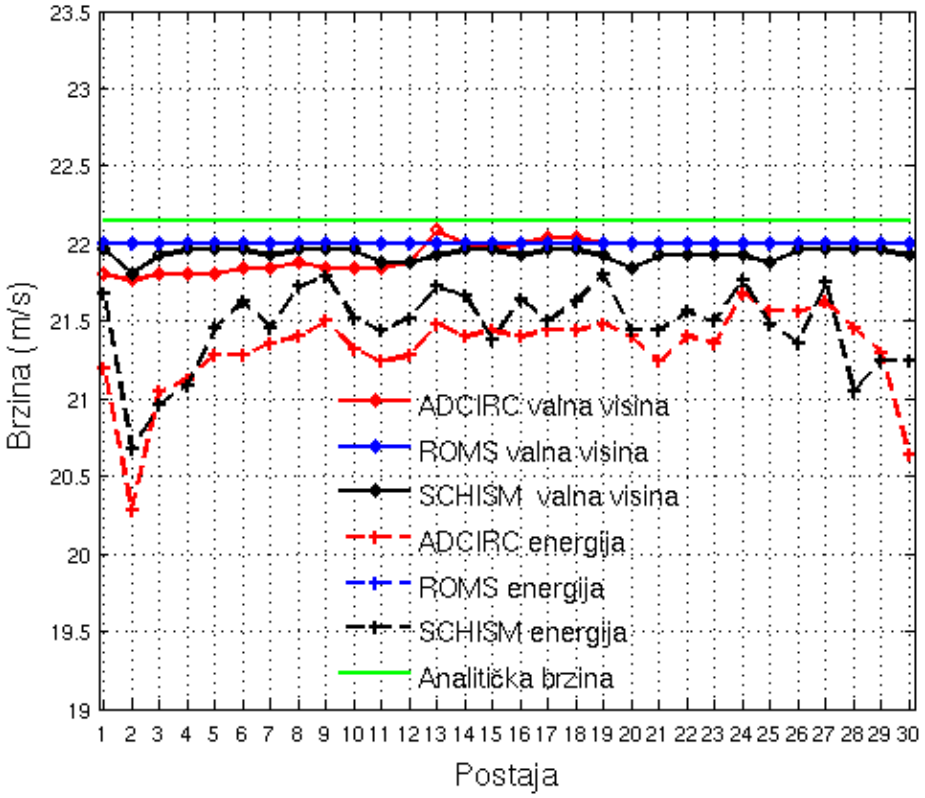
Slika 2.12: Potencijalna energija (jednadžba 2.5, a–c) skalirana s $\frac{1}{2}(\frac{P_0}{g\rho})^2$ i kinetička energija (jednadžba 2.6, d) skalirana s $\frac{1}{2}(\frac{c}{H}\frac{P_0}{g\rho})^2$ u ovisnosti o omjeru brzine poremećaja i slobodnih valova (x os) i omjeru valne duljine poremećaja i duljine bazena (y os), na postajama 1 (a), 8 (b) i 15 (c, d). Obojana su područja gdje je vrijednost veća od 10.

Analitički slučaj odnosi se na propagaciju beskonačnog sinusa i nije ga moguće numerički modelirati. Iako takav poremećaj nije realan, rješenja nam daju indikaciju o različitim odzivima bazena na različite veličine poremećaja.

Na slici 2.13 mogu se vidjeti maksimalne valne visine za sve duljine i brzine „boxcar" poremećaja, na postaji 30, za sva tri modela. Maksimalna valna visina pojavljuje se oko brzine slobodnih valova u bazenu (koja iznosi $\approx 22,15$ m/s za bazen dubine 50 m), neovisno o veličini poremećaja. Iznosi maksimalnih valnih visina integriranog spektra gustoće energije relativno su konstantni i također ne ovise o veličini poremećaja. Detaljnija provjera



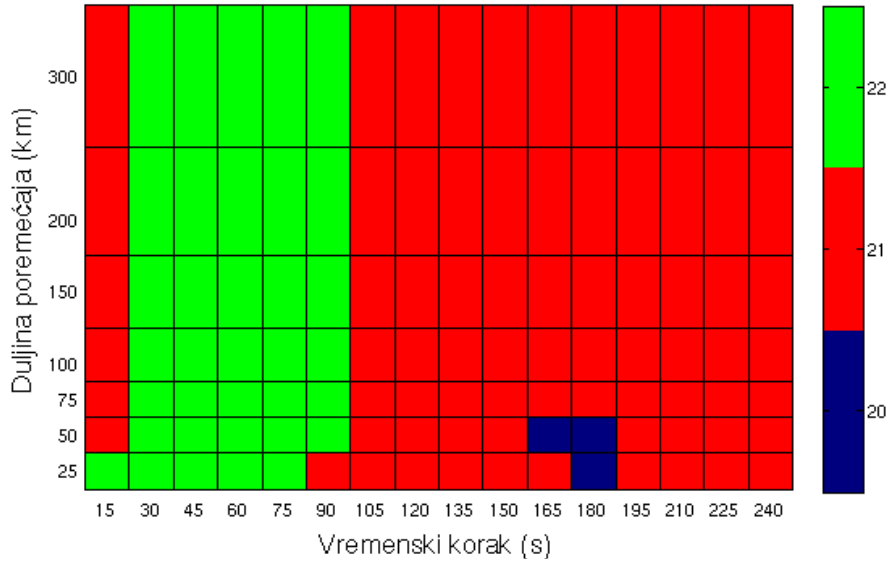
Slika 2.13: Odozgora prema dolje, rezultati dobiveni modelom: ADCIRC (a i d), ROMS (b i e) i SCHISM (c i f). Na lijevoj strani (a–c) je maksimalna valna visina (m), a na desnoj (d–f) integrirani spektar gustoće energije (10^{-3} m^2) za „boxcar" poremećaje tlaka zraka na postaji 30. Apscisa pokazuje brzinu propagacije poremećaja, a ordinata omjer veličine poremećaja i bazena. Crne točke označavaju simulacije, crna linija povezuje maksimalne vrijednosti simulacija po pojedinim duljinama poremećaja, a isprekidana plava linija linearnu prilagodbu za te maksimume. Ignorirale su se vrijednosti manje od 0,08 m za valnu visinu i 0,0005 m^2 za energiju.



Slika 2.14: Rezonantna brzina usrednjena preko svih duljina „boxcar" funkcije, izračunata iz valnih visina (puna linija) i integriranog spektra gustoće energije (isprekidana linija) za sva tri modela na svim postajama.

rezultata pokazuje da ne daju svi modeli rezonanciju na 22,15 m/s za svaku simulaciju. Usrednjena rezonantna brzina za sve veličine poremećaja po postajama prikazana je na slici 2.14, a rezonantna brzina usrednjena preko svih dimenzija poremećaja i svih postaja dana je u tablici 2.1. Rezultati najbliži analitičkom rješenju dobiveni su ROMS-om koji je za „boxcar" poremećaj dao rezonantnu brzinu na 22 m/s za svaku simulaciju, gledano i preko valnih visina i integriranih spektara gustoće energije. ADCIRC i SCHISM uglavnom malo podcjenjuju tu vrijednost.

Sva tri modela daju vrijednosti koje su blizu analitičkom rješenju. Mala odstupanja od analitičkih rezultata na prvi se pogled možda čine nevažnima, ali, kod nekih fenomena, ona mogu igrati presudnu ulogu. Kao što su pokazali Orlić i sur. [12], Proudmanova rezonancija je prvi korak u generiranju meteotsunamija i zaslužna je za inicijalni porast valne visine. Taj proces nije jedini faktor koji odlučuje hoće li se na nekom području razviti meteotsunami [28] jer je potrebno razmotriti orijentaciju i oblik bazena kao i kut propagacije poremećaja tlaka zraka [11], ali je nužan uvjet za njihov nastanak. Zbog toga je



Slika 2.15: SCHISM – rezonantna brzina (m/s) u ovisnosti o vremenskom koraku modela i duljini „boxcar" poremećaja tlaka zraka.

važno modelirati Proudmanovu rezonanciju što je moguće točnije, a da bi se to napravilo moraju se uzeti u obzir ograničenja modela. Iako sva tri ovdje korištena modela rješavaju Navier-Stokesove jednadžbe s hidrostatskom i Boussinesqovom aproksimacijom, postoje razlike u načinu izvedbe vremenske integracije. ADCIRC i ROMS koriste eksplicitne vremenske sheme i CFL kriterij zahtijeva da im Courantov broj bude manji od 1. SCHISM koristi semi-implicitnu metodu vremenske integracije koja omogućava veće vremenske korake i veću efikasnost u dubljim dijelovima domene čak i uz mrežu s finom rezolucijom. Konkretno, u SCHISM-u bi vremenski korak trebao zadovoljiti uvjet da je Courantov broj veći od 0,4 jer će u području ispod te vrijednosti greška difuzije postati dovoljno velika da dominira rješenjem, ali isto tako prevelik vremenski korak znači da će rješenje preuzeti greška odsijecanja. Na mreži koja se koristila u ovim simulacijama minimalni vremenski korak je 30 s, ali i za prevelike korake se dobiva fizikalno neispravno rješenje. Slika 2.15 pokazuje rezonantnu brzinu za Proudmanovu rezonanciju u idealiziranom pravokutnom bazenu korištenom za dosadašnje simulacije, u ovisnosti o vremenskom koraku u simulacijama SCHISM-om. Jasno je da je vremenski korak korišten u ovom istraživanju (90 s) najveći dozvoljeni prije nego greška odsijecanja počne utjecati na rezultate. Imajući na umu da je mreža za SCHISM u ovim simulacijama napravljena iz pravokutne mreže te da je Courantov broj jednak za sve elemente mreže (dubine su jednake u cijelom bazenu), to nije problematično. Međutim, mreža konačnih elemenata za realistični bazen i dubine

imat će čitav raspon Courantovih brojeva koji će se razlikovati za relativno velike elemente na otvorenom moru i relativno male elemente u plitkim obalnim područjima. Potrebno je imati na umu greške koje se mogu javiti zbog neadekvatno određenog vremenskog koraka te kako krivo modelirana Proudmanova rezonancija na otvorenom moru može utjecati na rezultate u obalnim područjima.

Unatoč tome što je najbolje rezultate za modeliranje Proudmanove rezonancije dao ROMS, on nije odabran za daljnji rad jer je riječ o modelu konačnih razlika. Da bi se modelom konačnih razlika postigla fina rezolucija u obalnom području potrebno je ugnježđivati domene što sa sobom nosi različite tipove rubnih uvjeta na rubovima domena kao i različite razine komunikacije između njih. Model konačnih elemenata, s druge strane, omogućava profinjenje rezolucije na jednoj mreži tako da jedna domena može istovremeno imati grublju rezoluciju na otvorenom moru i finiju rezoluciju uz obalu. S obzirom da je odluka bila između dva modela konačnih elemenata, odabran je ADCIRC za koji je CFL kriterij, odnosno odabir vremenskog koraka, jednostavniji i manja je mogućnost za krivo modeliranje Proudmanove rezonancije.

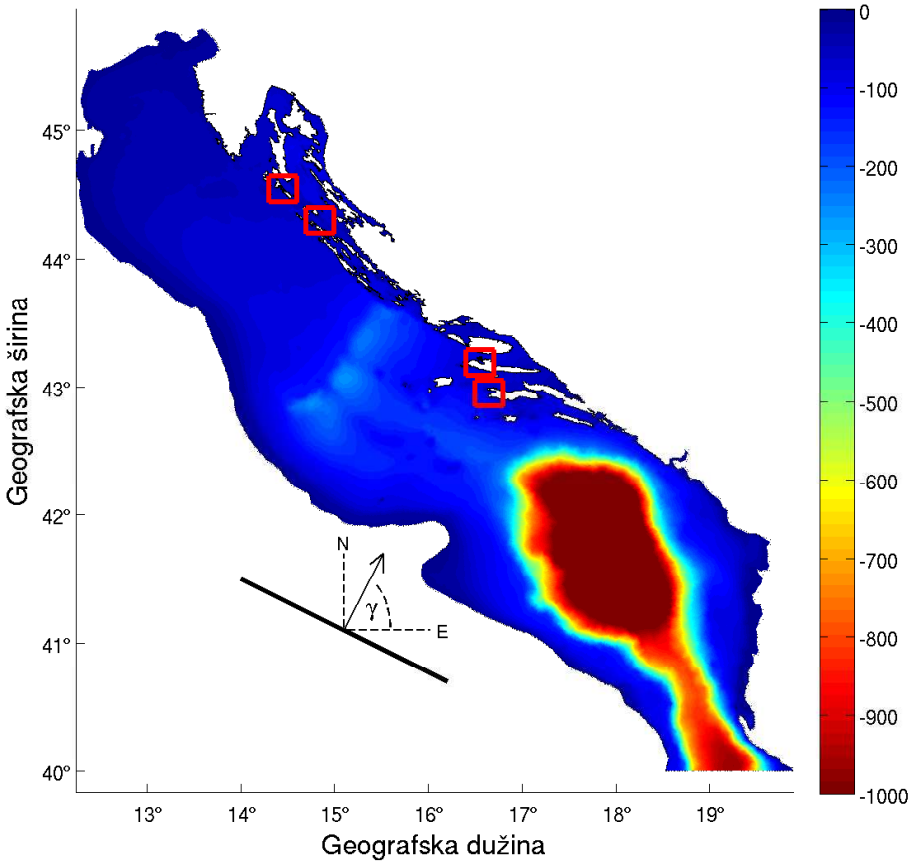
3. SIMULACIJE METEOTSUNAMIJA U JADRANU UZ DEFINIRANJE MINIMALNE DUBINE U MODELU

3.1 Metode

Nakon odabira modela, sljedeći je korak bio modeliranje događaja u Jadranu. Domena je obuhvaćala cijeli Jadran, a na Otrantu je rubnim uvjetom zadano da denivelacija iščezava ($\zeta = 0$). Prostorni korak mreže kretao se od nekoliko kilometara na otvorenom moru do nekoliko stotina metara u obalnim područjima. Vremenski je korak bio 0,5 s, a simulacije su trajale 12 sati što je bilo dovoljno vremena da poremećaj prijeđe preko domene, ali premalo vremena da bi valovi koji se eventualno reflektiraju na Otrantu mogli utjecati na rezultate. Simulacije su napravljene za 2D slučaj bez rotacijskih i plimnih efekata, a jedino eksterno forsiranje bio je putujući poremećaj u polju tlaka zraka. Sve su simulacije počinjale u ravnotežnom stanju, nakon čega bi poremećaj tlaka zraka počeo propagirati od talijanske prema hrvatskoj obali. Poremećaj je uvijek bio oblika „boxcar" funkcije i imao širinu (u smjeru okomitom na smjer propagacije) 200 km. Oblik je odabran jer „boxcar" funkcija daje nagli skok i pad tlaka koji su karakteristični za ovakve događaje, a sama mjerenja tlaka su malobrojna i sporadična te nije moguće znati kako je poremećaj izgledao na cijeloj svojoj putanji. Amplituda, trajanje, brzina i smjer propagacije poremećaja ovisili su o pojedinom događaju (slika 3.1). Modeliranje je izvršeno za četiri povijesna događaja:

1. Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine,
2. Široka na Istu 22. kolovoza 2007. godine,
3. Mali Lošinj na Lošinju 15. kolovoza 2008. godine i
4. Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine.

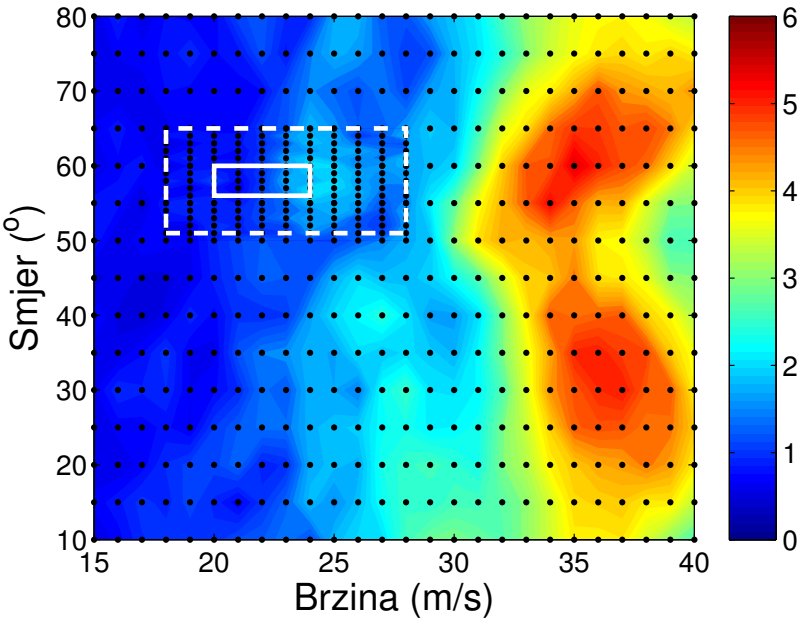
U svim simulacijama korištena je tzv. „cut-off" dubina, odnosno minimalna dozvoljena dubina mora u bazenu. U ovom je slučaju ta minimalna dubina iznosila 4 m, dakle svi čvorovi mreže čija je dubina manja od toga za trajanja simulacije tretiraju se kao da im je dubina 4 m. Definiranje minimalne dubine potrebno je zbog numeričke stabilnosti modela, a vrijednost od 4 m odabrana je zbog usporedivosti rezultata s onima dobivenim za Velu Luku u radu Orlić i sur. [12] te je korištena i u simulacijama za preostala tri događaja.



Slika 3.1: Domena modela s označenim dubinama mora (m). Crveni kvadrati označavaju Mali Lošinj na Lošinju, Široku na Istu, Stari Grad na Hvaru i Velu Luku na Korčuli. Poremećaj tlaka zraka označen je crnom linijom, γ je kut propagacije koji je ovisio o modeliranom događaju. Početna pozicija poremećaja također je ovisila o modeliranom događaju.

3.2 Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine

Događaj u Veloj Luci od 21. lipnja 1978. godine najpoznatiji je meteotsunami u Jadranu, a ekstremna valna visina od oko 6 m koja je tada zabilježena doprinijela je početku istraživanja tog fenomena u ovim krajevima. Osim već spomenutih radova koji su se bavili uzrokom poplavljivanja, nekoliko se radova fokusiralo na numeričko modeliranje tog događaja. Glavni je rad Orlića i sur. iz 2010. [12] i u ovom se istraživanju krenulo od reprodukcije rezultata tog istraživanja. Sintetički poremećaj tlaka zraka imao je amplitudu od 3 hPa, trajao je 10 min te je propagirao od talijanske prema hrvatskoj obali s brzinama od 15 do 40 m/s (s korakom od 1 m/s) i smjerovima od 10° do 80° (s korakom od 5°, osim za brzine 18–28 m/s i kutove 50°–65°gdje je korak bio 1°). Za svaku simulaciju zabilježena je maksimalna valna visina na vrhu Zaljeva Vela Luka (slika 3.2). Vidljivo je

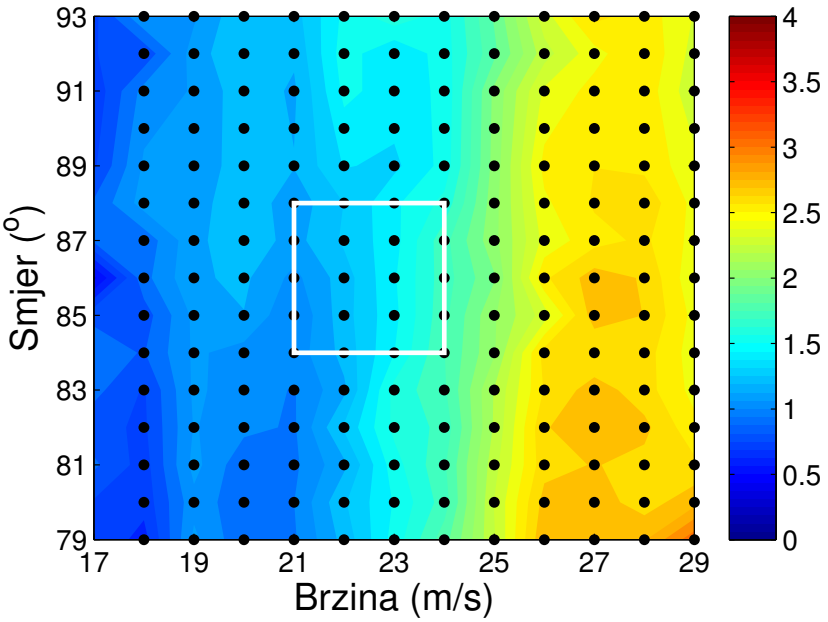


Slika 3.2: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Vela Luka na Korčuli u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka. Bijeli pravokutnici označavaju raspone brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 21. lipnja 1978. godine - punom linijom označen je raspon određen u Orlićevom radu iz 1980. [24], a crtkanom linijom raspon dobiven u radu Orlića i sur. iz 2010. [12] u kojem se pretpostavilo da je vremenska greška barografskih zapisa bila ±10 min. Crne točke označavaju simulacije.

da se maksimumi vrijednosti pojavljuju za brzine iznad 30 m/s, međutim pretpostavka je da poremećaj tlaka zraka koji je taj dan zabilježen upada u manji raspon brzina i kutova (bijeli pravokutnici na slici 3.2, [12, 24]). Za taj je raspon maksimalna modelirana valna visina iznosila malo više od 2 m. Iako je to vrlo dobar rezultat – dva reda veličine veći od početnog poremećaja – i dalje je samo trećina opažene vrijednosti, što ukazuje na to da pristup koji koristi definiranu minimalnu dubinu nije dovoljno dobar za kvalitetno modeliranje ekstremnih događaja.

3.3 Široka na Istu 22. kolovoza 2007. godine.

Meteotsunami koji je pogodio Ist 22. kolovoza 2007. godine u poslijepodnevnim satima dosegao je valnu visinu od 4 m i uzrokovao značajnu materijalnu štetu te je jedna osoba bila ozlijeđena. Šepić i sur. su u svom radu iz 2009. godine proučavali mehanizam nastanka te poplave [25]. Zaključili su da je uzrok bio dvojak – na otvorenom moru pojavila se Proudmanova rezonancija, a valovi su nakon toga bili dodatno amplificirani u zaljevu. Poremećaj tlaka zraka kretao se brzinom od 21–24 m/s, a kut nailaska bio je između 84°



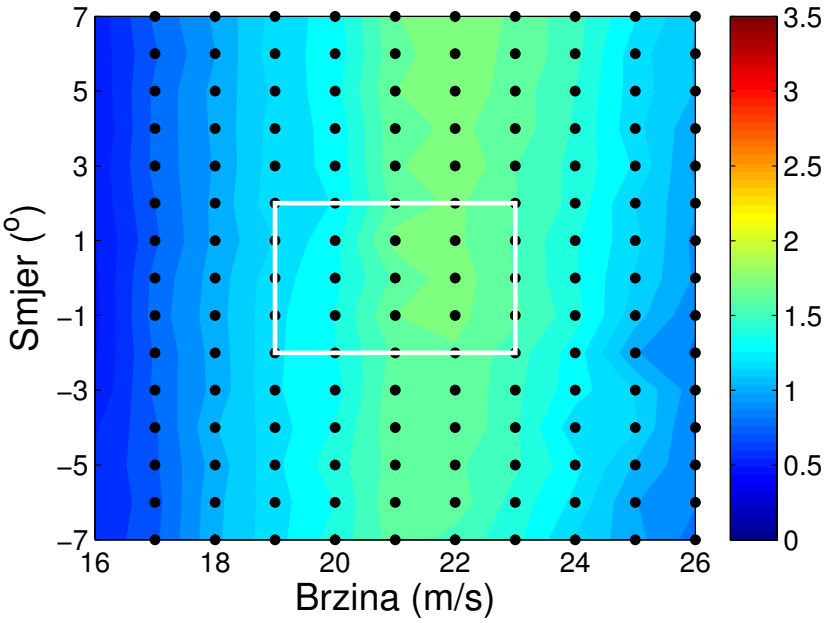
Slika 3.3: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Široka na Istu u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka. Bijeli pravokutnik označava raspon brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 22. kolovoza 2007. godine. Crne točke označavaju simulacije.

i 88°. Amplituda mu je bila oko 4 hPa, a ukupno trajanje oko 15 min. U ovom smo istraživanju proveli numeričke simulacije s tim parametrima (ali i za nešto širi raspon brzina i smjerova) kako bismo pokušali reproducirati zabilježenu valnu visinu. Rezultati su vidljivi na slici 3.3. U radu Šepić i sur. iz 2015. [28] modelirane su maksimalne očekivane vrijednosti valne visine za točku ispred ulaza u zaljev Široka i maksimum se javlja za brzine od 25–27 m/s za poremećaje koji stižu iz smjera jugozapada. U ovom se istraživanju pokazalo da se maksimum valne visine unutar zaljeva javlja za sličan raspon brzina, iako je poremećaj propagirao s juga. Za cjelokupni modelirani raspon brzina i kutova maksimalna valna visina je veća od 2,5 m, ali u onom dijelu koji odgovara događaju maksimalna vrijednost je oko 1,8 m. Iako se i u ovom slučaju radi o povećanju od dva reda veličine, to je tek pola opažene vrijednosti što nam ponovno ukazuje na to da pristup koji koristi definiranu minimalnu dubinu nije dovoljno dobar za precizno modeliranje ekstremnih događaja.

3.4 Mali Lošinj na Lošinju 15. kolovoza 2008. godine

U poslijepodnevnim satima 15. kolovoza 2008. godine more je poplavilo Mali Lošinj, a razina mora podigla se oko 80 cm iznad tla. Ukupna opažena valna visina dosegnula je oko

3,5 m, a mikrobarograf lociran u Malom Lošinju zabilježio je nagli skok tlaka zraka od oko 4 hPa, nakon što je veći dio dana tlak opadao. Poremećaj tlaka zraka trajao je prekratko



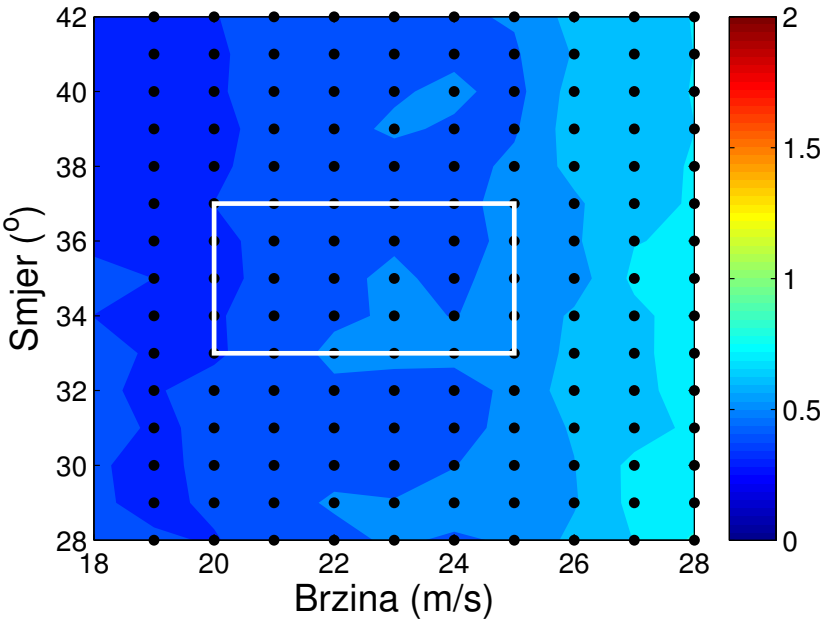
Slika 3.4: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Mali Lošinj na Lošinju u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka. Bijeli pravokutnik označava raspon brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 15. kolovoza 2008. godine. Crne točke označavaju simulacije.

da bi uzrokovao olujni uspor pa je poplavljivanje pripisano meteotsunamiju. Mareografi u okolnom području zabilježili su neuobičajeno velike oscilacije morske razine koje su ipak bile niže od onih na Lošinju što implicira pojavu lokalne lučke rezonancije u kombinaciji s Proudmanovom rezonancijom na otvorenom moru [49].

Poremećaj tlaka zraka trajao je oko pola sata, imao amplitudu od 4 hPa, brzinu između 19 i 23 m/s te kut nailaska od -2° do 2°. Maksimalne valne visine modelirane za te parametre (i malo širi raspon brzina i smjerova propagacije poremećaja) prikazane su na slici 3.4. Poremećaj je stigao brzinom koja odgovara rezonantnom pobuđivanju, a kutovi ne odstupaju jako od kutova za maksimalnu pobudu. U radu Šepić i sur. iz 2015. [28] modelirane su maksimalne očekivane vrijednosti valne visine za točku ispred ulaza u zaljev Mali Lošinj prema kojem se maksimum za poremećaj koji stiže sa zapada javlja za brzine od 21–23 m/s što odgovara i maksimalnoj pobudi unutar zaljeva modeliranoj u ovom radu. Maksimalna modelirana valna visina za događaj iznosi oko 1,7 m. Amplifikacija je značajna u odnosu na početni poremećaj, ali i u ovom slučaju je vidljivo da ekstremna situacija nije dovoljno dobro prikazana jer je to tek pola opažene vrijednosti.

3.5 Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine

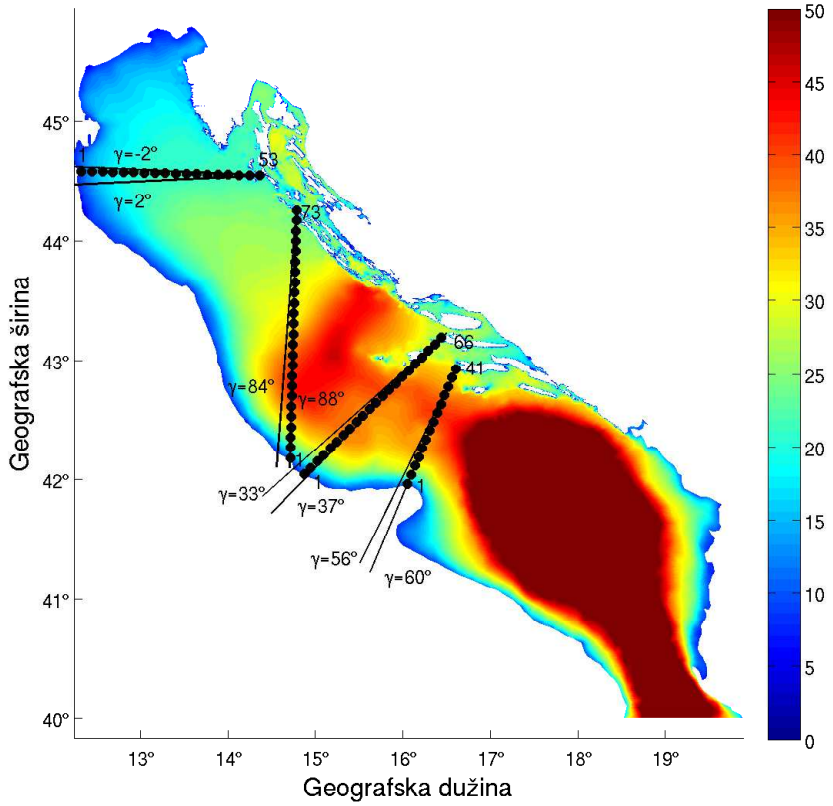
Stari Grad na Hvaru bio je poplavljen 19. veljače 2010. godine. Taj je dan u Starom Gradu došlo do olujnog uspora pod utjecajem polja niskog tlaka zraka s pripadnim vje-



Slika 3.5: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Stari Grad na Hvaru u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka. Bijeli pravokutnik označava raspon brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 19. veljače 2010. godine. Crne točke označavaju simulacije.

trovima koje je dominiralo na tom području. Poremećaj tlaka zraka koji je s pripadnim valnim paketom u moru došao do Vele Luke nadovezao se na već osjetno povećanu razinu mora i doveo do poplavljivanja [29]. Rasponi brzina i kutova koji odgovaraju poremećaju zapravo su granične vrijednosti koje uopće mogu izazvati meteotsunami u Starom Gradu [26] i moguće je da do poplavljivanja uopće ne bi ni došlo da nije bilo olujnog uspora koji je inicijalno podigao morsku razinu.

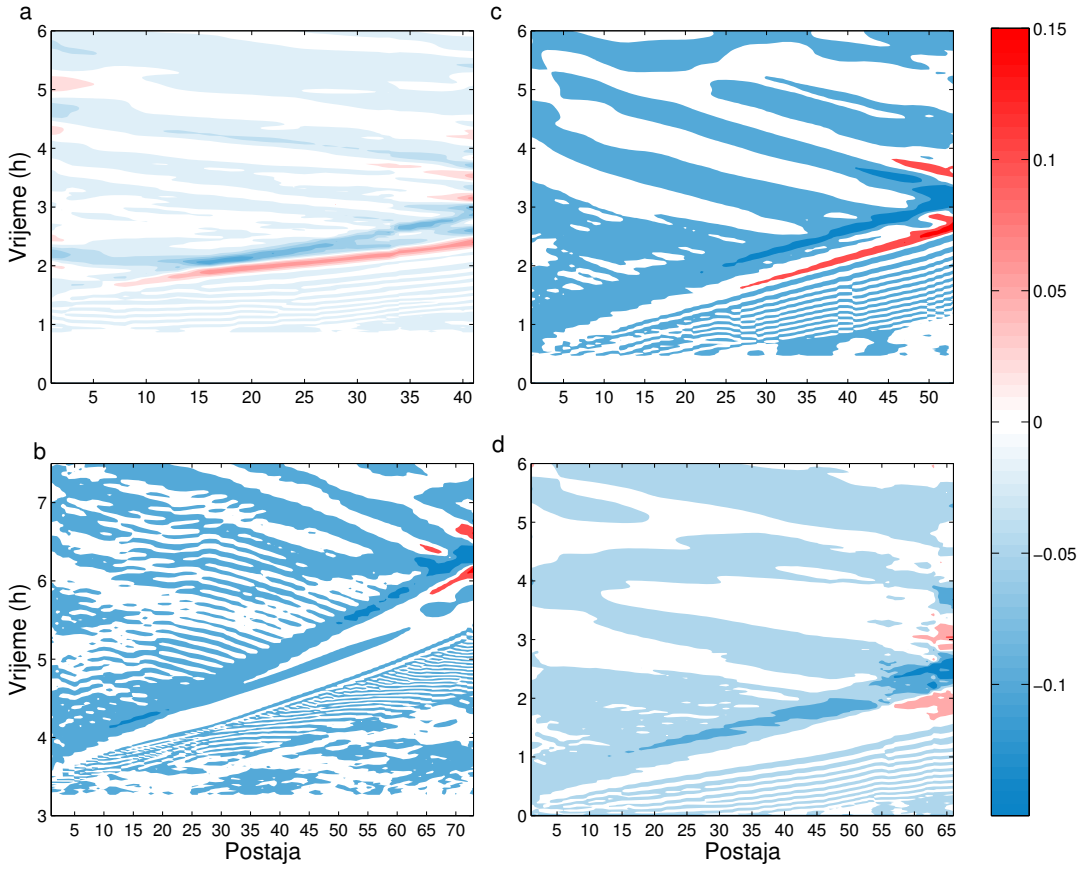
Poremećaj tlaka zraka imao je amplitudu od oko 2,5 hPa, trajao je oko pola sata te putovao brzinom između 20 i 25 m/s pod kutom od 33°–37°. Maksimalne modelirane valne visine na vrhu Zaljeva Stari Grad za te raspone brzina i kutova su do 60 cm (slika 3.5), a opaženo je skoro 2 m. U ovom je slučaju valna visina premalena da bi se modelirani događaj klasificirao kao ekstreman, ali je moguće da događaj sam po sebi ne bi bio ekstreman da nije bilo olujnog uspora koji u ovim simulacijama nije prisutan.



Slika 3.6: Iznosi brzine slobodnih valova u moru (m/s, obojano). Crnim linijama označeni su procijenjeni smjerovi nailaska poremećaja tlaka zraka od talijanske prema hrvatskoj obali, za sva četiri zaljeva. Crne točke označavaju smjer nailaska poremećaja tlaka zraka koji je nosio najviše energije, za svaki pojedini zaljev, a brojevima je označen broj postaja duž te putanje koje su korištene za pripremu slike 3.7.

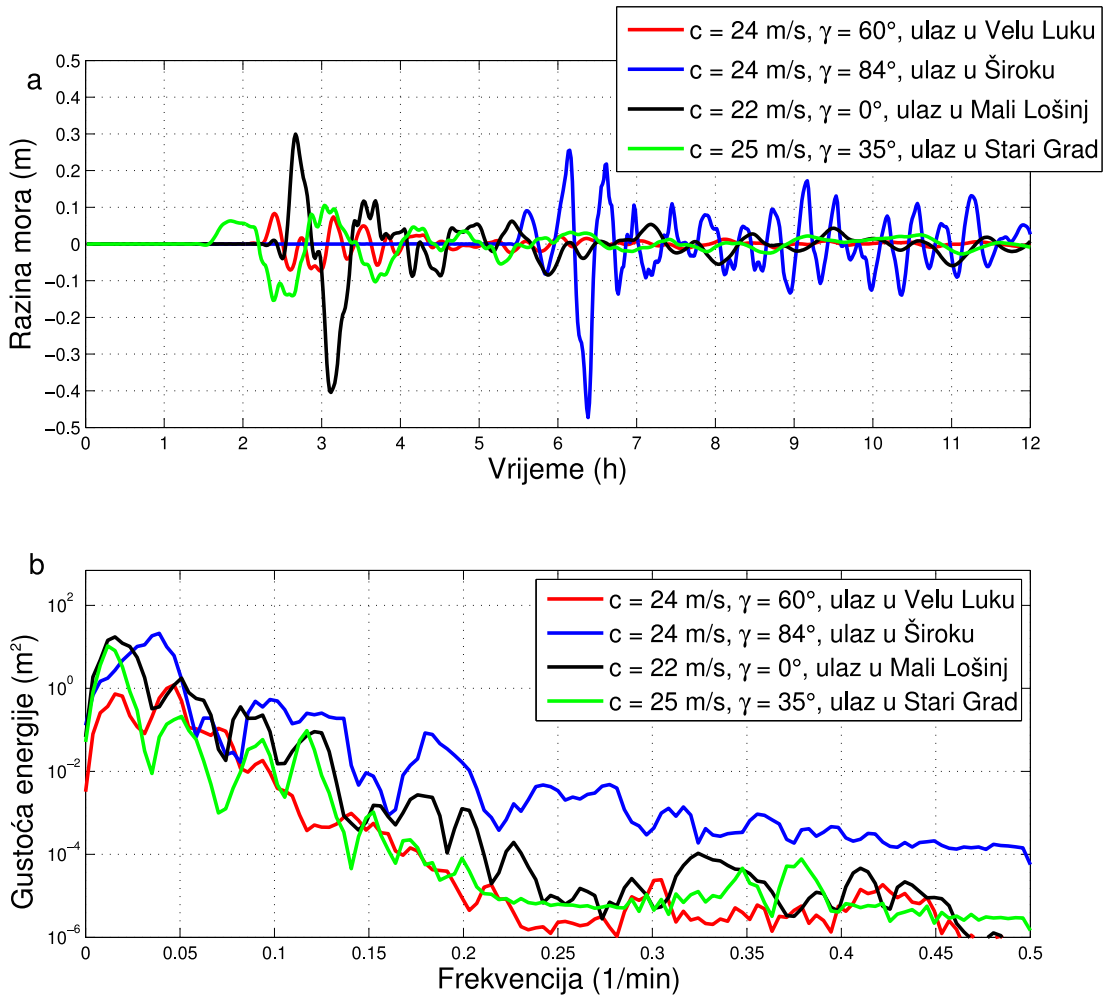
3.6 Valni paketi na otvorenom moru

Valni paket koji dolazi do ulaza u zaljev ovisi o obliku, brzini i trajanju atmosferskog poremećaja te o batimetriji iznad koje poremećaj putuje od talijanske prema hrvatskoj obali. Brzina slobodnih valova u Jadranu prikazana je na slici 3.6. Područje uz talijansku obalu je pliće i brzina slobodnih valova je manja. Na otvorenom moru sjevernog Jadrana, gdje je dubina do stotinjak metara, brzina slobodnih valova ima vrijednost do 30 m/s. Na srednjem Jadranu promjene dubine su izraženije pa tako i vrijednost brzine slobodnih valova puno više varira. Iako je, zbog ujednačenije dubine, područje sjevernog Jadrana podložno razvoju Proudmanove rezonancije (na slici 3.7 vidljivo je da su i pozitivna i negativna amplituda vala dosta velike na ulazu u zaljev Mali Lošinj), geometrija obale uglavnom nije pogodna za daljnje rezonantne procese potrebne za nastanak meteotsunamija i oni se tamo rjeđe javljaju [28].



Slika 3.7: Hovmoellerovi dijagrami razine mora (m) – na x osi označene su postaje duž Jadrana (skicirane na slici 3.6), a na y osi vrijeme (prvih šest sati simulacije) za četiri zaljeva: (a) Vela Luka na Korčuli (poremećaj putuje brzinom od 24 m/s, pod kutom od 60°), (b) Široka na Istu (poremećaj putuje brzinom od 24 m/s, pod kutom od 84°), (c) Mali Lošinj na Lošinju (poremećaj putuje brzinom od 22 m/s, pod kutom od 0°) i (d) Stari Grad na Hvaru (poremećaj putuje brzinom od 25 m/s, pod kutom od 35°).

Ovisno o brzini i smjeru nailaska poremećaja, valovi u moru gibat će se različitim putanjama. Valni paketi formirat će se u ovisnosti o pojavi Proudmanove rezonancije i refleksijama i transmisijama na područjima gdje se dubina mijenja [50]. Vremenski nizovi visine razine mora (slika 3.8a) na ulazima u zaljeve za sva četiri slučaja pokazuju slične iznose amplituda valova – povećanje od jednog reda veličine u odnosu na vrijednosti koje se dobiju efektom inverznog barometra. Najveći raspon vidljiv je za Široku zbog velike negativne amplitude, zatim slijedi Mali Lošinj te Stari Grad i Vela Luka. Velika amplituda dola vala koji stiže do ulaza Široku pripada prisilnom valu koji je putovao brzinom poremećaja tlaka zraka. Iznosi energija koje ti valni paketi donose također su slični (slika 3.8b) iako se maksimumi javljaju za različite frekvencije. Propagacija valova



Slika 3.8: Vremenski nizovi visine razine mora (a) i spektri gustoće energije (b) na ulazima u zaljeve Vela Luka, Široka, Mali Lošinj i Stari Grad.

od talijanske prema hrvatskoj obali vidljiva je na slikama A.1–**??**. Slike su napravljene za kombinacije brzina i smjerova koje su dovele do maksimalnih valnih visina unutar zaljeva. Na svim slikama slobodni val koji nastaje zbog rubnog uvjeta na talijanskoj obali putuje ispred vala forsiranog poremećajem tlaka zraka. Prelaskom preko Jadrana dolazi do povećanja amplitude valova i najveće su vrijednosti vidljive u obalnom području i pripadnim zaljevima. Prilikom propagacije valova dolazi i do refleksija te su vidljivi povećani iznosi visine razine mora i na pojedinim lokacijama na talijanskoj obali.

Ovi rezultati dobiveni su korištenjem „boxcar" funkcije za modeliranje poremećaja tlaka zraka. Za preciznije modeliranje bilo bi potrebno uzeti u obzir stvaran oblik poremećaja tlaka zraka. S obzirom na malen broj mikrobarografskih postaja, ne postoje mjerenja tlaka zraka duž čitave putanje poremećaja. Osim mjerenjima, poremećaj tlaka zraka mogao bi se opisati atmosferskim modelom, iako se i u tom pristupu mogu javiti problemi [12].

4. SIMULACIJE METEOTSUNAMIJA U JADRANU UZ KORIŠTENJE MODULA ZA POPLAVLJIVANJE I OSUŠIVANJE ČVOROVA MREŽE

4.1 Metode

U prošlom je poglavlju pokazano da je modeliranje s definiranom minimalnom dubinom reproduciralo povijesne meteotsunamije, ali ne na dovoljno precizan način, odnosno nisu bile reproducirane ekstremne valne visine. U svrhu poboljšanja rezultata provedene su simulacije za Velu Luku i Stari Grad, koje su koristile modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže. U modelu ADCIRC takav je algoritam prvi put implementiran 1995. godine [51]. Sam algoritam koristi pristup baziran na elementima što znači da uključuje ili isključuje elemente iz računanja ovisno o tome jesu li oni mokri ili suhi. Da bi se element definirao kao mokar ili suh u pojedinom vremenskom koraku bitne su dubina mora i nagib razine mora. Takav pristup je robustan u većini situacija ali može postati nestabilan u slučaju jako nelinearnih događaja [52]. Algoritam se nalazi u sredini vremenskog koraka, nakon što je pronađeno rješenje za generaliziranu valno-kontinuitetnu jednadžbu, ali prije rješenja za jednadžbe gibanja. Algoritam funkcionira tako da se prvo ukupna dubina vode na svakom čvoru usporedi s definiranom minimalnom dubinom koja označava čvor kao mokar, u praksi to iznosi između 1 i 10 cm, a u našem slučaju bila je postavljena na 10 cm. Ako je ukupna dubina veća od te minimalne tada čvor ostaje aktivan (mokar je) i uključen je u ostatak izračuna. U slučaju da je ukupna dubina manja od minimalne vrijednosti čvor se smatra neaktivnim (suhim) i isključuje se iz izračuna. U drugom koraku stacionarna brzina koja bi se razvila zbog ravnoteže nagiba razine vode i pridnenog trenja između mokrog i suhog čvora se uspoređuje s minimalnom brzinom za poplavljivanje čvora. Taj uvjet zapravo kaže da će se čvor poplaviti ako je slobodna razina mora na susjednom čvoru dovoljno viša nego na njemu.

Da bi modul za poplavljivanje i osušivanje funkcionirao, u mrežu modela bilo je potrebno osim batimetrije uključiti i topografiju. Topografija je preuzeta iz podataka Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2), kojima NASA omogućava pristup, a imaju re-

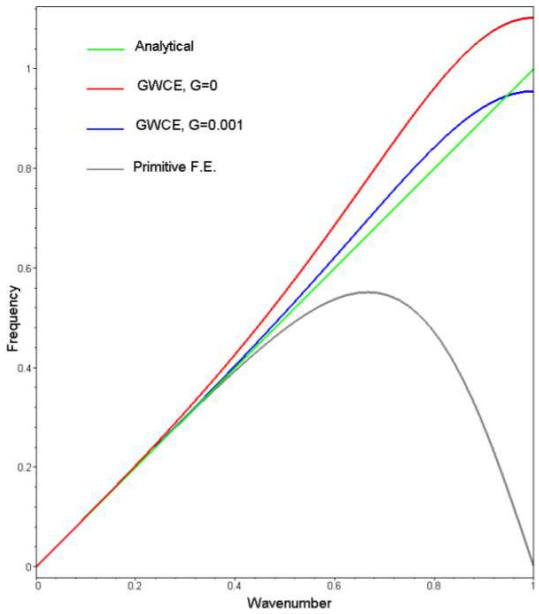
zoluciju 25 metara, te su dodani u zaljeve koje smo promatrali. U tim je zaljevima i batimetrija detaljnija nego u prethodnom setu simulacija, zahvaljujući podacima Hrvatskog hidrografskog instituta. Domena modela ponovno je bio cijeli Jadran, s otvorenom granicom na Otrantu gdje je postavljen rubni uvjet da denivelacija iščezava ($\zeta = 0$). Prostorna rezolucija sada se kretala od nekoliko kilometara na otvorenom moru do nekoliko desetaka metara u zaljevima Vele Luke i Starog Grada. Vremenski korak modela bio je 0,5 s, a cijela simulacija trajala je 12 h što je bilo dovoljno vremena da poremećaj tlaka zraka propagira od talijanske prema hrvatskoj obali, ali ne dovoljno vremena da bi valovi koji se reflektiraju na otvorenoj granici doputovali do zaljeva Vele Luke i Starog Grada i time utjecali na rezultate. Svaka simulacija počinjala je ravnotežnim stanjem nakon čega bi poremećaj tlaka zraka oblika „boxcar" funkcije počeo propagirati od talijanske prema hrvatskoj obali. Parametri za opis poremećaja tlaka ovisili su o slučaju koji se promatrao.

Prilikom profinjenja mreže i testiranja s različitim tipovima poremećaja tlaka zraka, u nekim su se situacijama pojavili problemi numeričke stabilnosti unutar modela. Za rješavanje tog problema potrebno je razmotriti generalizirani oblik valno-kontinuitetne jednadžbe (GWCE) čija se vertikalno integrirana forma rješava da bi se dobila denivelacija. Modeli konačnih elemenata u početku su koristili primitivnu formu jednadžbe kontinuiteta, međutim, lažna su rješenja dovodila do problema sa stabilnosti [53]. Zbog toga je uvedena valno-kontinuitetna jednadžba čijom se uporabom eliminiraju lažna rješenja bez potrebe za numeričkim ili umjetnim prigušivanjem rezultata [54]. GWCE glasi [31]:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2} + \tau_0\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\Bigg\{U\frac{\partial\zeta}{\partial t} - UH\frac{\partial U}{\partial x} - VH\frac{\partial U}{\partial y} + fVH \\
&-H\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p_a}{\rho} + g(\zeta - \alpha\eta)\right] - E_{h2}\frac{\partial^2\zeta}{\partial x\partial t} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - (\tau_* - \tau_0)UH\Bigg\} \\
&+\frac{\partial}{\partial y}\Bigg\{V\frac{\partial\zeta}{\partial t} - UH\frac{\partial V}{\partial x} - VH\frac{\partial V}{\partial y} - fUH - H\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{p_a}{\rho} + g(\zeta - \alpha\eta)\right] \\
&-E_{h2}\frac{\partial^2\zeta}{\partial y\partial t} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - (\tau_* - \tau_0)VH\Bigg\} = 0,
\end{aligned} \tag{4.1}$$

pri čemu je ζ denivelacija, U i V su vertikalno usrednjene komponente horizontalne brzine, H ukupna dubina vode, f Coriolisov parametar, p_a atmosferski tlak, ρ gustoća vode, g ubrzanje sile teže, α efektivni faktor elastičnosti Zemlje, η ravnotežni plimni potencijal, E_{h2} koeficijent disperzije, τ_{sx} i τ_{sy} komponente površinske napetosti, $\tau_* = C_f\frac{\sqrt{U^2+V^2}}{H}$, C_f koeficijent pridnenog trenja, a τ_0 težinski faktor. U slučaju da vrijedi $\tau_0 = 0$, GWCE će biti

valna jednadžba. Za $\tau_0 \gg 1\ \mathrm{s}^{-1}$, GWCE će se približiti primitivnoj jednadžbi kontinuiteta. Da bi model pravilno funkcionirao, potrebno je odabrati pravu vrijednost faktora τ_0 [55]. Sam τ_0 je numerički parametar bez fizikalnog značenja, ali upotreba premale vrijednosti može dovesti do većih grešaka, nestabilnog koda [56] i lošeg prikaza očuvanja mase, dok se za prevelike vrijednosti javljaju lažna rješenja. Optimalni raspon, koji minimizira greške, kreće se od $(\tau_*)_{max}$ do $10(\tau_*)_{max}$ (gdje je $(\tau_*)_{max}$ maksimalna vrijednost τ_* na domeni) i unutar njega bi model trebao davati slična rješenja. Ako se promotri disperzijska relacija (slika 4.1) očito je da prevelike vrijednosti parametra τ_0 (približavanje primitivnoj jednadžbi kontinuiteta koristeći metodu konačnih elemenata) dovode do savinute krivulje disperzije i pojave lažnih rješenja. Premale vrijednosti dovode do disperzijske krivulje koja također odstupa od analitičke. Unutar raspona $(\tau_*)_{max}$–$10(\tau_*)_{max}$ slaganje će biti relativno dobro.



Slika 4.1: Disperzijska relacija za analitičku jednadžbu kontinuiteta te za nekoliko vrijednosti parametra τ_0 (koji je na ovoj slici označen s G, preuzeto iz [57]).

Za model ADCIRC je dana preporučena vrijednost τ_0, dobivena eksperimentalno, i ona iznosi $\tau_0 = (\tau_*)_{max}$ [31]. S obzirom da u slučaju poplavljivanja i osušivanja može doći do pojave jakih strujanja u plitkim dijelovima domene, određivanje faktora τ_0 može biti problematično, ali vrijednosti su uglavnom reda veličine od 10^{-3} do $10^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$. Faktor τ_0 ne mora nužno biti konstantan u prostoru, moguće ga je definirati na svakom pojedinom čvoru mreže zasebno, a što je dubina manja, njegova vrijednost treba biti veća. U svim

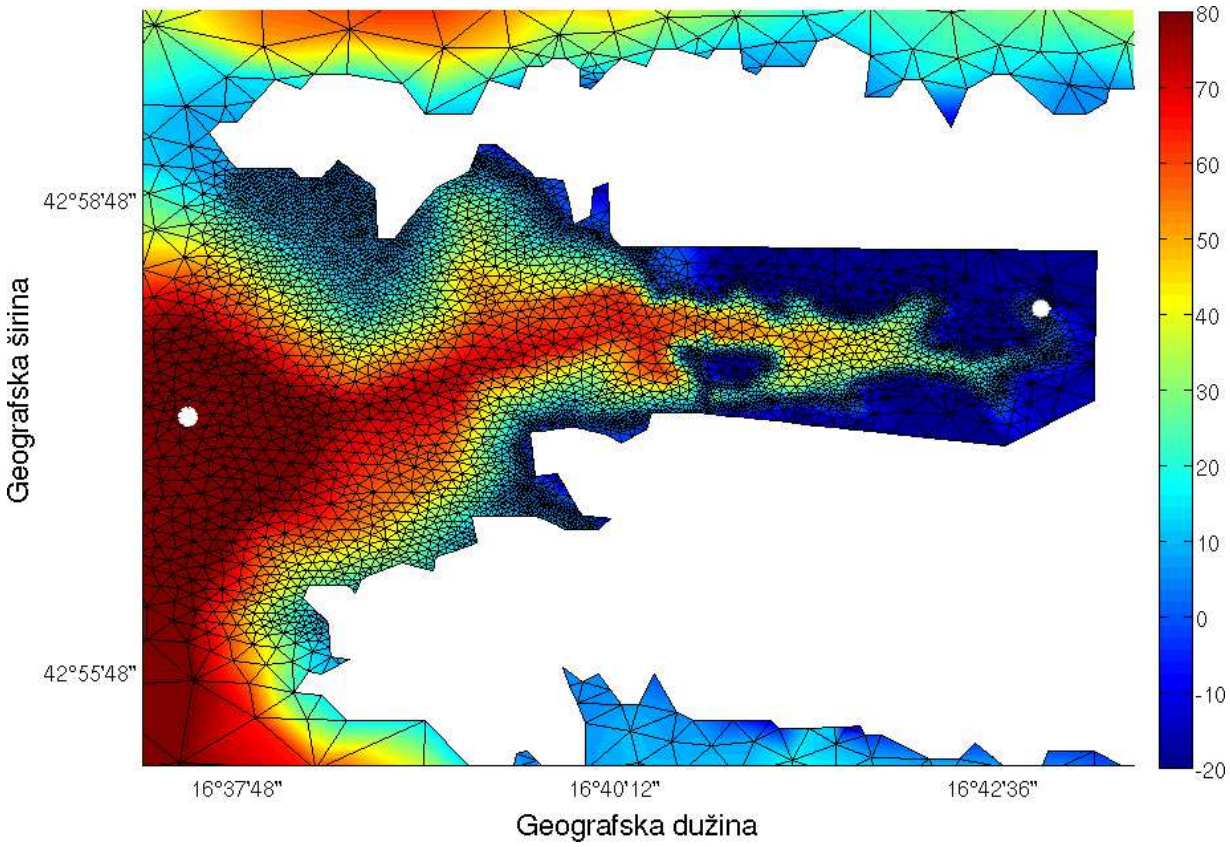
simulacijama korištenim u ovom poglavlju τ_0 je bio 0,05 s^{-1} što je omogućilo stabilnost u cijelom rasponu simulacija, a da pritom njegova vrijednost ostane unutar preporučenog raspona $(\tau_*)_{max}$–$10(\tau_*)_{max}$ za modele konačnih elemenata.

Nakon pravilnog odabira parametra τ_0, u modelu je moguće definirati pridneno trenje na nekoliko načina. U ovim je simulacijama koeficijent pridnenog trenja bio konstantan ($C_f = 0,003$), a jednadžba za pridneno trenje kvadratnog oblika. Moguće je koristiti hibridni nelinearni koeficijent pridnenog trenja pa se trenje u dubokom moru približava vrijednosti kvadratnog zakona pridnenog trenja, a u plitkom moru se povećava kako dubina opada [58]. Još jedna opcija je definirati varijabilne koeficijente hrapavosti površine za svaki čvor mreže pomoću Manningovog n koeficijenta [59] što je osobito korisno ako su poznati tipovi podloga u priobalju – kamenje, pijesak, trava, beton i ostale površine imaju različite Manningove koeficijente koji onda služe za izračun koeficijenta pridnenog trenja u svakoj točki mreže.

4.2 Vela Luka na Korčuli 21. lipnja 1978. godine

Numeričkim modeliranjem poplave na Korčuli 21. lipnja 1978. godine su se, osim Orlića i sur. [12] bavili i Lončar i sur. [60]. Oni su koristili model konačnih elemenata (HD-KV) i model konačnih razlika (HD-KD), ali im je domena bila ograničena samo na Zaljev Vela Luka, a rubni uvjeti nametnuti iz simulacija koje su napravili Orlić i sur. Fokus rada bio je na poremećaju tlaka zraka koji propagira jednom brzinom, ali iz dva različita smjera te su modeli omogućavali poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže. Maksimalna amplituda razine mora iznosila je 3,45 m za model konačnih elemenata i 2,64 m za model konačnih razlika. Te su vrijednosti bliske opaženima iako tako podešen sustav ne omogućuje valovima koji su u zaljevu da utječu na more izvan zaljeva pa se time gubi dio dinamičkih procesa koji se odvijaju na granici zaljev–otvoreno more. U novije vrijeme Denamiel i sur. [61] su također izvodili simulacije na domenama Vele Luke (od kojih je svaka imala malo različitu geomorfologiju) kako bi bolje razumjeli osjetljivost Vele Luke na meteotsunamije u različitim geomorfološkim uvjetima. Njihove simulacije izvodile su se za cijeli Jadran, a zatim su se rezultati razine mora koristili za forsiranje manjih domena Vele Luke. U tom radu nije korišteno poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže.

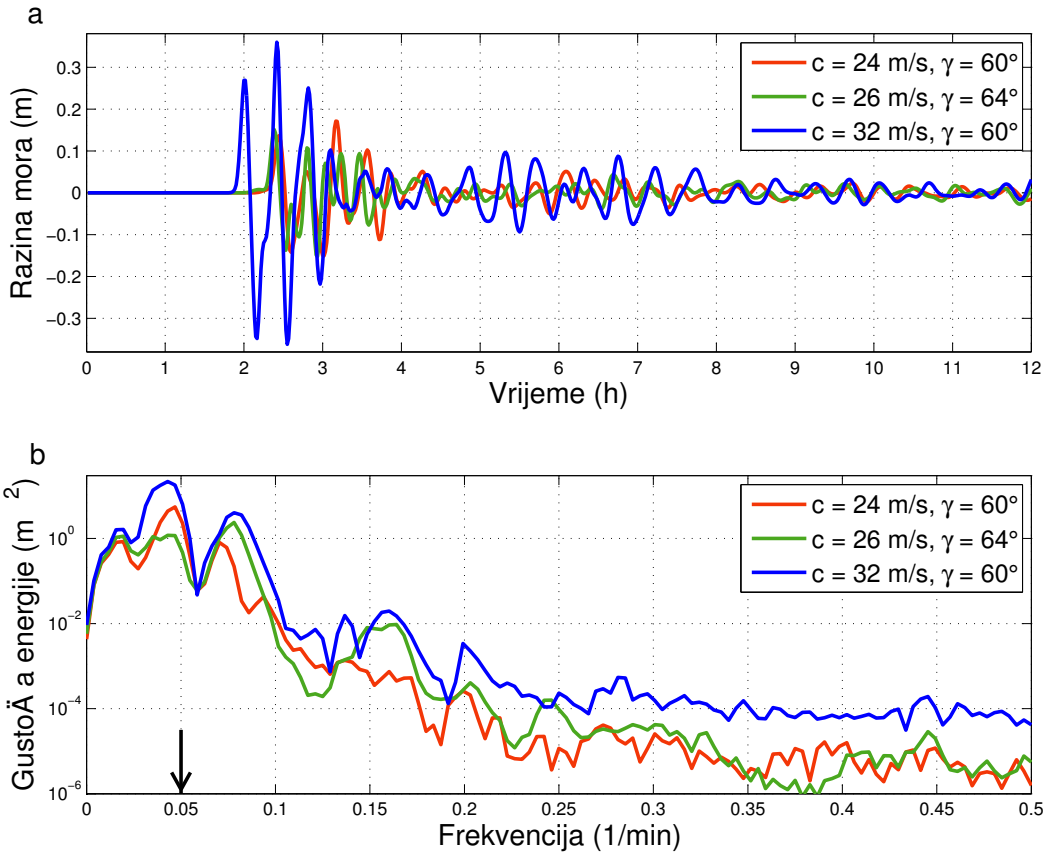
Cilj ovog dijela istraživanja zapravo je bio spojiti dva pristupa. S jedne strane je



Slika 4.2: Isječak iz mreže modela za područje Zaljeva Vela Luka. Osim batimetrije u mrežu je uključena topografija (m). Bijele točke označavaju lokacije čvorova na ulazu i vrhu zaljeva koje su korištene za prikaz vremenskih nizova na slikama 4.3 i 4.4.

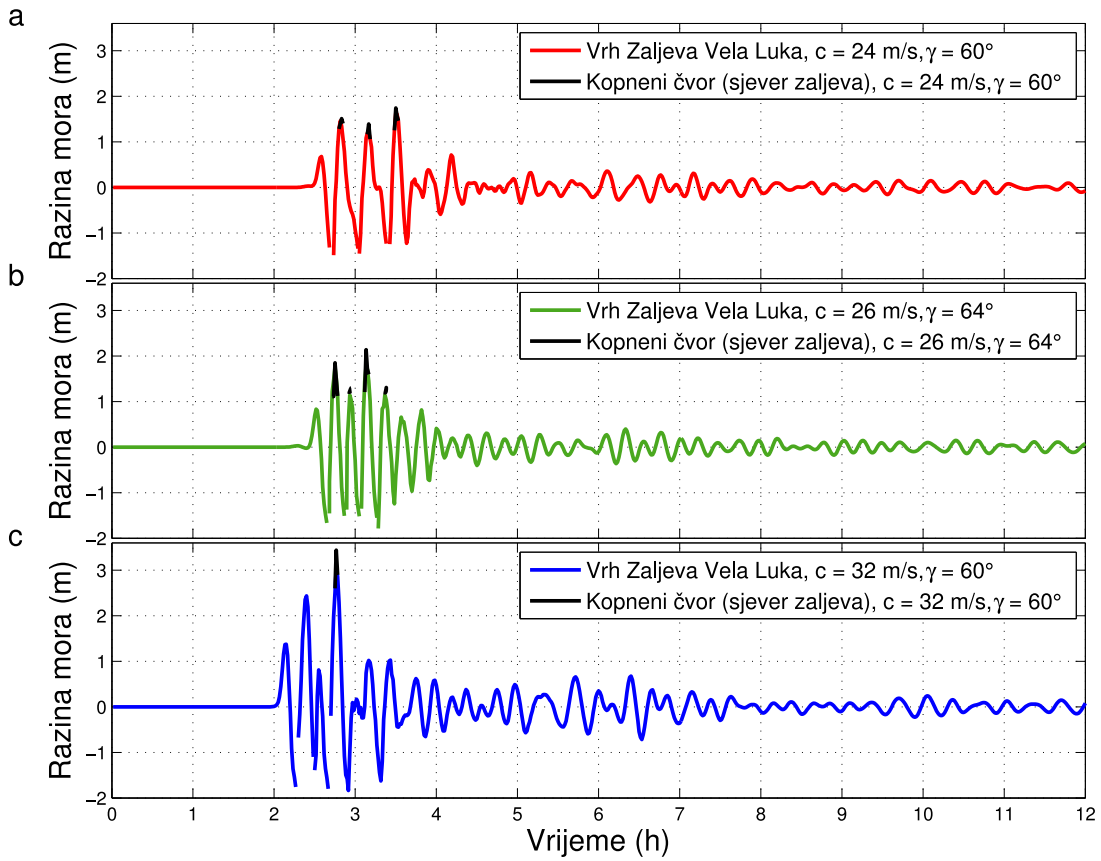
istraživanje Orlića i sur. [12], koji su koristili model konačnih elemenata kojem je domena bila cijeli Jadran, ali s definiranom minimalnom dubinom u modelu. S druge je strane rad Lončara i sur. [60], koji su koristili modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže, ali je domena bila ograničena samo na Zaljev Vela Luka. Kako bi se taj povijesni događaj prikazao što preciznije, ovdje je korišten model konačnih elemenata kojem je domena bila cijeli Jadran, s uključenim modulom za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže (slika 4.2). S obzirom da je ova povijesna poplava dobar primjer kako velike valne visine mogu utjecati na naselja, rezultati dobiveni ovakvim pristupom mogli bi pokazati je li za slučaj ekstremnih oscilacija potrebno uzeti u obzir poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže kako bi se valne visine mogle preciznije predvidjeti. Slične studije rađene su za tsunamije i olujne uspore (npr. [62,63]) ali tek rijetko za meteotsunamije (npr. [64], istraživanje koje je posvećeno utjecaju promjene karakterističnih parametara poremećaja tlaka zraka i nagiba dna na Proudmanovu rezonanciju i „wave runup" - dodatnu visinu koju val postiže prilikom dolaska na obalu, a prije nego mu se energija disipira zbog trenja i sile teže).

Poremećaj tlaka zraka u ovome je slučaju imao amplitudu od 3 hPa, širinu 200 km i centar poremećaja uvijek je prelazio preko Vele Luke. Duljina poremećaja ovisila je o njegovoj brzini – trajanje je uvijek bilo 10 min što je procijenjeno na temelju postojećih mjerenja [12]. Brzina i smjer propagacije poremećaja tlaka zraka bili su u rasponu 15–40 m/s (s korakom od 1 m/s) i 10° do 80° (s korakom od 5°, osim za brzine 18–28 m/s i kutove 50°–65°gdje je korak bio 1°). Razina mora i tlak zraka u modelu su se spremali svakih 10 min na cijeloj mreži, a u odabranim točkama svake minute.



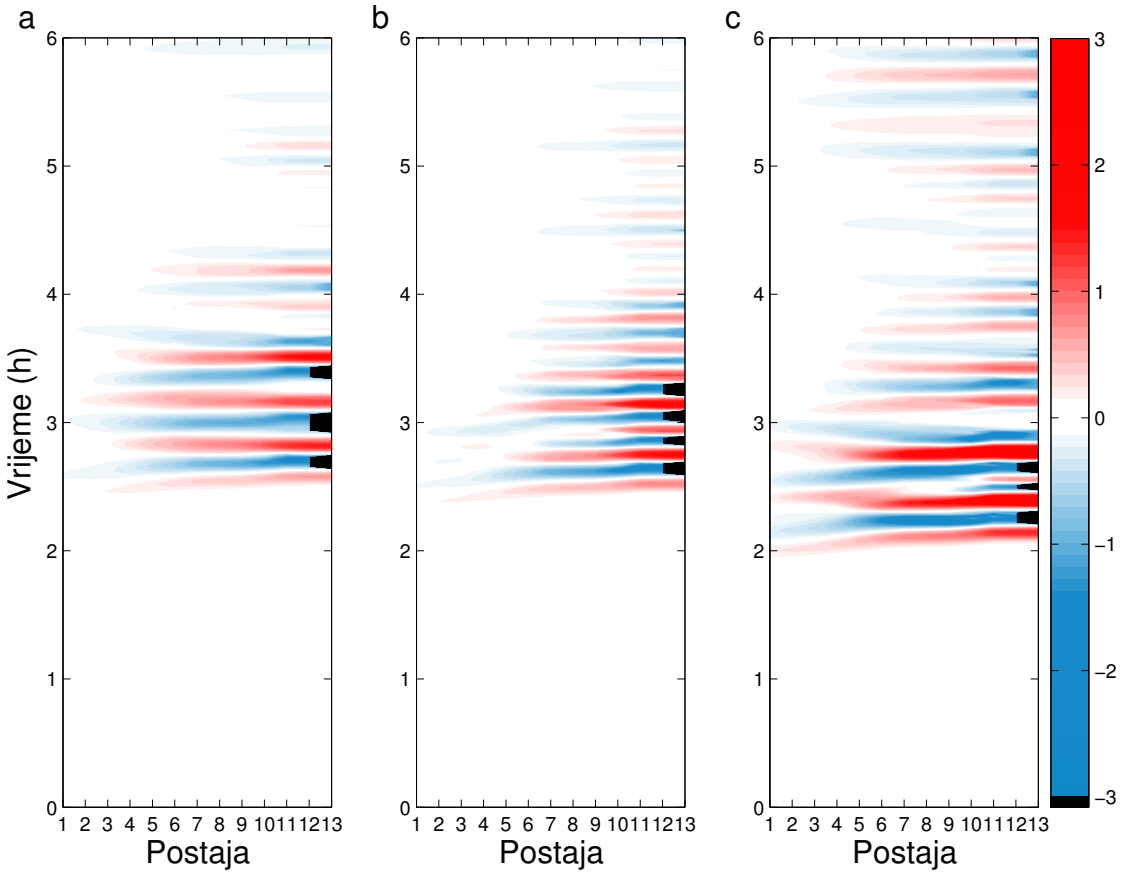
Slika 4.3: (a) Vremenski niz visine razine mora i (b) spektar gustoće energije na ulazu u Zaljev Vela Luka za tri različite brzine i smjera propagacije poremećaja tlaka zraka. Crna strelica označava frekvenciju osnovnog moda zaljeva (20,0 min).

Prelaskom poremećaja tlaka zraka preko Jadrana na otvorenom se moru formira valni paket koji putuje do ulaza u zaljev. Razina mora na ulazu u zaljev ovisit će o brzini i smjeru propagacije poremećaja zbog različite batimetrije na različitim putanjama do zaljeva. Iz seta svih simulacija odabrane su one koje su imale maksimalnu visinu razine mora na ulazu u zaljev i to za: manji bijeli pravokutnik sa slike 3.2 (maksimalna visina postignuta je za



Slika 4.4: Vremenski niz visine razine mora na vrhu Zaljeva Vela Luka za tri različite brzine i smjera propagacije poremećaja tlaka zraka.

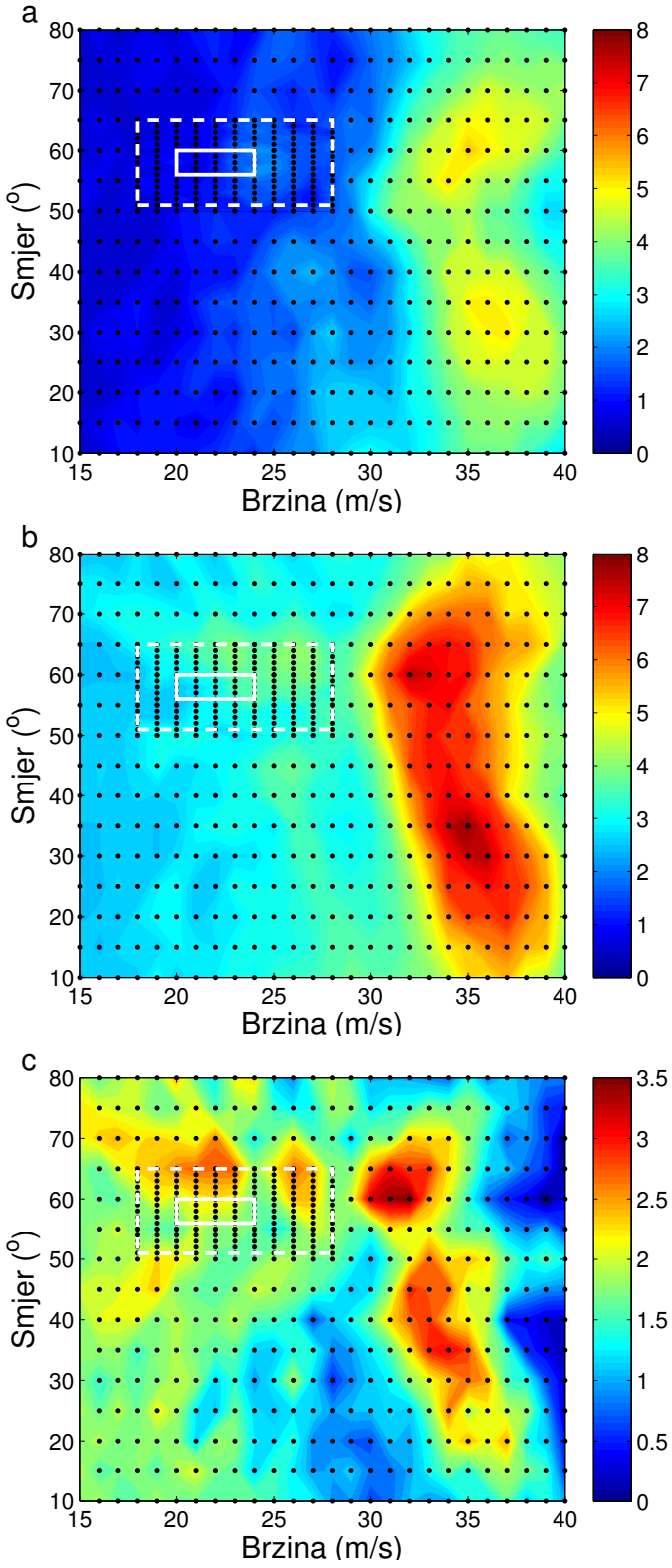
poremećaj koji je putovao brzinom 24 m/s pod kutom od 60°), veći bijeli pravokutnik sa slike 3.2 (maksimalna visina postignuta je za poremećaj koji je putovao brzinom 26 m/s pod kutom od 64°) te za područje brzina većih od 30 m/s i kutova iznad 45° odnosno gornjeg maksimuma sa slike 3.2 (npr. [61]). Vremenski nizovi visine razine mora prikazani su na slici 4.3a. Iako se maksimum ne postiže uvijek za prvi val koji stiže do zaljeva, već je razina prvog vala za red veličine veća od one koja se očekuje u skladu s efektom inverznog barometra, što implicira pojavu Proudmanove rezonancije na otvorenom moru. Amplifikacija je najveća za najveću brzinu, što je u skladu s očekivanjima zbog brzine slobodnih valova na prilazu Veloj Luci (slika 3.6). Spektar gustoće energije tih valnih paketa pokazuje, očekivano, da veće oscilacije morske razine sadrže više energije i da je maksimum gustoće energije postignut za istu kombinaciju brzine i smjera kao i maksimum



Slika 4.5: Hovmoellerov dijagram visine razine mora (m) za Zaljev Vela Luka i poremećaj tlaka zraka koji je propagirao (a) brzinom od 24 m/s i kutom 60°, (b) brzinom od 26 m/s i kutom 64° i (c) brzinom od 32 m/s i kutom 60°. Postaja 1 nalazi se na ulazu u zaljev, postaja 13 na vrhu, a ostale su postaje raspoređene između njih. Prikazano je prvih šest sati simulacije. Crna područja prikazuju isušivanje čvora na vrhu zaljeva.

visine razine mora (slika 4.3b). Također je vidljivo da su frekvencije maksimuma bliske frekvenciji osnovnog moda Zaljeva Vela Luka – izraženo u minutama, maksimumi su na 21,3 min (crvena linija) i 23,3 min (zelena i plava linija, iako zelena ima jači maksimum na 12,8 min) u usporedbi s periodom zaljeva od 20,0 min [65]. Vidljivo je i odstupanje gustoće energije među raznim simulacijama za više frekvencije koje je vjerojatno posljedica različite formacije valnih paketa u moru za različite kombinacije brzina i smjerova propagacije poremećaja, a zbog raspršenja valova. Energija u tom dijelu spektra ipak je nekoliko redova veličine manja od glavnog maksimuma pa je nebitna za ono što se događa u zaljevu.

Nakon ulaska valova u zaljev dolazi do daljnje amplifikacije koja je najizraženija na vrhu zaljeva (slika 4.4). Za sve je vremenske nizove visine razine mora vidljivo da na vrhu (u najplićem dijelu) zaljeva povremeno dolazi do osušivanja i ponovnog poplavljivanja čvora



Slika 4.6: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Vela Luka u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka: (a) za simulacije uz definiranje minimalne dubine u modelu, (b) za simulacije uz poplavljivanje i osušivanje te (c) razlika ta dva slučaja. Skala na slici c razlikuje se od skale na slikama a i b. Bijeli pravokutnici označavaju raspone brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 21. lipnja 1978. godine - punom linijom označen je raspon određen u Orlićevom radu iz 1980. [24], a crtkanom linijom raspon dobiven u radu Orlića i sur. iz 2010. [12] u kojem se pretpostavilo da je vremenska greška barografskih zapisa bila ±10 min. Crne točke označavaju simulacije.

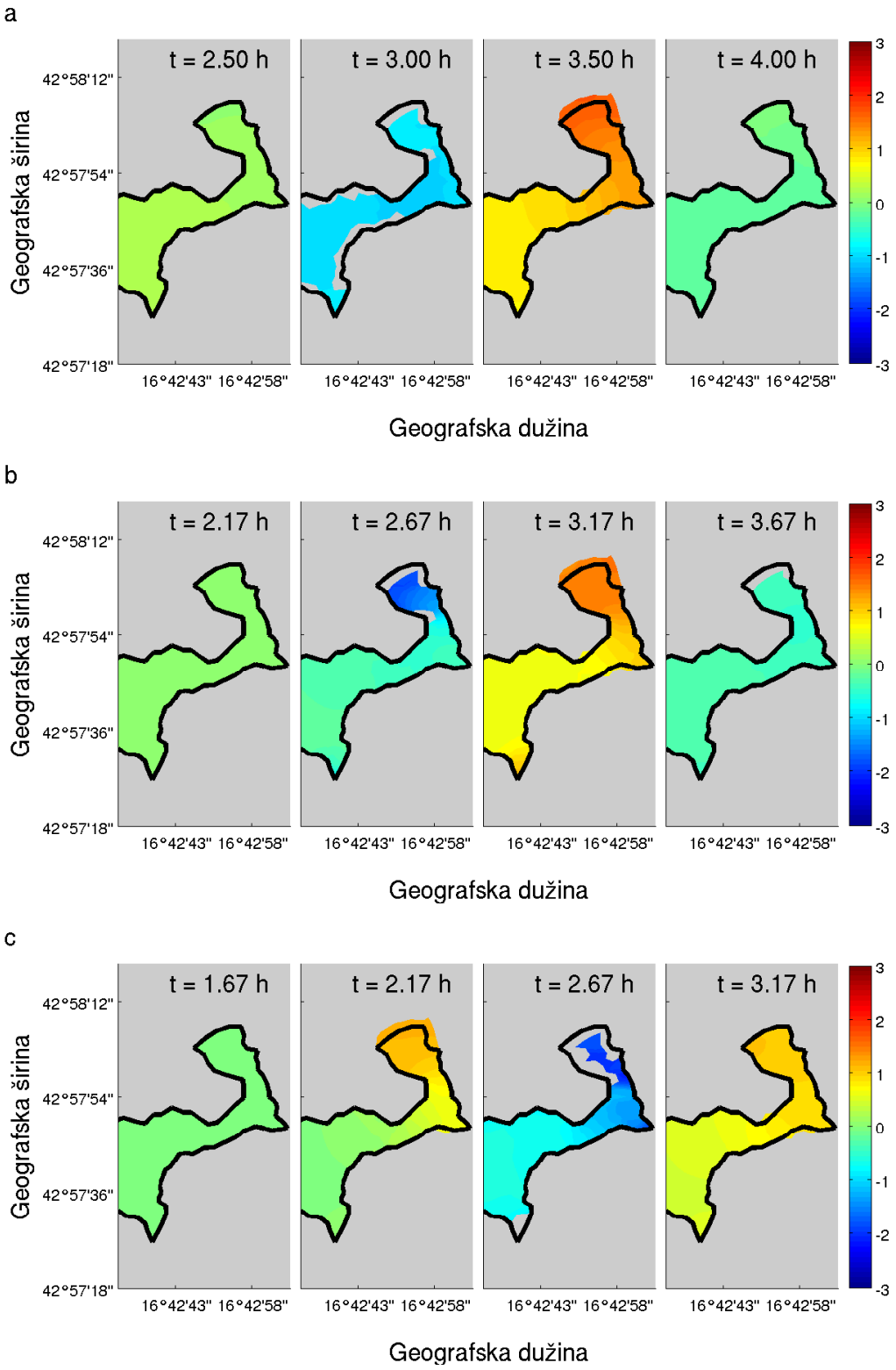
mreže. Kopneni čvor na kojem je zabilježena maksimalna visina razine mora u simulaciji (crna linija, različit čvor za različite simulacije) je suh tijekom većeg dijela simulacije, ali se poplavi za vrijeme najintenzivnije oscilacije.

Na slici 4.5 vidljiva je razdioba visine morske razine duž zaljeva u vremenu, za iste kombinacije brzina i smjerova propagacije poremećaja kao na prethodnim slikama. Na ulazu u zaljev amplitude su male (10–35 cm) što je doduše do jedan red veličine veće od inverznog barometarskog efekta koji je u ovom slučaju 3 cm. Kako valovi putuju duž zaljeva visine se amplificiraju i maksimum se postiže na vrhu zaljeva. Najveći val uzrokuje poplavljivanje okolnog kopna, kao i osušivanje u luci. Visine razine mora za šire područje srednjeg Jadrana prilikom prelaska poremećaja prikazane su na slikama B.1–B.3.

Ako se usporedi maksimalna valna visina na vrhu zaljeva u ovisnosti o brzini i smjeru propagacije atmosferskog poremećaja za simulacije koje su koristile definiranu minimalnu dubinu u modelu (slika 4.6a) i simulacije koje uključuju modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže (slika 4.6b) vidljiva je značajna razlika u rezultatima (slika 4.6c). Profinjenje mreže i uključivanje topografije, što je omogućilo poplavljivanje kopnenih čvorova i osušivanje najplićeg dijela zaljeva (slika 4.7), povećalo je modelirane maksimalne valne visine u skoro cijelom području, a ponegdje su one i udvostručene.

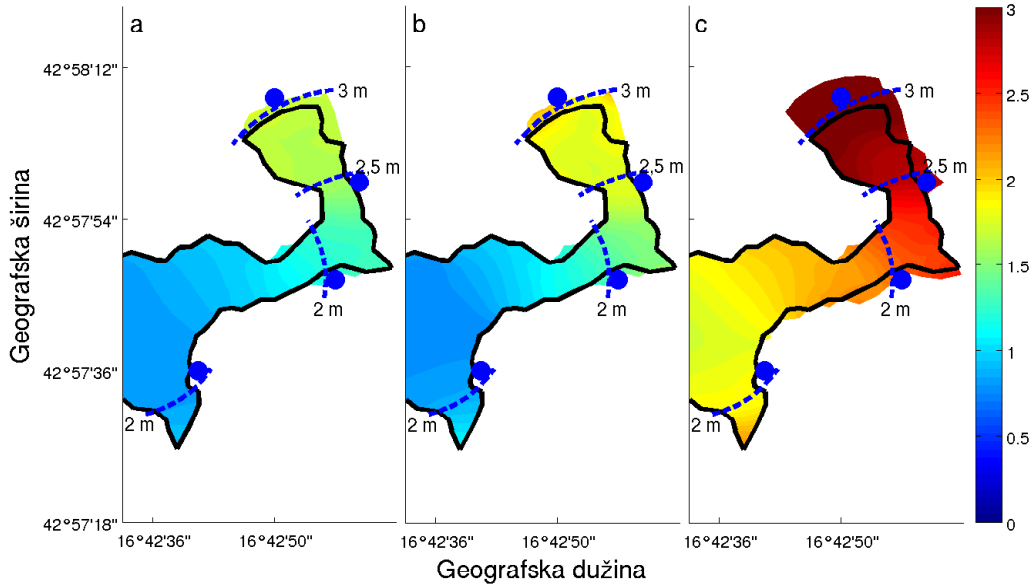
Najviše razine mora na mreži tijekom simulacija zabilježene su na kopnenim čvorovima koji su bili mokri samo u kratkom periodu kad su najveći valovi došli do vrha zaljeva. Za simulaciju s 24 m/s i 60° nadmorska visina tog čvora iznosila je 1 m, a visina razine mora u odnosu na srednju bila je 1,7 m. Najdublji isušeni čvor bio je dubok 2 m pa je maksimalna valna visina iznosila 3,7 m. Za simulaciju s 26 m/s i 64° nadmorska visina kopnenog čvora je također iznosila 1 m, dok je visina razine mora na njemu u odnosu na srednju bila 2,1 m. Najdublji isušeni čvor i ovdje je imao dubinu 2 m te je maksimalna valna visina iznosila 4,1 m. Simulacija s 32 m/s i 60° zabilježila je visinu razine mora od 3,4 m, na čvoru nadmorske visine 3 m, dok je najniža zabilježena razina bila -4,1 m što ukupno daje maksimalnu valnu visinu od 7,5 m. S obzirom da je opažena valna visina bila oko 6 m, ovi rezultati predstavljaju poboljšanje u odnosu na prijašnje.

Događaj u Veloj Luci bio je fotografiran i sniman, a na zgradama se nalaze vodeni biljezi pomoću kojih su određene maksimalne visine razine mora na različitim dijelovima zaljeva (skicirao M. Orlić 20. lipnja 1980.). Usporedba tih visina s maksimalnim visinama morske razine u simulacijama (slika 4.8) pokazuje da su simulacije dale pravilnu razdiobu visina



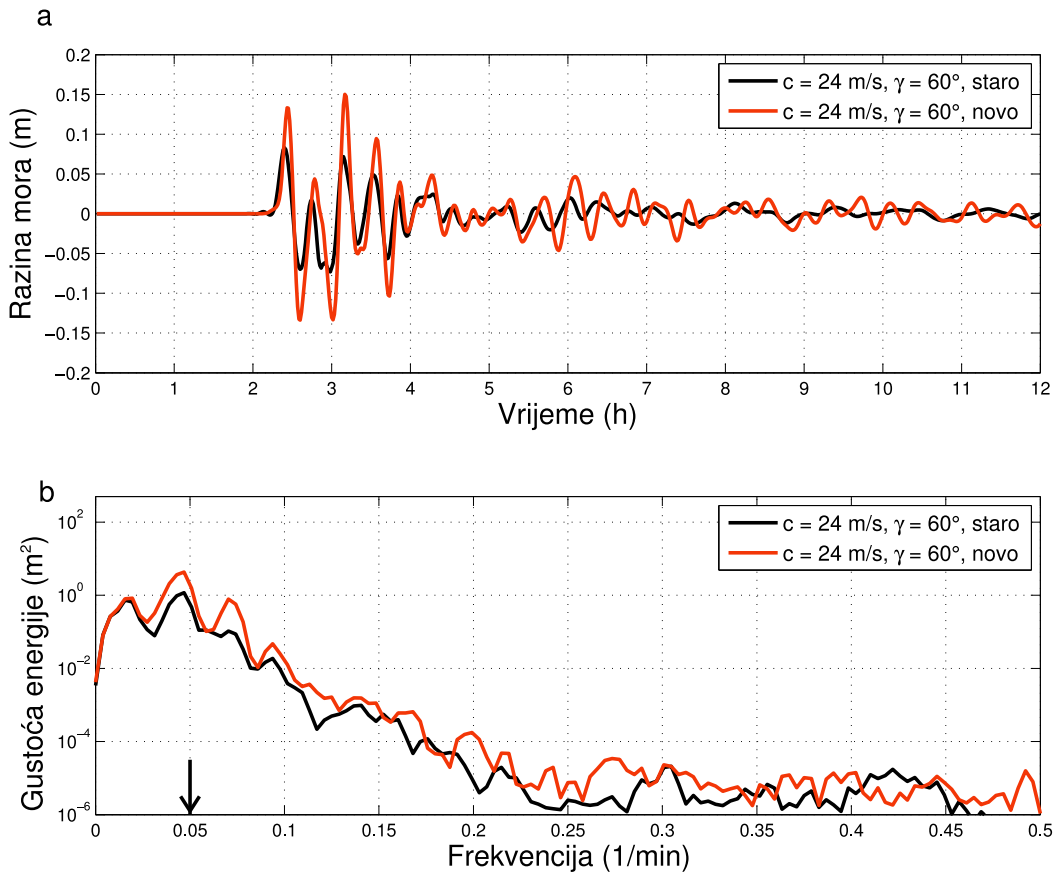
Slika 4.7: Visina razine mora (m) u Zaljevu Vela Luka za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira (a) brzinom od 24 m/s i kutom 60°, (b) brzinom od 26 m/s i kutom 64° i (c) brzinom od 32 m/s i kutom 60°. Crna linija označava obalu, a siva boja suhe dijelove domene.

duž zaljeva, iako vrijednosti ne odgovaraju sasvim opaženima. Moguć uzrok toj razlici je činjenica da batimetrija i topografija u mreži nisu dovoljno profinjene i da zbog toga efekti poplavljivanja kopna i osušivanja luke nisu dovoljno dobro prikazani. Daljnje profinjenje mreže nije realistična opcija jer bi bilo potrebno imati profinjenija mjerenja batimetrije. S druge strane, bolji prikaz poremećaja tlaka zraka bi također mogao poboljšati rezultate, ali nažalost podaci koji postoje to ne mogu omogućiti.



Slika 4.8: Maksimalna visina razine mora (m) za svaki čvor mreže u Zaljevu Vela Luka, za poremećaj tlaka zraka koji propagira (a) brzinom od 24 m/s i kutom 60°, (b) brzinom od 26 m/s i kutom 64° i (c) brzinom od 32 m/s i kutom 60°. Crna linija označava obalu, plave točke su lokacije vodenih biljega na zgradama, a isprekidane plave linije označavaju opažene maksimalne visine morske razine (skicirao M. Orlić 20. lipnja 1980.).

Usporedbom s rezultatima iz prošlog poglavlja jasno je da je visina razine mora unutar zaljeva značajno veća, međutim, rezolucija je bila poboljšana na cijeloj mreži, a ne samo u zaljevu. Razina mora za nove simulacije je na ulazu u zaljev malo viša nego razina mora u starim simulacijama, dok je energija višestruko veća, osobito oko perioda osnovnog moda zaljeva (slika 4.9). Taj rezultat implicira da je finija mreža na otvorenom moru omogućila bolji prikaz poremećaja tlaka zraka na mreži modela što je dovelo do većih amplituda na ulazu na zaljev. Nova, profinjenija mreža realističnije prikazuje neravnu batimetriju te je na njoj teže postići rezonanciju, ali uz trajanje poremećaja od 10 minuta i brzinu od 24 m/s poremećaj je dugačak 14,4 km. Na grubljoj mreži na otvorenom moru to će često zahvatiti samo jednu do dvije točke mreže dok će ih na finijoj mreži biti više i



Slika 4.9: Vremenski niz visine razine mora (a) i spektar gustoće energije (b) na ulazu u Zaljev Vela Luka za stare i nove simulacije. Crna strelica označava frekvenciju osnovnog moda zaljeva (20,0 min).

poremećaj će biti bolje prikazan. Valni paket u staroj simulaciji na ulazu u zaljev ima manje energije (s maksimumom na istoj frekvenciji kao u novoj simulaciji), a gruba mreža unutar zaljeva i definirana minimalna dubina nisu omogućile pravilnu simulaciju daljnjih rezonantnih efekata bitnih za pojavu meteotsunamija; oni su uspješnije reproducirani u novim simulacijama. Oko prvog maksimuma, koji ima značajno duži period (cca 1 h), energija je podjednaka u obje simulacije, a najznačajnija razlika javlja se za period blizak periodu osnovnog moda zaljeva. Može se zaključiti da poboljšano simuliranje uvjeta unutar zaljeva značajno utječe na energiju na ulazu u zaljev.

Uzimajući u obzir ove rezultate, zanimljivo je diskutirati je li pristup koji su slijedili Lončar i sur. [60] bolji odabir nego modeliranje cijelog Jadrana. Integriranje simulacija na grubljoj mreži da bi se dobili rubni uvjeti koji se koriste na manjoj domeni s finijom rezolucijom u svakom će slučaju skratiti vrijeme računanja. U njihovom je radu model konačnih elemenata precijenio amplitudu za otprilike pola metra, međutim, model konač-

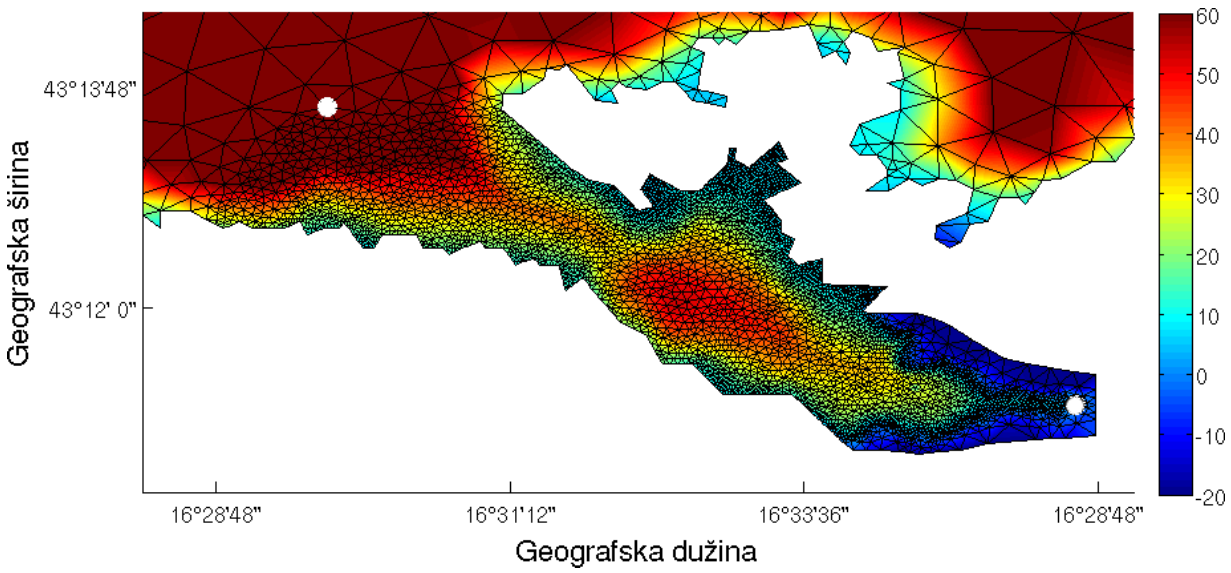
nih razlika podcijenio ju je za 36 cm. U takvom sustavu rubni uvjet je fiksan, odnosno manja domena nema nikakav povratni efekt na valni paket koji dolazi s otvorenog mora (dakle ono što se događa u zaljevu ne prenosi se van zaljeva). To bi također moglo igrati važnu ulogu jer se tim pristupom ne uzima u obzir sva dinamika koja na kraju utječe i na valne visine na vrhu zaljeva. S obzirom na malen broj provedenih simulacija u njihovom istraživanju, nije moguće odrediti koji je uzrok precjenjivanja i podcjenjivanja te je teško odlučiti je li takav pristup prihvatljiv.

Glavni aspekt ovih simulacija je uključivanje poplavljivanja i osušivanja čvorova mreže uz dodatno profinjenje rezolucije numeričke mreže i njeno proširenje preko kopnenog područja. Kad val nalik tsunamiju dođe u područje plićeg mora on se neće nužno lomiti [66]. Zbog očuvanja energije (ili čak i ako se energija djelomično reflektira), brzina i valna duljina vala će se smanjiti, a valna visina povećati [67]. „Runup" na kopnu je veći od amplitude vala prije nego je došao do obale i to je jedna od najvećih opasnosti povezanih s takvim valovima [68]. Stoga je bitno uključiti poplavljivanje kopnenih čvorova unutar zaljeva (i, analogno, bitno je uključiti osušivanje morskih čvorova kad se val povlači) kako bi se moglo procijeniti koji dijelovi obale će biti poplavljeni i koliko visoko će se razina mora podići.

4.3 Stari Grad na Hvaru 19. veljače 2010. godine

Set simulacija za Zaljev Stari Grad koji uključuje modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže (slika 4.10) napravljen je za atmosferske poremećaje koji su imali amplitudu od 2,5 hPa, trajali pola sata te putovali brzinom između 18 i 28 m/s (s korakom od 1 m/s) pod kutom od 28°–42° (s korakom od 1°).

Na ulazu u zaljev amplitude razine mora razlikuju se ovisno o brzini i smjeru propagacije poremećaja (slika 4.11a). Vidljivo je višestruko povećanje u odnosu na amplitudu koju bi proizveo efekt inverznog barometra (u ovom slučaju 2,5 cm). Najveće vrijednosti dobivene su za simulaciju u kojoj je brzina poremećaja iznosila 25 m/s, a smjer bio 35°. Taj valni paket u sebi nosi i najviše energije (slika 4.11b) iako su razlike za različite brzine i smjerove veoma male. Spektar gustoće energije pokazuje četiri izrazita maksimuma (85,3–128,0 min, 21,3 min, 11.6 min i 8,26 min). Mjerenja ukazuju na postojanje tri izražena maksimuma u zaljevu, ali na periodima 25,7 min, 10,2 min i 8,6 min [65]. Vidljivo je i da



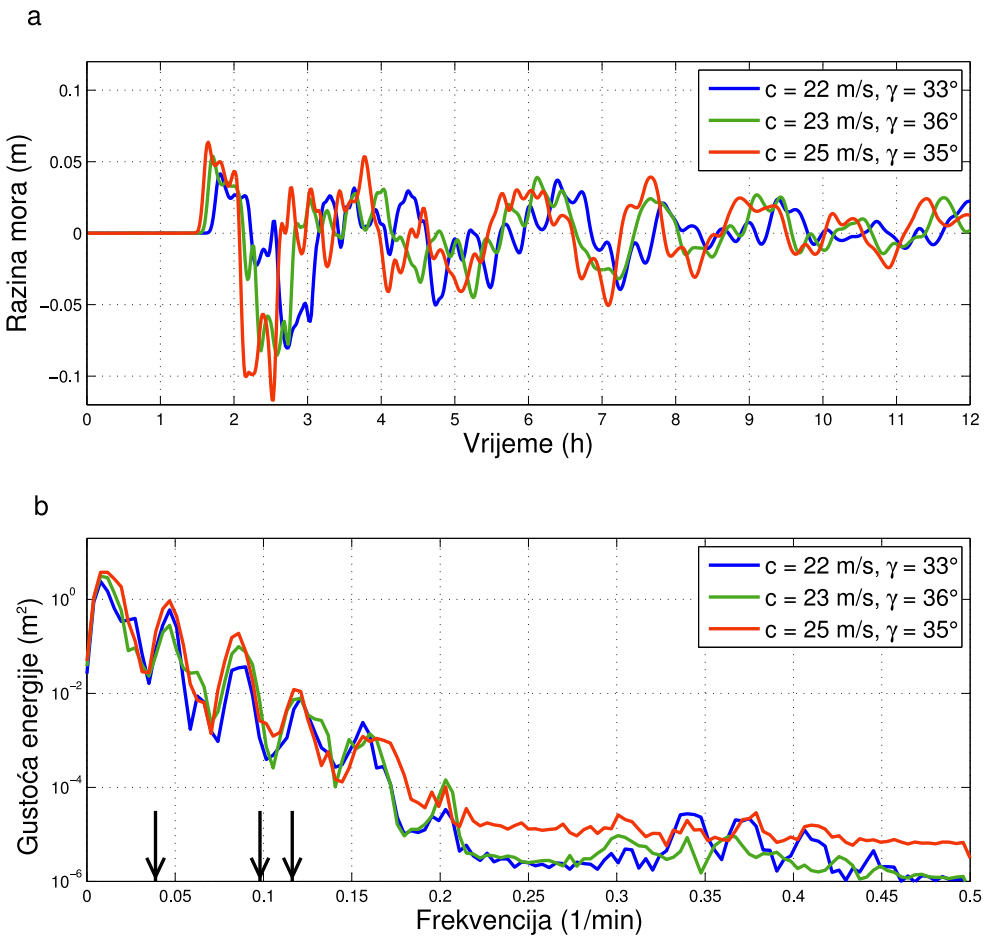
Slika 4.10: Isječak iz mreže modela za područje Zaljeva Stari Grad. Osim batimetrije u mrežu je uključena topografija (m). Bijele točke označavaju lokacije čvorova na ulazu i vrhu zaljeva koje su korištene za prikaz vremenskih nizova na slikama 4.11 i 4.12.

periodi zaljeva zapravo upadaju u minimume između prvog i drugog te trećeg i četvrtog maksimuma valnog paketa što može dodatno pojasniti izostanak jake amplifikacije unutar zaljeva – lučka rezonancija nastaje kao rezultat poklapanja perioda dolaznog valnog paketa s vlastitim periodom zaljeva i ako do toga ne dođe, povećanje visine razine mora neće biti maksimalno.

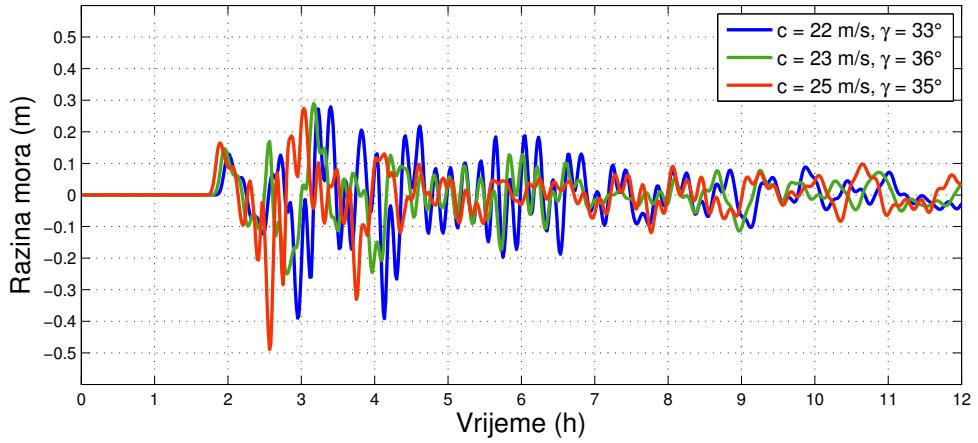
Prolaskom valova kroz zaljev dolazi do daljnje amplifikacije – na vrhu zaljeva amplitude i valne visine višestruko su veće od onih na ulazu u zaljev (slika 4.12). Unatoč tome, oscilacije nisu dovoljno velike da bi došlo do poplavljivanja ili osušivanja čvorova mreže.

Na slici 4.13 prikazane su maksimalne valne visine zabilježene na vrhu zaljeva za cijeli raspon brzina i smjerova. Maksimum u pretpostavljenom rasponu brzina i kutova se postiže za brzinu 25 m/s i kut 35° i iznosi 76 cm što je samo po sebi nedovoljno za izazivanje poplave u Starom Gradu. Visine razine mora za tu kombinaciju brzine i smjera te nekoliko vremenskih koraka prikazane su na slici B.4. Također je vidljivo da za veće brzine modelirana maksimalna valna visina raste, tj. raspon brzina u koji upada ovaj događaj nije jako pogodan za razvoj meteotsunamija.

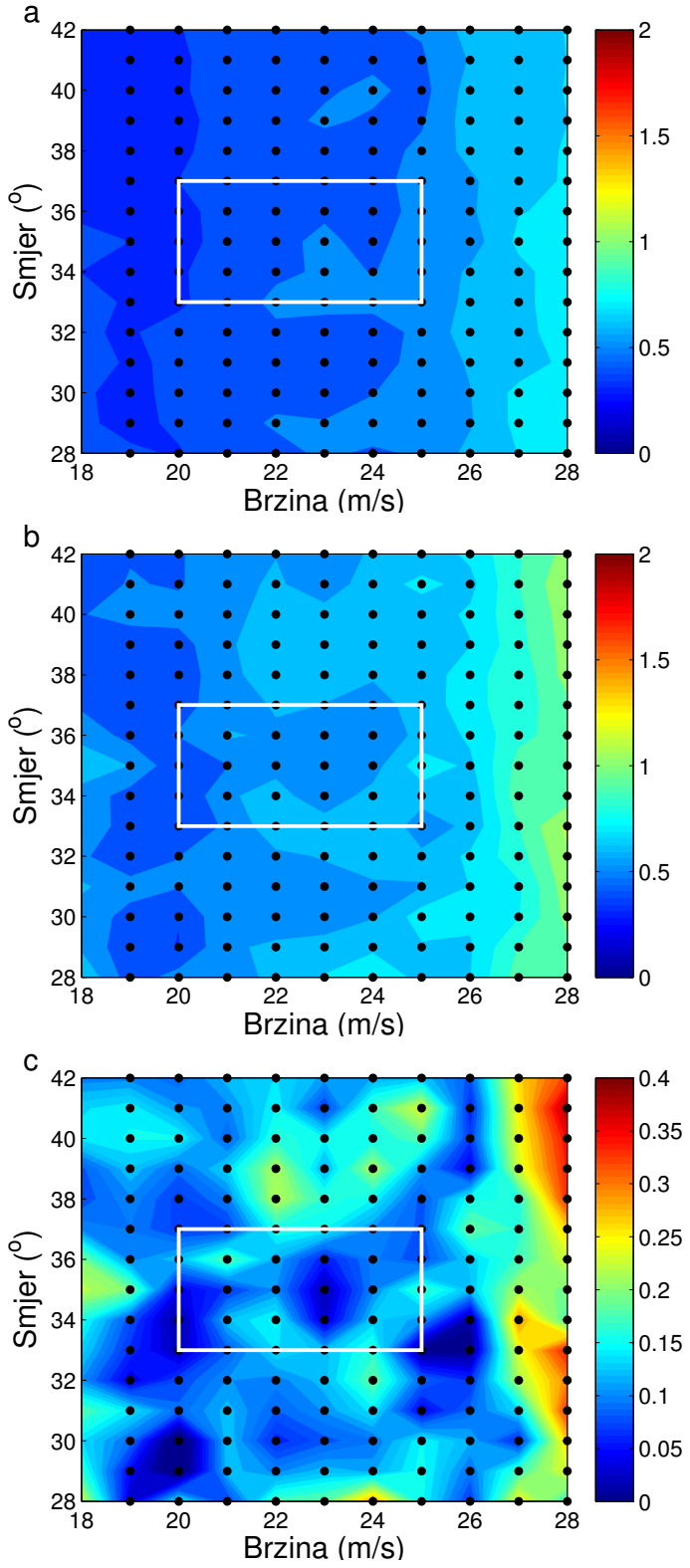
Simulacije koje uključuju poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže (slika 4.13b) u ovom su slučaju također povećale iznose valnih visina u odnosu na vrijednosti dobivene korištenjem definirane minimalne dubine u modelu (slika 4.13a) – usporedba rezultata pokazuje



Slika 4.11: (a) Vremenski niz visine razine mora i (b) spektar gustoće energije na ulazu u Zaljev Stari Grad za tri različite brzine i smjera propagacije poremećaja tlaka zraka. Crne strelice označavaju vlastite frekvencije zaljeva (25,7 min, 10,2 min i 8,6 min).



Slika 4.12: Vremenski niz visine razine mora na vrhu Zaljeva Stari Grad za tri različite brzine i smjera propagacije poremećaja tlaka zraka.



Slika 4.13: Maksimalna valna visina (m) na vrhu Zaljeva Stari Grad u ovisnosti o brzini (x os) i smjeru (y os) propagacije poremećaja tlaka zraka: (a) za simulacije uz definiranje minimalne dubine u modelu, (b) za simulacije uz poplavljivanje i osušivanje te (c) razlika ta dva slučaja. Skala na slici c razlikuje se od skale na slikama a i b. Bijeli pravokutnik označava raspon brzina i smjerova koji odgovaraju poremećaju zabilježenom 19. veljače 2010. godine. Crne točke označavaju simulacije.

povećanje od oko 30% (slika 4.13c). Unatoč tom poboljšanju, modelirana vrijednost je otprilike upola manja od one opažene. Taj je dan u Starom Gradu vladala dosta specifična situacija, odnosno razina mora bila je značajno povišena u odnosu na srednju razinu zbog olujnog uspora koji je zahvatio zaljev [29]. S obzirom da se u ovim simulacijama za vanjsko forsiranje koristio samo putujući poremećaj tlaka zraka, nije bilo ni očekivano da će se u potpunosti moći reproducirati taj događaj, a ovakav rezultat potvrđuje da je poplavljivanju pridonio i olujni uspor.

5. ZAKLJUČAK

Meteotsunamiji predstavljaju oscilacije morske razine s periodima od nekoliko minuta do nekoliko desetaka minuta i uglavnom ih uzrokuju putujući poremećaji tlaka zraka. Te su oscilacije lokalnog karaktera, a u ekstremnim slučajevima mogu dosegnuti valne visine koje ugrožavaju infrastrukturu, plovila pa čak i ljudske živote. Ovo se istraživanje bavilo numeričkim modeliranjem tih pojava u Jadranskom moru.

Da bi modeliranje bilo uspješno, bilo je potrebno odabrati numerički model koji može adekvatno reproducirati procese koji se odvijaju tijekom razvoja meteotsunamija. Prvi od tih procesa je nastanak Proudmanove rezonancije na otvorenom moru. Testiranje reprodukcije Proudmanove rezonancije provedeno je na idealiziranom pravokutnom bazenu uniformne dubine iznad kojeg je nametnut putujući poremećaj tlaka zraka oblika sinusa ili „boxcar" funkcije. Testiranje je napravljeno pomoću tri numerička modela – dva modela konačnih elemenata, ADCIRC i SCHISM, te jednog modela konačnih razlika, ROMS. Rezultati su promatrani preko dva parametra, valne visine i energije.

Pokazalo se da putujući sinusni poremećaji valne duljine višestruko veće od dimenzija bazena uzrokuju pojavu Chrystalove rezonancije – odnosno, u bazenu se razvijaju seši. Modelirani periodi seša na lijevom i desnom kraju bazena dosta su bliski periodu vlastitih oscilacija, osobito kad se promatraju vrijednosti izračunate iz valnih visina. Izračun pomoću energija precjenjuje periode za sva tri modela. U centralnom dijelu bazena gdje se očekuje dominacija drugog moda vrijednosti perioda su precijenjene, neovisno o modelu i parametru pomoću kojeg se period računa. Ta je razlika objašnjena razmatranjem analitičkog rješenja za denivelaciju, koje se dobije rješavanjem 1D sustava jednadžbi za bazen forsiran putujućim sinusnim poremećajem tlaka zraka. Sinus valne duljine manje od bazena uzrokuje pojavu Proudmanove rezonancije. Iako sva tri modela daju rezonanciju na brzini bliskoj brzini slobodnih valova, niti jedan rezultat ne odgovara točno analitičkom rješenju. Kad je valna duljina bliska dimenzijama bazena ili malo veća, u bazenu nije moguće jasno razaznati niti jednu rezonanciju već dolazi do promjene režima iz jedne u drugu. Set simulacija ponovljen je za sinuse iste valne duljine, ali dvostrukog trajanja. U tim je rezultatima vidljivo da se u bazen prenosi više energije, periodi seša su bliži teorijskima i vrijednosti su generalno ujednačenije nego kod jednostrukog sinusa, za sva tri modela,

ali se Chrystalova rezonancija javlja ranije, odnosno na manjim valnim duljinama. Iako oba seta simulacija daju slične rezultate, dvostruki sinusni poremećaj daje izraženiji prijelaz iz jednog u drugi tip rezonancije i bolje prikazuje Chrystalovu rezonanciju, dok je za jednostruki sinusni poremećaj Proudmanova rezonancija bolje definirana. Napravljen je i osvrt na analitičko rješenje putujućeg sinusa koji se ponavlja u beskonačnost. U takvom se slučaju, ovisno o brzini poremećaja i relativnoj dimenziji poremećaja i bazena, u bazenu može javiti Chrystalova rezonancija, ili obje rezonancije istovremeno.

Poremećaji tlaka zraka oblika „boxcar" funkcije u bazenu uvijek izazivaju pojavu Proudmanove rezonancije, ali tri modela ne pokazuju rezonanciju pri istoj brzini. Najtočnije rezultate daje ROMS koji u svakoj simulaciji rezonanciju reproducira pri brzini najbližoj brzini slobodnih valova. ADCIRC i SCHISM malo podcjenjuju tu vrijednost, osobito ako se usporede rezultati dobiveni preko maksimuma energija. Na temelju ovih rezultata odabran je model konačnih elemenata, ADCIRC, kako bi se postigla što finija rezolucija u zaljevima od interesa. Iako su ADCIRC i SCHISM dali slične rezultate, korištenje modela SCHISM nešto je kompliciranije zbog semi-implicitne vremenske sheme i težeg odabira vremenskog koraka koji onda može utjecati na reprodukciju Proudmanove rezonancije.

Nakon što je provedeno testiranje i odabran model, prešlo se na modeliranje četiri povijesna događaja meteotsunamija u Jadranu. Prvi set simulacija napravljen je uz upotrebu definirane minimalne dubine u modelu. Simulacije za Velu Luku, Široku i Mali Lošinj reproducirale su pojavu značajnih oscilacija u zaljevima, ali te su oscilacije bile višestruko manje od onih opaženih tj. iznosile su tek 35–50% opaženih vrijednosti. U slučaju Starog Grada model je dao još manje oscilacije (do 30% opaženih vrijednosti).

Daljnji korak u modeliranju predstavljale su simulacije koje uključuju poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže i one su provedene za događaje u Veloj Luci i Starom Gradu. Rezolucija mreže Jadrana je povećana, osobito u ta dva zaljeva gdje se prostorni korak mreže spustio na nekoliko desetaka metara te je dodana topografija koja je omogućavala „wave runup". Rezultati za Velu Luku pokazuju značajno poboljšanje u odnosu na simulacije koje su koristile minimalnu dubinu. Već je na ulazu u zaljev amplituda vala i njegova energija veća nego u prethodnim simulacijama, a bolja rezolucija unutar zaljeva u kombinaciji s mogućnošću poplavljivanja i osušivanja povećala je modelirane valne visine dva puta i približila ih opaženima. Ovaj rezultat pokazuje da je za modeliranje ekstremnih valnih visina kod razornih meteotsunamija korisno uključivanje modula za poplavljivanje

i osušivanje čvorova mreže.

Rezultati za Stari Grad nisu bili jednako uspješni u reprodukciji ekstremnih valnih visina kao oni za Velu Luku. Iako se uključivanjem poplavljivanja i osušivanja modelirana valna visina povećala, to povećanje nije bilo značajno i nije dovelo do poplavljivanja grada. Prethodno je pretpostavljeno da je meteotsunami koji je tog dana zadesio Stari Grad uzrokovao poplavljivanje samo zato što se superponirao na već značajno povećanu morsku razinu što u konačnici ovaj rezultat potvrđuje.

Provedeno istraživanje pokazuje da je za modeliranje meteotsunamija bitno razumjeti kako odabrani model funkcionira i koliko dobro reproducira rezonantne pojave bitne za nastanak takvih valova. Također, uključivanje modula za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže modela omogućuje da se preciznije modeliraju procesi koji se događaju kad valovi stignu do obale i tako dovodi do većih valnih visina. S druge strane, takav pristup može biti problematičan jer jako nelinearni procesi mogu dovesti u pitanje numeričku stabilnost modela što je moguće riješiti pravilnim odabirom modelskih parametara. Također je upitno koliko je moguće profiniti prostornu rezoluciju – a potrebno ju je profiniti na lokacijama od interesa – prije nego vremenski korak postane premalen, a vrijeme računanja preveliko za operativnu upotrebu. Definiranje koeficijenta trenja također može biti komplicirano. U ovom je radu korišten konstantan koeficijent trenja, međutim, moguće je definirati koeficijent trenja za svaku točku numeričke mreže zasebno. Taj je proces složeniji jer koeficijenti blizu obale (i s morske i s kopnene strane) jako zavise o tipu podloge – različite podloge uvjetuju različitu hrapavost dna. Trenje definirano na taj način također može znatno utjecati na rezultate modeliranja. Ne bi trebalo zanemariti ni meteorološki aspekt modeliranja. S obzirom na malen broj mjerenja nije bilo moguće odrediti kako su poremećaji tlaka zraka izgledali na otvorenom moru niti koje su im točno bile putanje. Iz tog razloga za modeliranje se koristila „boxcar" funkcija, ali moguće je da bi bolji ulazni meteorološki podaci, ili rezultati meteorološkog modela, doveli do daljnjeg poboljšanja rezultata modeliranja.

U posljednjih nekoliko godina zabilježeno je više slučajeva meteotsunamija u Jadranu za koje postoje mikrobarografski zapisi. Takvi podaci omogućuju preciznije modeliranje atmosferskog poremećaja što utječe na formaciju valnog paketa na otvorenom moru i moglo bi poboljšati rezultate modeliranja meteotsunamija. Kako bi u budućnosti modeliranje meteotsunamija u Jadranu bilo što preciznije – i potencijalno se uvela operativna prognoza

– potrebno je koristiti čim realnije poremećaje tlaka zraka, poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže modela, ali i eventualno uključiti varijabilne koeficijente trenja u rizičnim područjima koja često bivaju pogođena ovakvim događajima.

Popis literature

[1] Monserrat S, Vilibić I, and Rabinovich AB. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6:1035–1051, 2006.

[2] Linares Á, Wu CH, Anderson EJ, and Chu PY. Role of meteorologically induced water level oscillations on bottom shear stress in freshwater estuaries in the Great Lakes. *Journal of Geophysical Research*, 123:4970–4987, 2018.

[3] Šepić J and Rabinovich AB. Meteotsunami in the Great Lakes and on the Atlantic coast of the US generated by the derecho of june 29-30, 2012. *Natural Hazards*, 74:75–107, 2014.

[4] Lander JF, Lockridge PA, and Kozuch MJ. Tsunamis affecting the West Coast of the United States 1806–1992. U.S. Department of Commerce, NOAA, 242 pp, 1993.

[5] Soloviev SL, Solovieva ON, Go CN, Kim KS, and Shchetnikov NA. Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.–2000 A.D. Advances in Natural and Technological Hazards Research, 360 pp, 2000.

[6] Tinti S, Maramai A, and Graziani L. A new version of the European tsunami catalogue: updating and revision. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1:255–262, 2001.

[7] Tinti S, Maramai A, and Graziani L. The new catalogue of the Italian tsunamis. *Natural Hazards*, 33:439–465, 2004.

[8] Ewing M, Press F, and Donn WL. An explanation of the Lake Michigan wave of 26 June 1954. *Science*, 120:684–686, 1954.

[9] Hibiya T and Kajiura K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 38:172–182, 1982.

[10] Thomson RE, Rabinovich AB, Fine IV, Sinnott DC, McCarthy A, Sutherland NAS, and Neil LK. Meteorological tsunamis on the coasts of British Columbia and Washington. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34:971–988, 2009.

[11] Ličer M, Mourre B, Troupin C, Krietemeyer A, Jansá A, and Tintoré J. Numerical study of Balearic meteotsunami generation and propagation under synthetic gravity wave forcing. *Ocean Modelling*, 111:38–45, 2017.

[12] Orlić M, Belušić D, Janeković I, and Pasarić M. Fresh evidence relating the great Adriatic surge of June 21 1978 to mesoscale atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research*, 115:C06011, 2010.

[13] Proudman J. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2:197–209, 1929.

[14] Proudman J. *Dynamical Oceanography*. London: Methuen, New York: Wiley, 409 pp, 1953.

[15] Lamb H. *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 738 pp, 6th edition, 1932.

[16] Miles J and Munk W. Harbor paradox. *Journal of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division*, 87:111–130, 1961.

[17] Nomitsu T. A theory of tsunamis and seiches produced by wind and barometric gradient. *Memoirs of the College of Science; Kyoto Imperial University*, A18:201–214, 1935.

[18] Defant A. *Physical Oceanography, Vol. 2*. Pergamon Press, Oxford, 598 pp, 1961.

[19] Orlić M. The first attempt at cataloguing tsunami-like waves of meteorological origin in Croatian coastal waters. *Acta Adriatica*, 56:83–96, 2015.

[20] Zore-Armanda M. Destructive wave in the Adriatic. *Congrès-Assemblée Plénière, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée (Antalya 1978), Rapports et Procès-Verbaux des Réunions*, 25-26:93–94, 1979.

[21] Bedosti B. Considerazioni sul maremoto adriatico (tsunami) del 21.6.1978. Technical report, Pesaro, Italy, 1980.

[22] Hodžić M. Pojave izuzetnih oscilacija razine mora u zaljevu Vele Luke. *Priroda*, 68:52–53, 1979.

[23] Hodžić M. Long gravity waves on the sea–surface caused by cyclones and free oscillations (seiches) in the Vela Luka Bay on the Adriatic. *Rivista di meteorologia aeronautica*, 48:47–52, 1988.

[24] Orlić M. About a possible occurrence of the Proudman resonance in the Adriatic. *Thalassia Jugoslavica*, 16:79–88, 1980.

[25] Šepić J, Vilibić I, and Belušić D. Source of the 2007 Ist meteotsunami (Adriatic Sea). *Journal of Geophysical Research*, 114:C03016, 2009.

[26] Vilibić I, Domijan N, Orlić M, Leder N, and Pasarić M. Resonant coupling of a traveling air pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters. *Journal of Geophysical Research*, 109:C10001, 2004.

[27] Vilibić I. Numerical study of the Middle Adriatic coastal waters' sensitivity to the various air pressure travelling disturbances. *Annales Geophysicae*, 23:3569–3578, 2005.

[28] Šepić J, Vilibić I, and Fine I. Northern Adriatic meteorological tsunamis: assessment of their potential through ocean modeling experiments. *Journal of Geophysical Research*, 120:2993–3010, 2015.

[29] Šepić J and Vilibić I. The development and implementation of a real-time meteotsunami warning network for the Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11:83–91, 2011.

[30] Adriatic Sea and Coast (AdriSC). `http://faust.izor.hr/adrisc/pomoc.html`. Pristupljeno: 2018-11-05.

[31] Westerink JJ, Luettich RA, Blain CA, and Scheffner NW. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Technical report, Vicksburg, Mississippi, 1994.

[32] Shchepetkin AF and McWilliams JC. Correction and commentary for "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system" by Haidvogel et al. *Journal of Computational Physics*, 228:8985–9000, 2009.

[33] Zhang Y, Ye F, Stanev EV, and Grashorn S. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102:64–81, 2016.

[34] Hedström KS. Technical manual for a coupled sea-ice/ocean circulation model (version 3). Technical report, Anchorage, Alaska, 2009.

[35] Zhang Y and Baptista AM. Selfe: A semi-implicit eulerian–lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 121:71–96, 2007.

[36] Airy GB. Tides and waves. *Encyclopaedia Metropolitana*, 5:241–396, 1845.

[37] Chrystal G. An investigation of the seiches of Loch Earn by the Scottish Lake survey (Part V). *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 46:499–516, 1908.

[38] Greenspan HP. The generation of edge waves by moving pressure distributions. *Journal of Fluid Mechanics*, 1:574–592, 1956.

[39] Fandry C, Leslie L, and Steedman R. Kelvin-type coastal surges generated by tropical cyclones. *Journal of Physical Oceanography*, 14:582–593, 1984.

[40] Harris DL. The effect of a moving pressure disturbance on the water level in a lake. *Meteorological Monographs*, 2:46–57, 1957.

[41] Rao DB. Response of a lake to a time-dependent wind stress. *Journal of Geophysical Research*, 72:1697–1708, 1967.

[42] Wilson BW. Seiches. *Advances in Hydroscience*, 8:1–94, 1972.

[43] Sobey RJ. Analytical solutions for storm tide codes. *Coastal Engineering*, 46:213–231, 2002.

[44] Dotsenko SF and Miklashevskaya NA. Generation of seiches by moving baric fronts in bounded basins. *Physical Oceanography*, 18:63–77, 2008.

[45] Pattiaratchi CB and Wijeratne EMS. Are meteotsunamis an underrated hazard? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 373:20140377, 2015.

[46] Raichlen F (edited by Ippen AT). *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. McGraw Hill Book Company, New York, 744 pp, 1966.

[47] Rabinovič AB. *Dlinnye gravitacionnye volny v okeane: zahvat, rezonans, izlučenie.* Gidrometeoizdat, Sankt Peterburg, 325 pp, 1993.

[48] Orlić M. Osobno priopćenje, 2017.

[49] Belušić D and Strelec Mahović N. Detecting and following atmospheric distrubances with a potential to generate meteotsunamis in the Adriatic. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34:918–927, 2009.

[50] Vennell R. Long barotropic waves generated by a storm crossing topography. *Journal of Physical Oceanography*, 37:2809–2823, 2007.

[51] Luettich RA and Westerink JJ. An assessment of flooding and drying techniques for use in the ADCIRC hydromdynamic model: Implementation and performance in one-dimensional flows. Technical report, 1995.

[52] Dietrich JC, Kolar RL, and Luettich RA. Assessment of ADCIRC's wetting and drying algorithm. *Developments in Water Science*, 55:1767–1778, 2004.

[53] Dresback KM, Kolar RL, and Dietrich JC. On the form of the momentum equation for shallow water models based on the generalized wave continuity equation. *Advances in Water Resources*, 28:345–358, 2005.

[54] Lynch DR and Gray WG. A wave equation model for finite element tidal computations. *Computers & Fluids*, 7:207–228, 1979.

[55] Atkinson JH, Westerink JJ, and Hervouet JM. Similarities between the quasi-bubble and the generalized wave continuity equation solutions to the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 45:689–714, 2004.

[56] Kolar RL, Westerink JJ, Cantekin ME, and Blain CA. Aspects of nonlinear simulations using shallow-water models based on the wave continuity equation. *Computers & Fluids*, 23:523–538, 1994.

[57] A numerical tide and storm surge model ADCIRC (prezentacija). *Pan-American Studies Institute, PASI, Universidad Técnica Federico Santa María, 2–13 January, 2013 — Valparaíso, Chile*. Dr. Blain CA, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS, USA.

[58] Luettich RA and Westerink JJ. Elemental wetting and drying in the ADCIRC hydrodynamic model: Upgrades and documentation for ADCIRC version 34.xx. Technical report, 1999.

[59] Demissie HK and Bacopoulos P. Parameter estimation of anisotropic Manning's n coefficient for advanced circulation (ADCIRC) modeling of estuarine river currents (lower St. Johns River). *Journal of Marine Systems*, 169:1–10, 2017.

[60] Lončar G, Carević D, and Paladin M. The (im)possibility of reducing the meteotsunami amplitude by constructing protective breakwaters. *Technical Gazette*, 17:217–222, 2010.

[61] Denamiel C, Šepić J, and Vilibić I. Impact of geomorhological changes to harbor resonance during meteotsunamis: the Vela Luka Bay test case. *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-018-1862-5, 2018.

[62] Vater S, Beisiegel N, and Behrens J. A limiter-based well-balanced discontinuous Galerkin method for shallow-water flows with wetting and drying: one-dimensional case. *Advances in Water Resources*, 85:1–13, 2015.

[63] Zhang T and Feng P. Development of a three-dimensional unstructured mesh finite-element model for flood propagation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(04017042), 2017.

[64] Chen Y and Niu X. Forced wave induced by an atmospheric pressure disturbance moving towards shore. *Continental Shelf Research*, 160:1–9, 2018.

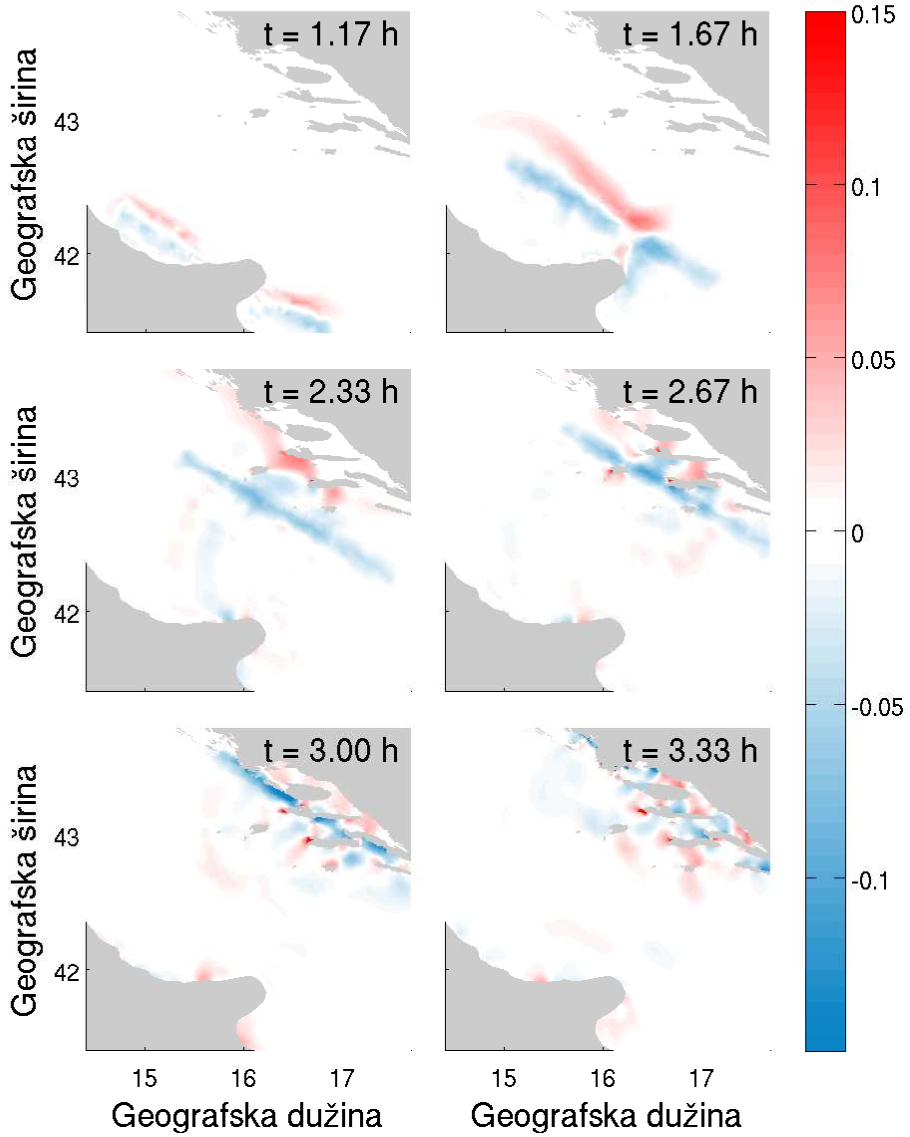
[65] Pasarić M and Orlić M. Eigenfrequencies of Vela Luka and Stari Grad Bays (east Adriatic). *Rapports et procès-verbaux des réunions CIESMM*, 38:180, 2007.

[66] Carrier GF and Greenspan HP. Water waves of a finite amplitude on a sloping beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 4:97–109, 1958.

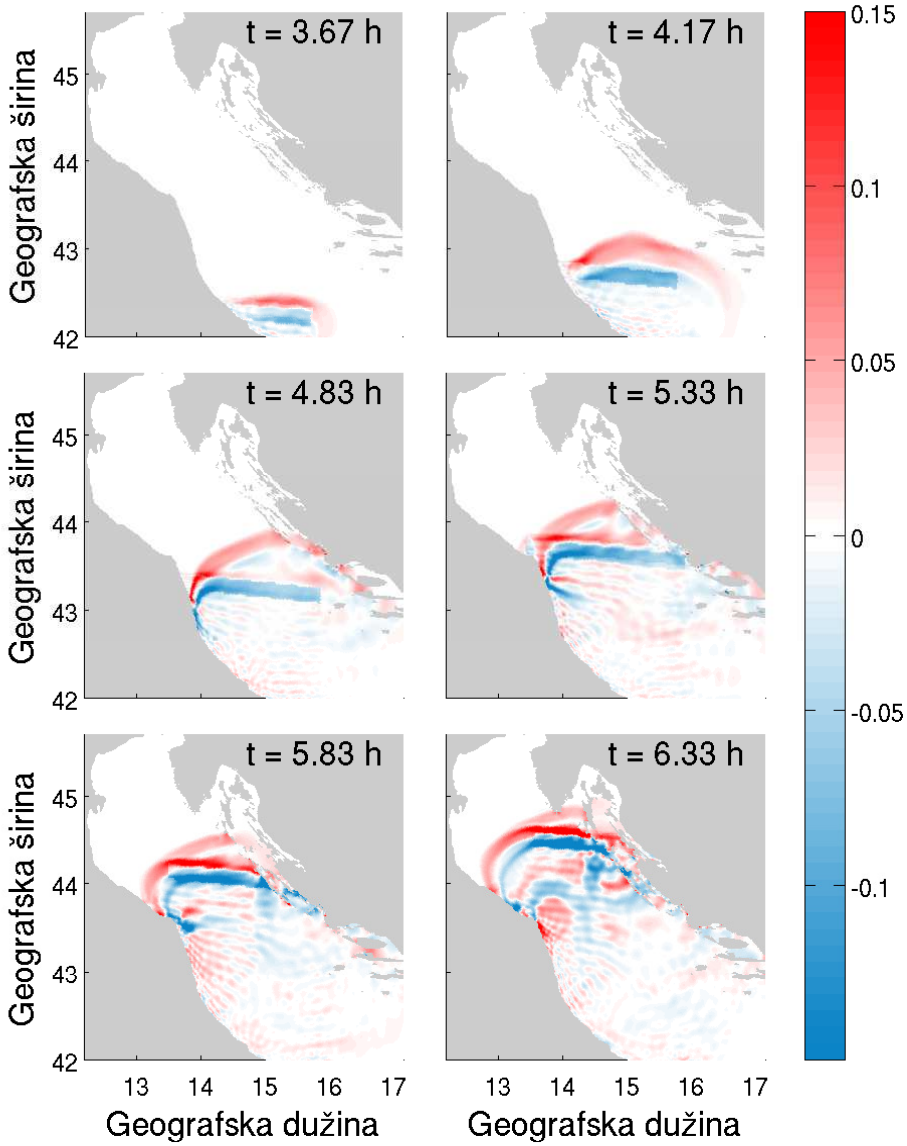
[67] Green G. On the motion of waves in a variable canal of small depth and width. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 6:457–462, 1838.

[68] Synolakis CE. Tsunami runup on steep slopes: how good linear theory really is. *Natural Hazards*, 4:221–234, 1991.

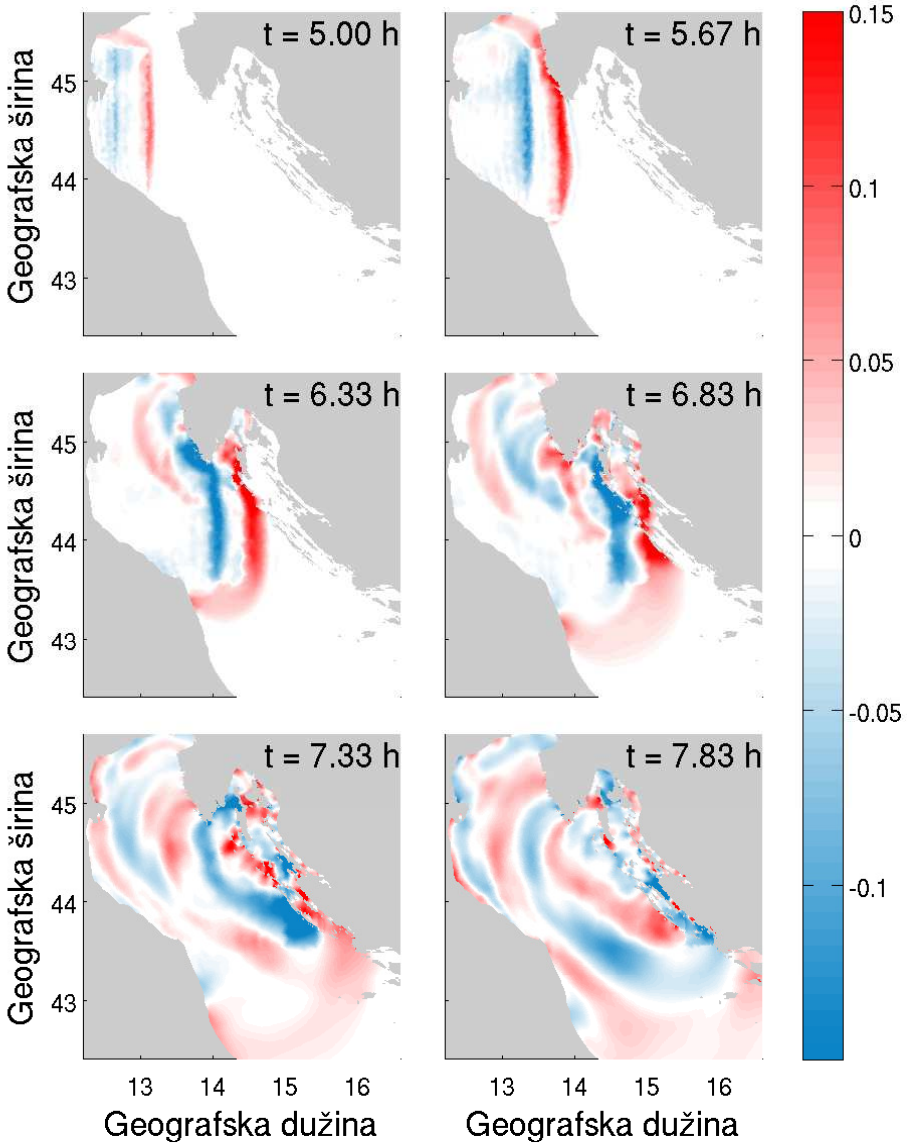
A. PRILOG A



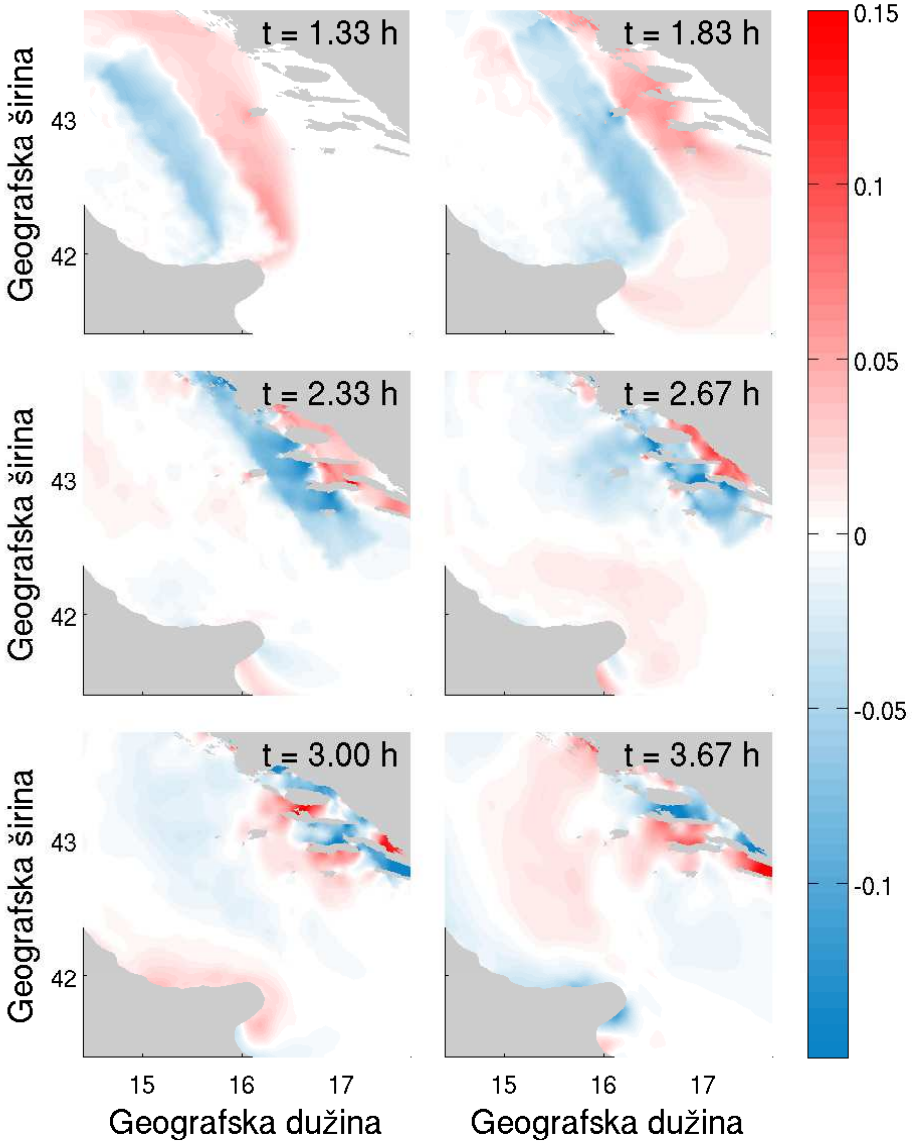
Slika A.1: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 24 m/s i kutom 60°. Simulacija koristi minimalnu dubinu modela 4 m, a odgovara slučaju poplavljivanja Vele Luke 21. lipnja 1978. godine.



Slika A.2: Visina razine mora (m) na sjevernom i dijelu srednjeg Jadrana za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 24 m/s i kutom 84°. Simulacija koristi minimalnu dubinu modela 4 m, a odgovara slučaju poplavljivanja Široke 22. kolovoza 2007. godine.

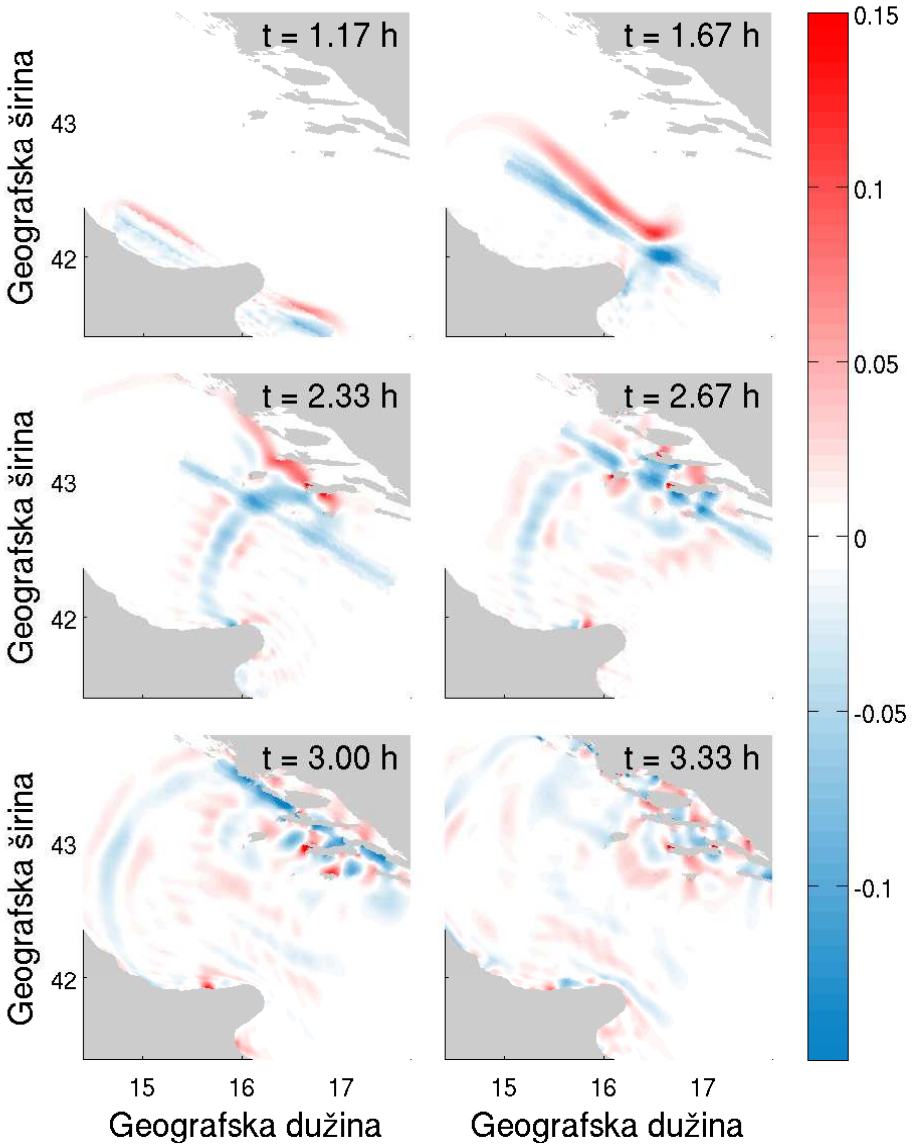


Slika A.3: Visina razine mora (m) na sjevernom i dijelu srednjeg Jadrana za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 22 m/s i kutom 0°. Simulacija koristi minimalnu dubinu modela 4 m, a odgovara slučaju poplavljivanja Malog Lošinja 15. kolovoza 2008. godine.

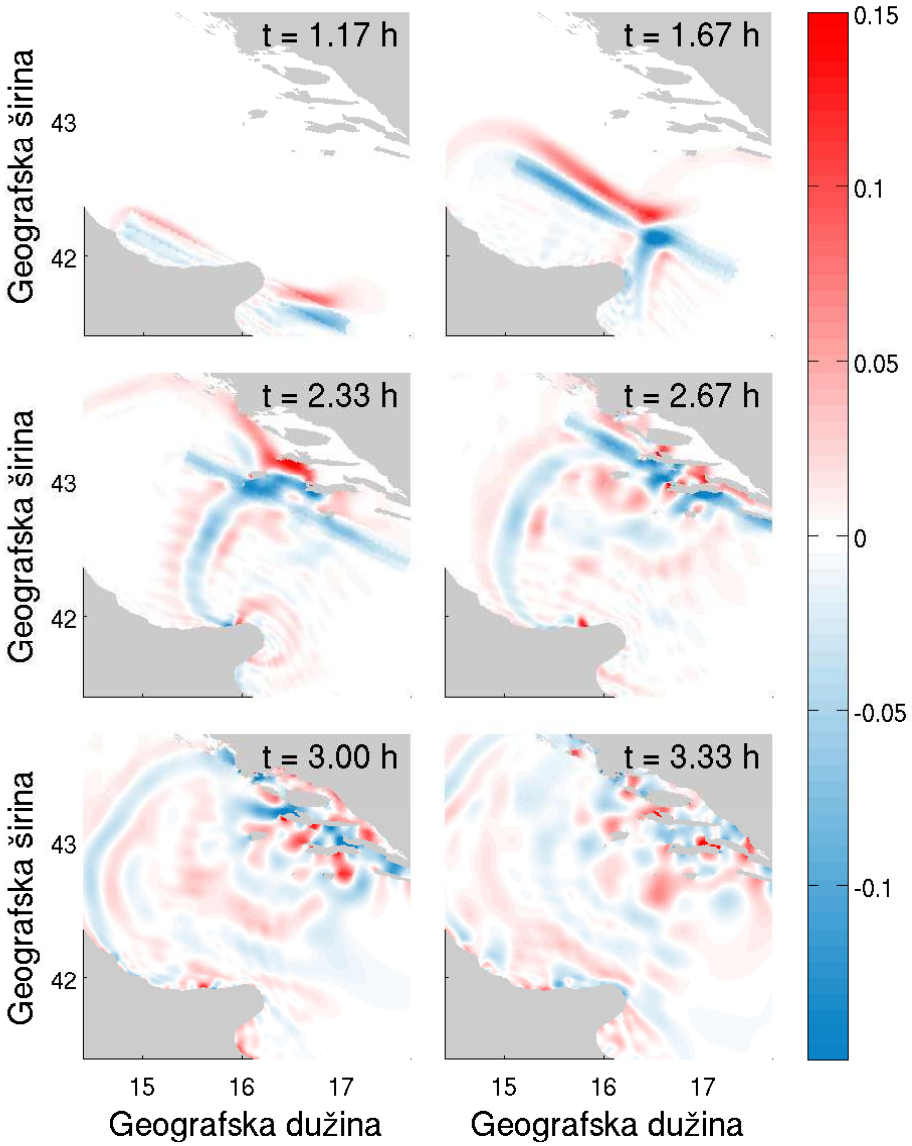


Slika A.4: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 25 m/s i kutom 35°. Simulacija koristi minimalnu dubinu modela 4 m, a odgovara slučaju poplavljivanja Starog Grada 19. veljače 2010. godine.

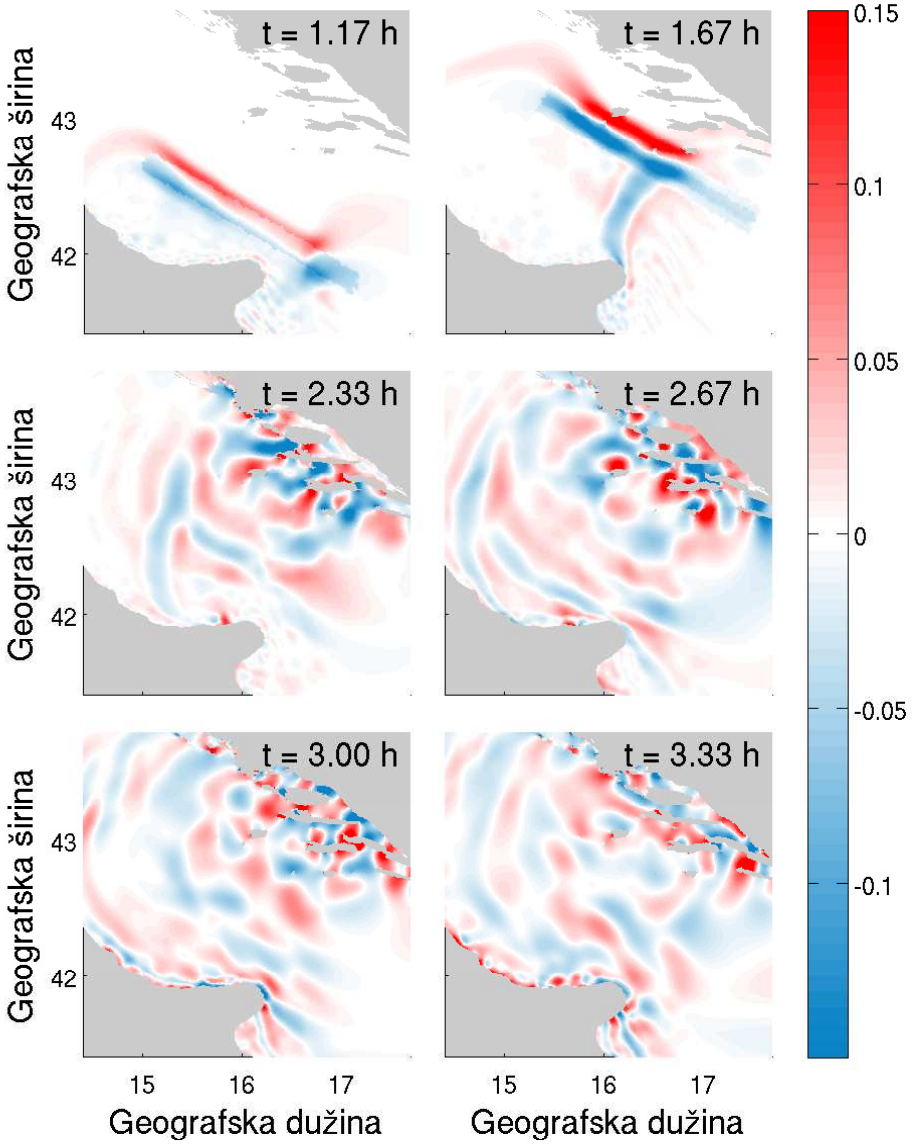
B. PRILOG B



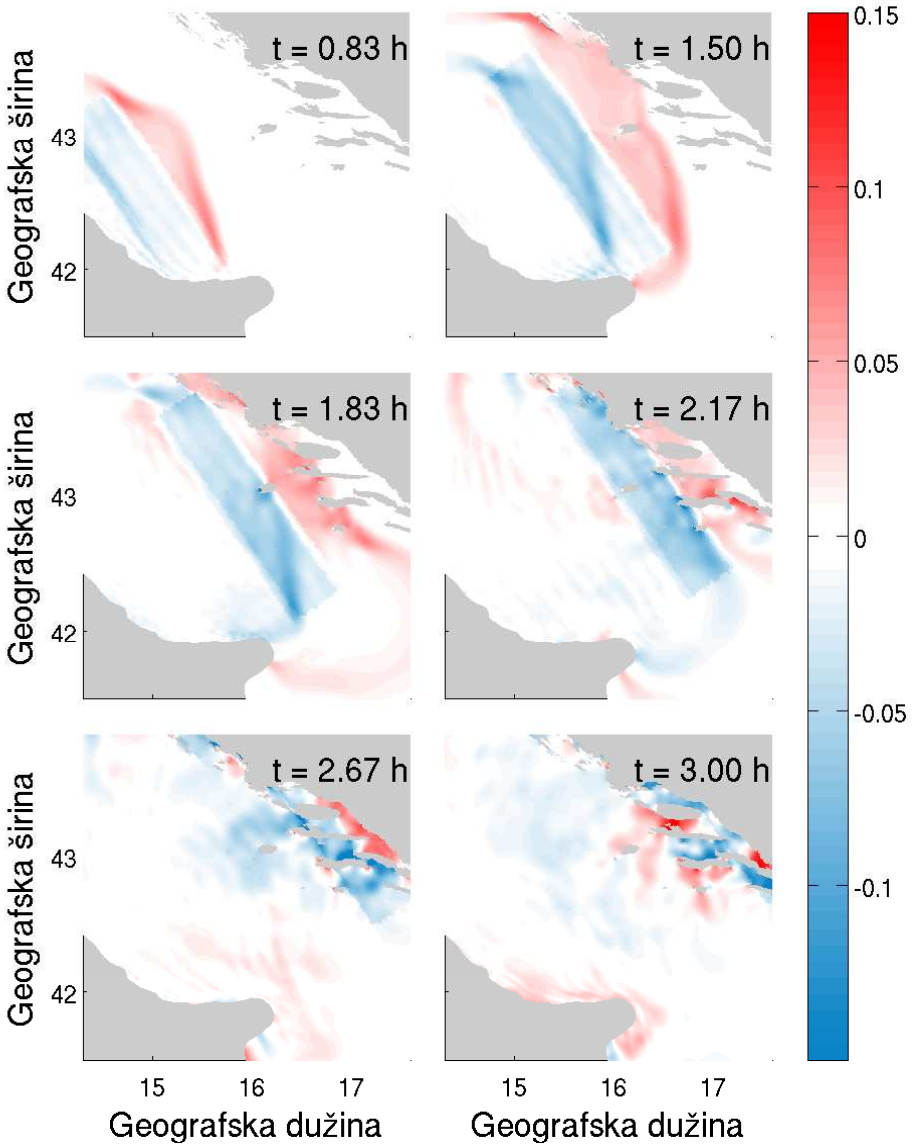
Slika B.1: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 24 m/s i kutom 60°. Simulacija koristi modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže, a odgovara slučaju poplavljivanja Vele Luke 21. lipnja 1978. godine.



Slika B.2: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 26 m/s i kutom 64°. Simulacija koristi modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže, a odgovara slučaju poplavljivanja Vele Luke 21. lipnja 1978. godine.



Slika B.3: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 32 m/s i kutom 60°. Simulacija koristi modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže, a odgovara slučaju poplavljivanja Vele Luke 21. lipnja 1978. godine.



Slika B.4: Visina razine mora (m) u srednjem Jadranu za nekoliko vremenskih koraka (vrijeme se mjeri od početka simulacije), za poremećaj tlaka zraka koji propagira brzinom od 25 m/s i kutom 35°. Simulacija koristi modul za poplavljivanje i osušivanje čvorova mreže, a odgovara slučaju poplavljivanja Starog Grada 19. veljače 2010. godine.

Životopis

Maja Bubalo rođena je 6. svibnja 1986. godine u Zagrebu. Nakon završene XV gimnazije upisala je Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer fizika. U rujnu 2010. godine završila je preddiplomski studij i stekla titulu prvostupnice geofizike nakon čega je upisala diplomski studij geofizike, smjer Meteorologija i fizička oceanografija. U svibnju 2013. godine uspješno je obranila diplomski rad pod naslovom „Proces izranjanja i nagib termokline u području srednjeg Jadrana" čime je stekla titulu magistra fizike-geofizike. U rujnu 2012. godine zaposlila se u RTL Hrvatska d.o.o. gdje je radila kao meteorologinja-prognostičarka. Od studenoga 2013. do kraja 2014. godine radila je u Geo-Meteo j.d.o.o., također kao meteorologinja-prognostičarka. Od siječnja 2015. godine zaposlena je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, prvo kao stručna suradnica, a zatim kao asistentica. U sklopu doktorskog studija sudjelovala je na nekoliko konferencija: Meteorološki izazovi 4 (Zagreb, studeni 2015. godine), EGU General Assembly 2017. i 2018. (Beč, Austrija, travanj 2017. i 2018. godine). Pohađala je ljetnu školu ASTARTE, PEARL & TANDEM Summer School na temu obalnog rizika i otpornosti na opasnosti koja se održala na Kreti u lipnju 2016. godine. U lipnju 2017. godine kratko je boravila na institutu SOCIB (Palma, Španjolska) gdje je surađivala s modelarskom grupom koja se bavi meteotsunamijima. Aktivno je sudjelovala u znanstvenom projektu CARE (Climate of the Adriatic REgion in its global context).

Znanstveni radovi

Bubalo M, Janeković I, and Orlić M. Chrystal and Proudman resonances simulated with three numerical models. *Ocean Dynamics*, 68:497–507, 2018.

Bubalo M, Janeković I, and Orlić M. Simulation of flooding and drying as an essential element of meteotsunami modelling (na recenziji).

Kongresna priopćenja

Bubalo M, Janeković I, and Orlić M. Numerical modeling of meteorological tsunamis. Meteorološki izazovi 4, Zagreb, Hrvatska, 2015.

Bubalo M, Janeković I, and Orlić M. Proudman and Chrystal resonances simulated with three numerical models. EGU General Assembly, Beč, Austrija, 2017.

Orlić M and Bubalo M. Exploring the relationship between Chrystal and Proudman resonances by a simple analytical model. Ocean Sciences Meeting, Portland, SAD, 2018.

Bubalo M, Janeković I, and Orlić M. Improved numerical simulations of the great Adriatic meteotsunami of 21 June 1978. EGU General Assembly, Beč, Austrija, 2018.

Diplomski rad

Bubalo M. Proces izranjanja i nagib termokline u području srednjeg Jadrana. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.