Izuzetno visoki vodostaji u sjevernom Jadranu i nagib morske razine u smjeru istok-zapad

Međugorac, Iva

Doctoral thesis / Disertacija

2018

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:217:157556

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Iva Međugorac

IZUZETNO VISOKI VODOSTAJI U SJEVERNOM JADRANU I NAGIB MORSKE RAZINE U SMJERU ISTOK-ZAPAD

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Iva Međugorac

IZUZETNO VISOKI VODOSTAJI U SJEVERNOM JADRANU I NAGIB MORSKE RAZINE U SMJERU ISTOK-ZAPAD

DOKTORSKI RAD

Mentori:
prof. dr. sc. Mirko Orlić
dr. sc. Miroslava Pasarić

Zagreb, 2018.

University of Zagreb

Faculty of Science
Department of Geophysics

Iva Međugorac

EXCEPTIONALLY HIGH SEA LEVELS IN THE NORTHERN ADRIATIC AND THE EAST-TO-WEST SEA-LEVEL SLOPE

DOCTORAL THESIS

Supervisors:
Prof. Mirko Orlić
Dr. Miroslava Pasarić

Zagreb, 2018

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.

Mentorica dr. sc. Miroslava Pasarić je viši znanstveni suradnik na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem voditeljima prof. dr. sc. Mirku Orliću i dr. sc. Miroslavi Pasarić na odabranoj temi, diskusiji i podršci tijekom ovog rada.
Želim zahvaliti prof. dr. sc. Zoranu Pasariću što je stalno bio na raspolaganju i pomogao mi u rješavanju problema s *MATLAB*-om, numeričkim modelima i statističkim testovima. Najljepša hvala mojoj obitelji na podršci, razumijevanju i strpljenju. Hvala Budimiru i Tomislavu što su me ohrabrivali, gurali naprijed i nisu mi dozvolili da odustanem.

Sažetak

Jadransku obalu ponekad pogađaju ekstremno visoke razine mora pri čemu je Venecija najizloženija njihovom učinku. Ovaj fenomen nastaje kao superpozicija nekoliko procesa u moru od kojih je najvažniji olujni uspor tj. prisilno uzdizanje razine mora pod utjecajem tlaka zraka i vjetra. U posljednjih desetak godina zabilježeno je nekoliko iznimnih poplava prilikom kojih je zahvaćen veći dio istočne obale s istovremeno umjerenim intenzitetom na suprotnoj obali.

Cilj rada je odgonetnuti meteorološke uvjete tj. razdiobu prizemnog tlaka zraka i vjetra koji su naročito opasni za istočnu odnosno zapadnu obalu Jadrana te ocijeniti hoće li se njihove karakteristike mijenjati u budućoj klimi.

Rad sadrži: (1) detaljnu empirijsku analizu dviju destruktivnih poplava koje su pogodile jadransku obalu 4. studenoga 1966. i 1. prosinca 2008.; (2) identifikaciju sinoptičkih uvjeta povoljnih za poplavljivanje istočne odnosno zapadne obale Jadrana, na temelju analize događaja izdvojenih iz 31-godišnjih nizova vodostaja u Bakru i Veneciji (uz izvođenje numeričkih eksperimenata); (3) istraživanje kako će se klimatske promjene odraziti na pojave opasnih epizoda vjetra u budućnosti, koristeći simulacije tri regionalna klimatska modela.

Rezultati su pokazali da se prilikom olujnih uspora u Jadranu, osim nagiba morske površine uzduž bazena, uspostavlja i značajan nagib u poprečnom smjeru. Odnos uzdužnog i poprečnog nagiba određuje intenzitet poplave na određenoj obali. Ustanovljeno je da je istočna obala, u odnosu na zapadnu, ugroženija za vrijeme dubljih sredozemnih ciklona pomaknutih na sjever. U ovim prilikama se iznad Jadrana razvija jugo s izraženom poprečnom komponentom prema istočnoj obali te smicanjem uzdužne komponente s većim brzinama uz istočnu obalu. Ovime je pokazano da poplavljivanje istočne jadranske obale ne ovisi samo o vjetru prema obali već i o smicanju komponente vjetra paralelne s obalom. Analizom polja vjetra iz klimatskih simulacija ustanovljeno je da nas u budućnosti očekuju uvjeti slični sadašnjima. Ovaj signal je robustan po više kriterija, uz malu vjerojatnost da će doći do promjene svojstava potencijalno opasnih epizoda vjetra.

Ključne riječi: poplave, olujni uspor, sjeverni Jadran, poprečni nagib morske razine, polje vjetra, ERA-Interim, SCHISM, klimatske projekcije, ALADIN52, RCA4, RegCM4

Extended abstract

Introduction

Flooding of the Adriatic coast, also known as *acqua alta*, is a common phenomenon usually occurring during late autumn and winter. While this phenomenon is predominantly caused by a storm surge, other processes can also significantly contribute to flooding. Tide, pre-existing seiche and a long-term variability component of the sea level can mitigate or reinforce the upcoming storm surge, which depends on their amplitudes and timing. These processes interact linearly due to their relatively small amplitudes compared to the basin depth [1], [2]. During these events, the city of Venice is the most exposed to flooding as it is situated at the end of the longest fetch and on low lying ground.

Synoptic situation favouring storm surges in the Adriatic is well known [3], [4]. It develops when Mediterranean cyclone approaches the basin from the west, inducing both the air-pressure gradient along the basin and southeasterly wind *Sirocco*. Both of these meteorological parameters act in the sense to accumulate water in the closed end of the Adriatic.

Tide in the Adriatic is of mixed type composed of seven major constituents (M2, S2, K2 i N2, K1, O1, and P1). The amplitude increases toward the closed north end where tidal range is about 1 m [5]. Fundamental Adriatic-wide seiche has a period of 21.2 h [6] and long decay time, estimated to be 3.2 ± 0.5 days [7]. If a seiche is already active, it can further increase sea-level peak if positively superimposed on storm surge. Prolonged intervals of raised sea level, which may last more than a month [8], can also influence formation of extreme sea levels [9], [10], [11]. The low-frequency variability of sea level is related to planetary atmospheric waves and is an ever-present component of coastal floods that can cause sea level changes up to 70 cm.

Several extreme flooding episodes occurred in recent years that had severe impact along the eastern Adriatic coast. The three largest events observed at Bakar[1], by descending order in intensity, took place on 1 November 2012, 1 December 2008 and 25 November 2009. An interesting feature of these episodes is that they were not particularly strong in Venice [12]. It should be emphasized that the eastern Adriatic coast was not often

[1]It is the oldest Croatian tide gauge station, recording since 1929, except during the Second World War.

affected by such episodes in the past – the last severe flooding occurred on 22 December 1979, and before that on 26 November 1969.

This study is motivated by frequent flooding of the Croatian coast in the last decade. The main question is: why some episodes have a distinctly different effect along the two opposite coastlines and which mechanism controls exposure of a certain coastline to flooding? The hypothesis behind this work is that sea level can significantly slope during *Sirocco* episodes, not only in the along-basin but also in the cross-basin direction. Hence, storm-surge height at particular coastline will be determined by combination of the two slopes. Specific synoptic conditions controlling setup of the cross-basin sea-level slope (i.e. transverse sea-level slope, TSLS) are identified in this work. Meteorological situations especially dangerous for either the eastern or the western Adriatic coastline are defined using TSLS. Furthermore, those conditions are studied in future climate in order to see which shape of the wind field is expected to prevail and which coastline will be more frequently affected by flooding.

Empirical analysis of the selected Adriatic floods

In order to asses importance of all involved processes in coastal flooding and their role in distinctly different responses of sea level along the two opposite coastlines, two events that occurred on 4 November 1966 and 1 December 2008 [13] are analysed. The 1966 flood is often perceived as the flood of the century, since sea level in Venice rose almost 2 m above the mean; this was the highest water level ever recorded there. Meanwhile, at the opposite coast the response of sea level was of milder intensity. This was not the case during the 2008 event, when the extreme rise of sea level occured at the Croatian coast, and not in Venice. The Croatian station Bakar recorded at that time the highest water level ever.

The analysis is performed using measured sea level, near surface wind and air pressure at stations along the entire Adriatic coast. In addition to the measurements, ECMWF reanalysis fields (ERA40 and ERA-Interim) of air pressure, wind and geopotential height of 500-hPa surface are studied. Floods are studied with respect to four different sea-level procesess: low-frequency variability, tides, pre-existing seiche and storm surge. The low-frequency variability is extracted using digital low-pass filter with half-power point

at 10 days. Tides are calculated using the *T_tide* tool and taking into account seven major constituents. Pre-existing seiche is estimated applying a semiempirical model [13]. After these three components are subtracted from measurements, the remaining sea-level variability is assigned to storm-surge activity. Meteorological backgrounds are studied using observed and modelled data by evaluating the impact of the along-basin and the cross-basin wind.

The two marine storms differed in the atmospheric forcing and relative timing of all the contributing processes. The underlying meteorological conditions were such that the 1966 event was induced by uniform along-basin wind, hence the flood was dominant along north-western coastline. On the other hand, wind field related to the 2008 event was characterized by a transverse component, and more importantly, a cross-basin shear of longitudinal wind with stronger wind over the eastern, much deeper part of basin, which outbalanced the competing bottom slope effect. The latter proved to be crucial for stronger accumulation of water along the eastern coastline.

Adriatic storm surges and related cross-basin sea-level slope

Persuing these observations, more general conclusions are reached by analyzing a number of different cases, that were extracted from sea-level time series at Venice and Bakar in period 1984–2014 [14]. Extreme events are defined as de-tided sea levels exceeding the given treshold (99.95th percentile). The air-pressure and wind fields responsible for each episode are identified by examining the ERA-Interim fields. Idealized numerical experiments were performed with oceanographic model SCHISM in order to simulate sea-level response to atmospheric forcing in the whole Adriatic. Three types of storm surges are defined according to their TSLS: storm surges that slope strongly westward (W type), storm surges that slope eastward (E type) and ordinary storm surges (O type). Composite atmospheric fields and sea-level response are calculated for the three types.

Results show that two marginal types of storm surges arise in the course of different weather conditions. The type W, especially threatening to the western coastline, develops during Mediterranean cyclones supporting complex wind over the Adriatic with *Bora*-like wind over the northernmost part of the basin and almost uniform *Sirocco* wind elsewhere. On the other hand, the type E, which is especially dangerous for the eastern coastline,

occurs during deeper Mediterranean cyclones shifted to the north. On type E occasions, southerly wind which develops over the Adriatic is characterized by a transverse component directed towards the eastern shore, and by shear of the longitudinal component with higher velocities along the eastern coast. Hence, it is shown that flooding of a particular Adriatic coast depends not only on the wind towards that coast, but also on the shear of the component parallel to it. Furthermore, storm-surge height at the particular Adriatic coast depends on the resultant of the along-basin and crosss-basin sea-level slopes. Since the two slopes are not correlated, knowing the TSLS and the atmospheric forcing favouring its setup provides valuable new information on exposure of a certain Adriatic coast to flooding.

Changes of threatening wind episodes in future climate

Meteorological conditions especially dangerous for the eastern and the western coastline are examined in the future climate. An extensive set of measured and simulated data comprises sea levels measured in Venice and Bakar in period 1984–2014, ERA-Interim wind fields in the same period, and simulations of the three regional climate models (ALADIN52 [15], RCA4 [16], and RegCM4 [17]), in present and future climate. Observed sea levels and ERA-Interim fields are used to build the algorithm which will be applied to extract from the climate simulations those wind fields that are flood treatening to the Adriatic. The selective criterion requires that the wind is of east-to-southwestern direction over the greater portion of the basin with minimum speed of 10 m/s. The selected episodes are further classified using wind characteristics obtained in the previous chapter: those particularly threatening to the western (type W) and to the eastern (type E) coastline. Climate change of their properties are determined by comparison of characteristics in present and future climate taking into account several criteria: moderate and extreme climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) and two future periods representing middle and the end of 21st century (2041–2070 and 2071–2100).

The analysis predicts that the wind characteristics responsible for extremely high storm surges in the Adriatic will not change in the future climate. The frequency, intensity and spatial structure, i.e. the type, of potentially dangerous episodes will remain the same as in the present climate. Simulations of the three regional climate models forced with

different global models give consistent results. The obtained signal is robust under all criteria: it does not depend on a possible climatic scenario, the future time interval, nor on regional or global models. This is in line with conclusions of the two previous studies with similar research objectives [18], [19].

Keywords: *acqua alta*, storm surge, Northern Adriatic Sea, cross-basin sea-level slope, wind field, ERA-Interim, SCHISM, climate projections, ALADIN52, RCA4, RegCM4

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Empirijska analiza odabranih poplava **5**

2.1 Baza podataka 7

2.2 Empirijska analiza 9

2.3 Rezultati 11

2.3.1 Poplava na dan 1. prosinca 2008. 11

2.3.2 Poplava na dan 4. studenoga 1966. 18

2.4 Diskusija 20

3 Iznimni olujni uspori u Jadranu i poprečni nagib morske površine **26**

3.1 Podaci 27

3.2 Empirijska analiza 28

3.2.1 Izdvajanje epizoda olujnih uspora 28

3.2.2 Klasifikacija olujnih uspora 31

3.3 Numeričke simulacije 32

3.4 Rezultati 34

3.4.1 Opaženi olujni uspori 34

3.4.2 Simulacije razine mora 36

3.4.3 Analiza tipova olujnih uspora 38

3.4.4 Povezanost poprečnog nagiba morske površine i vjetra 43

3.5 Diskusija 45

3.5.1 Intenzitet olujnih uspora i poprečni nagib morske površine 45

3.5.2 Metodološka pitanja 47

4 Promjene opasnih epizoda vjetra u budućoj klimi **51**

4.1 Baza podataka i statističke metode 52

4.2 Prilagodba algoritama i izdvajanje epizoda 54

4.2.1 Izdvajanje razinskih epizoda 54

4.2.2 Izdvajanje vjetrovnih epizoda 56

4.2.3 Pregled izdvojenih epizoda 59

4.2.4 Klasifikacija vjetrovnih epizoda 62

4.3 Ocjena regionalnih klimatskih modela 66

4.4 Rezultati 67

4.5 Diskusija 75

5 Zaključak **80**

Bibliografija **83**

Dodatak A **90**

Dodatak B **96**

Dodatak C **99**

Životopis **103**

Popis radova **104**

Poglavlje 1

Uvod

Visoke razine mora u sjevernom Jadranu formiraju se nekoliko puta godišnje, najčešće u kasnu jesen i zimi. Uzrokuju poplave i štetu infrastrukture duž sjeverne obale bazena pri čemu je najugroženije plitko područje u okolici Venecije. Ovom pojavom su rjeđe pogođeni najsjeverniji gradovi na istočnoj obali, poput Umaga, Rovinja, Pule i Rijeke, dok je područje srednjeg Jadrana izloženo poplavljivanju samo u iznimnim situacijama. Spomenuti događaji, koji se u Veneciji nazivaju *acqua alta*, rezultat su konstruktivne superpozicije više fenomena: olujnog uspora, plimnih oscilacija, osnovnog jadranskog seša i dugoperiodičke komponente varijabilnosti vodostaja. Procesi su međusobno nezavisni, zbog relativno malih amplituda naspram dubine bazena, pa se stoga ukupni vodostaj može smatrati linearnim zbrojem četiri procesa [1], [2].

U nastanku visokog vodostaja dominantan utjecaj ima olujni uspor, dok ostale komponente mogu, ali i ne moraju, biti značajne. Olujni uspori predstavljaju prisilno, barotropno, neperiodičko podizanje razine mora pod utjecajem tlaka zraka i napetosti vjetra, pri čemu se hidrostatička ravnoteža u moru ne narušava značajno [20]. Atmosferski tlak djeluje vertikalno na stupac morske vode te se na svim dubinama u stupcu osjeti gotovo istovremeno. Lokalna promjena tlaka zraka u odnosu na srednje polje iznad bazena (Δp_a) i promjena vodostaja u odnosu na srednji nivo ($\Delta\zeta$), povezane su tzv. jednadžbom inverznog barometra:

$$\Delta\zeta = -\frac{\Delta p_a}{g\rho}, \tag{1.1}$$

gdje je g ubrzanje sile teže a ρ gustoća mora. U ovakvom jednostavnom modelu padu/rastu

tlaka od 1 mbar odgovara rast/pad razine mora od 1 cm. Sila površinske napetosti vjetra pak djeluje horizontalno i to samo na površini mora, a nivo ispod površine do kojega se osjeti njen utjecaj ovisi o trajanju vjetra i o stratifikaciji vodenog stupca [20]. Nagib razine mora $\vec{\nabla}\zeta$ nastao djelovanjem napetosti vjetra $\vec{\tau}_s$ može se opisati relacijom

$$\vec{\nabla}\zeta = \frac{\vec{\tau}_s}{gD\rho}, \tag{1.2}$$

gdje je D dubina bazena. Jasno je da će sila napetosti vjetra, zbog dubine u nazivniku, inducirati veći nagib površine u plićim dijelovima bazena. Stoga su u Jadranu denivelacije razine zbog djelovanja vjetra najizraženije u sjevernom dijelu gdje dubine iznose manje od 100 m. Atmosferski uvjeti povoljni za razvoj olujnih uspora u Jadranu dobro su poznati (npr. [3], [4], [18]). Uzrokuju ih ciklone koje se bazenu približavaju sa zapada, a koje se najčešće formiraju u zapadnom ili srednjem Sredozemlju. Ovi sinoptički sustavi induciraju gradijent tlaka duž bazena (niski tlak na sjeveru), što tipično rezultira jugoistočnim vjetrom (jugo) koji se razvija iznad cijelog bazena ili pak njegovog većeg dijela. Oba faktora djeluju u istom smislu prilikom čega dolazi do nagomilavanja vode u zatvoreni kraj bazena.

Plimne oscilacije su potpuno predvidiva, ali važna, komponenta jadranskih poplava [10]. U Jadranu su one mješovitog tipa pri čemu je značajno 7 harmonijskih konstituenata: četiri poludnevna (M2, S2, K2 i N2) i tri dnevna (K1, O1 i P1). Budući da je međudjelovanje plimnih oscilacija i olujnog uspora zanemarivo u Jadranu te da amplituda plimnih oscilacija raste od otvorenog prema zatvorenom kraju bazena [1], [5], uloga plimnih oscilacija u epizodama visokog vodostaja može biti raznolika. Njihov doprinos prije svega ovisi o relativnoj fazi u kojoj se nalaze spram atmosferskog prinudnog djelovanja, te o amplitudi plimnih oscilacija na promatranoj lokaciji.

Već postojeće oscilacije razine nastale ako je prethodno bio pobuđen seš, mogu pojačati ili ublažiti efekte atmosferskog prinudnog djelovanja u epizodama iznimnog vodostaja [1], [4]. Naime, prije ciklone koja će rezultirati poplavljivanjem, u moru mogu biti pobuđeni seši koji se u Jadranu najčešće generiraju iznenadnim slabljenjem juga ili njegovim okretanjem na buru. Budući da se sporo guše, a znaju trajati i do nekoliko dana, mogu poduprijeti nadolazeću poplavu. Period prvog moda jadranskog seša je 21.2 h [6], a vri-

jeme gušenja mu je procijenjeno na 3.2 ± 0.5 dana [7]. Amplituda mu monotono raste od Otranta do najsjevernijeg kraja Jadrana gdje poprima vrijednosti do nekoliko desetaka centimetara [21]. Osim prvog moda, u Jadranu se mogu pobuditi i viši modovi stojnih valova što ovisi o prostornoj strukturi vjetra iznad bazena [6]. Međutim, njihove amplitude su niske u usporedbi s prvim modom pa stoga imaju neznatan utjecaj na poplavljivanje jadranske obale.

Planetarni atmosferski valovi značajno utječu na stvaranje preduvjeta jadranskih poplava [9], [10]. Oni djeluju na vodostaj na dva načina. Osim što izravno izazivaju dugoperiodičke promjene tlaka zraka i vjetra pri razini mora, djeluju i neizravno podupirući razvoj sinoptičke aktivnosti na prednjoj strani doline. Dovode do produljenih intervala povišene ili snižene razine koja, kada se pozitivno superponira na već spomenute procese, pospješuje nastanak visokog vodostaja u sjevernom Jadranu. Njihova aktivnost jasno se vidi na poljima geopotencijala 500-hPa plohe, na vremenskim skalama od 10 do 100 dana. Odgovarajući poremećaj vodostaja, u daljnjem tekstu nazvan planetarna komponenta, stoga se može odrediti primjenom odgovarajućeg nisko propusnog filtra na rezidualni vodostaj.

Područje sjevernog Jadrana je u posljednjih deset godina bilo izloženo nekoliko puta iznimnim poplavama a one su naročito bile izražene duž istočne obale. Tako su na najstarijoj hrvatskoj postaji Bakar[1] tri najviša vodostaja zabilježena 1. studenoga 2012., 1. prosinca 2008. i 25. studenoga 2009., redom prema visini razine mora. Upečatljivo svojstvo ovih poplava, osim što su uzrokovale ekstreman porast vodostaja u sjevernom Jadranu, je da su u Veneciji imale umjereniji intenzitet. Treba naglasiti da je prije ovoga, poplavljivanje istočnog priobalja bilo rjeđe te se zadnja poplava dogodila 22. prosinca 1979., a prije toga 26. studenoga 1969. Učestalo poplavljivanje istočnog Jadrana posljednjih godina potaknulo je naše zanimanje za meteorološke uvjete koji uzrokuju jači odziv razine mora uz jednu od dviju suprotnih obala. Iznos ukupnog vodostaja sigurno ovisi o iznosu i odnosu relativnih faza svih uključenih procesa, ali prostornu strukturu morske razine, i njen utjecaj na jednu od obala, dominantno kontrolira olujni uspor. Stoga ćemo u ovom istraživanju odrediti specifične sinoptičke uvjete tj. karakteristična polja tlaka zraka i vjetra, koja dovode do izraženog porasta razine mora duž istočne/zapadne obale

[1]Postaja je osnovana 1929. i radi kontinuirano od 1949. godine.

Jadrana, a isto tako ćemo utvrditi i fizičke osobine bazena važne za taj proces. Nadalje, cilj je analizirati klimatsku varijabilnost prepoznatih meteoroloških uvjeta u sadašnjoj i budućoj klimi, kako bi se procijenili učestalost i intenzitet poplavljivanja u budućnosti.

Rezultati ovog istraživanja doprinijet će boljem poznavanju fizikalnih mehanizama koji kontroliraju izloženost istočne/zapadne jadranske obale jačem poplavljivanju. Također, identificirat će se smjer vjetra i razdioba polja vjetra koji predstavljaju najveću opasnost za istočnu obalu Jadrana te će se ispitati njihova varijabilnost u budućoj klimi. Osim znanstvenog doprinosa, rezultati će biti primjenjivi u praksi u smislu bolje detekcije potencijalno opasnih meteoroloških situacija te izrade strategije prilagodbe na klimatske promjene.

Radnja je strukturirana kako slijedi. U poglavlju 2 pokazana je važnost pojedinih procesa u formiranju visokih vodostaja, analizom dviju ekstremnih jadranskih poplava: slučaj 4. studenoga 1966. i 1. prosinca 2008. Prva poplava je bila najintenzivnija na zapadnoj a druga na istočnoj obali. S ciljem da se odredi koji je čimbenik (smjer vjetra, smicanje vjetra, utjecaj batimetrije) presudan za poplavljivanje istočne/zapadne obale Jadrana, u poglavlju 3 analizirano je 38 iznimnih epizoda olujnih uspora uz izvođenje idealiziranih simulacija. U poglavlju 4 analizirana je klimatska varijabilnost poljā vjetra naročito opasnih za istočnu odnosno zapadnu obalu Jadrana u sadašnjoj i budućoj klimi te je ocijenjen njihov intenzitet i frekvencija u budućnosti. Dobiveni rezultati diskutirani su na kraju svakog poglavlja. Glavni zaključci i prijedlozi za buduća istraživanja sažeti su u poglavlju 5.

Poglavlje 2

Empirijska analiza odabranih poplava

Područje sjevernog Jadrana je u posljednjih pedeset godina bilo izloženo desetku iznimnih poplava od kojih su najdestruktivnije bile one iz 1966., 1969., 1979., 2008., 2009. i 2012., a posebno se ističu epizode iz 1966. i 2008. godine. Dana 4. studenoga 1966. je u Veneciji na mareografskoj postaji Punta della Salute zabilježena najviša ikada razina mora [12], [22]. Tom prilikom je vodostaj tijekom 15 sati bio viši od 1 m iznad srednje razine mora što je u to vrijeme odgovaralo kritičnoj vrijednosti pri kojoj su poplavljene dvije trećine grada. Istovremeno su i ostale jadranske postaje zabilježile visoke vodostaje, ali je duž istočne obale stanje bilo manje dramatično; na postaji Bakar događaj je rangiran tek kao deveti po intenzitetu. Ovo međutim nije bio slučaj 1. prosinca 2008. kada su sve hrvatske mareografske stanice sjeverno od Splita zabilježile neobično visoke vodostaje, a u Bakru je registriran do tada najviši vodostaj od početka rada postaje [11]. U Trstu je ovaj događaj rangiran kao drugi najjači, dok je u Veneciji zabilježeni vodostaj bio čak 37 cm niži od onoga iz 1966. godine. Zbog opisanih karakteristika tj. vrlo različitog učinka na dvjema obalama Jadrana, ove dvije epizode su odabrane kao okosnica ovog doktorskog istraživanja. Poplava iz 1966. je do danas intenzivno istraživana i još uvijek je predmet raznih studija. Meteorološka pozadina događaja je opisana u npr. [23] i [24], dok se oceanografske i hidrografske karakteristike mogu naći u npr. [25], [26], [27], [28]. Predvidivost ovakvog iznimnog događaja je analizirana u [29]. Ova istraživanja pokrivaju cijeli jadranski bazen ili se pak fokusiraju na usko područje ispred Venecije. Međutim u

svakom slučaju nedostaju detalji zbivanja na istočnoj obali Jadrana (slika 2.1).

Večernji list

ORKAN

STOTINE ČAMACA I BRODIĆA U PULI VJETAR I VALOVI SU RAZBILI ILI POTOPILI

HARA OBALOM

Nezapamćeni vjetar i valovi nanose veliku štetu od Umaga do Splita

ZAGREB, 5. studenoga — Jugo orkanske snage, koji povremeno dostiže brzinu od 110 kilometara na sat, hara obalom od Kopra, Pule i Rijeke do Splita. Vjetar kakav u Puli ne pamte već 50 godina razbjesnio je more koje valovima visokim i do 8 metara uništava čamce i brodiće, preplavljuje obale, raskapa pristaništa i probija se u prizemlja zgrada.

Stanarine za 25 posto više

U novoj godini plaćat ćemo za četvrtinu više stanarine od sadašnjih. O tome vas detaljnije informiramo u »Zagrebačkoj kronici« koju danas objavljujemo na stranama 16. i 17.

SAVA UGROZILA JESENICE I KRANJ

LJUBLJANA, 5. studenoga — Jako kiše i nabujali potoci s planina prijete Jesenicama i okolici najvećim poplavama koje su zabilježene za posljednjih 35 godina. Cesta Jesenice–Kranjska Gora zatvorena je za saobraćaj. U turističkom kraju Martuljak ugroženo je naselje s vikend-kućicama, a u Jesenicama je poplavljeno preko 70 stanova. Nabujale vode prijete i nekim pogonima željezare Jesenice.

(Nastavak na 7. str.)

Saobraćaj na moru praktički je potpuno obustavljen. Iz Rijeke je isplovio samo brod »Jugoslavija« s novom smjenom odreda JNA na Sinaju, a izvan luka bilo je tek nekoliko brodova koji su pošli prije novremena.

Istodobno u većem dijelu Evrope pada snijeg, a Italiju su, poslije 14-dnevnih kiša, zahvatile poplave. Zasad, najteže je stradala pokrajina Toskana. U nekim dijelovima SAD vladaju snježne mećave. U Evropi i Americi zabilježeno je već nekoliko desetaka žrtava nevremena.

U većem dijelu Jugoslavije bilo je jučer relativno toplo vrtjeme s mjestimičnim oborinama, kao i južno od Dubrovnika.

(Opširne informacije o nevremenu na 7. strani)

VOZNI RED U SMRT

O brzini kojom autobusi jure našim cestama često govorimo, pa je posve razumljivo da se nakon nekoliko uzastopnih teških nesreća ta tema opet našla u centru pažnje. Tko

Slika 2.1: Isječak iz Večernjeg lista na dan 5. studenoga 1966. (preuzeto iz arhive Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu).

Slika 2.2: Poplava na ulicama Rijeke na dan 1. prosinca 2008. (izvor: internetski portal Jutarnjeg lista).

Druga poplava tj. događaj iz 2008. (slika 2.2) je bio predmet manjeg broja studija – dijelom jer se relativno nedavno dogodio, a dijelom zbog svog slabijeg intenziteta u Veneciji. Osnovne karakteristike ove epizode visokog vodostaja, meteorološke i oceanografske,

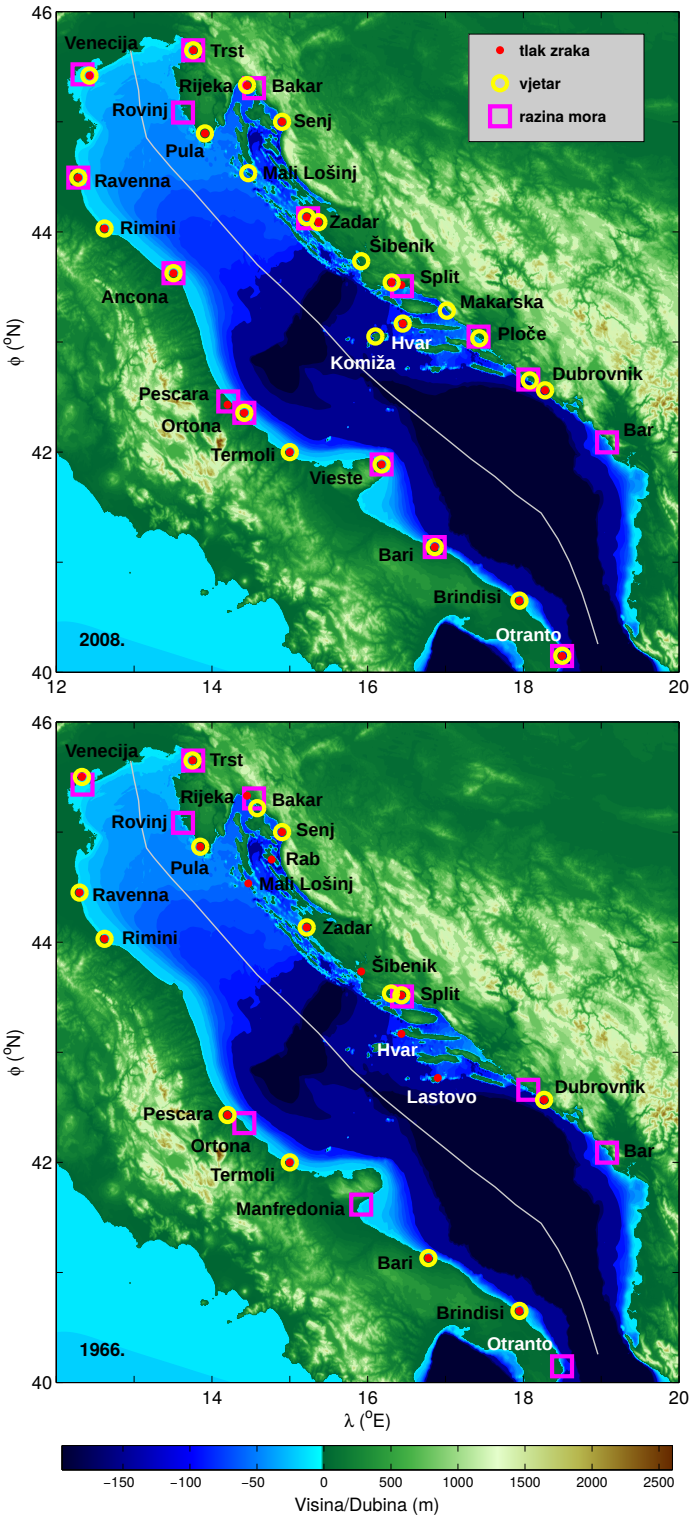
mogu se pronaći u [11], dok [24] analizira sinoptičku pozadinu događaja sa stanovišta mogućnosti determinističkog te vjerojatnosnog prognoziranja.

U ovom poglavlju ćemo, na temelju izdašnog seta mareografskih i meteoroloških podataka registriranih duž cijelog bazena, istražiti poplavu od 1. prosinca 2008. i usporediti je s onom od 4. studenoga 1966. godine, kako bi odredili specifične uvjete koji su doveli do intenzivnog poplavljivanja duž istočne obale Jadrana. Poglavlje 2 je napisano prema objavljenom radu [13].

2.1 Baza podataka

Analiza poplava bazira se na dva četveromjesečna intervala: 1. rujna – 31. prosinca 1966. i 1. listopada 2008. – 31. siječnja 2009. Korišteni su tlak zraka, vjetar i razina mora izmjereni na postajama duž cijele obalne linije (slika 2.3). Većina podataka bila je dostupna s vremenskom rezolucijom od 1 h dok su neki meteorološki podaci bili dostupni samo s većim vremenskim korakom (3 ili 6 h). Nizovi su prvo testirani filtrom Tukey 53H [30] kako bi se detektirale eventualne stršeće vrijednosti (engl. *outliers*) koje su onda linearno interpolirane. Moguće 'divlje' točke u vrijeme samih poplava nisu korigirane. Nedostajuće vrijednosti u intervalima kraćim od 2 sata linearno su interpolirane unutar niza, a one do 25 sati popunjene su pomoću višestruke regresije podacima sa susjednih postaja. Vrijeme za sve nizove odnosi se na Centralno europsko vrijeme (engl. *Central European Time*, CET). Nizovi vodostaja su neprekidni, osim u Veneciji za 1966. godinu. Vodostaj je sveden na zajednički referentni nivo uklanjanjem četveromjesečnih srednjaka iz opaženih nizova. Za vrijeme poplave iz 1966. vodostaji u Veneciji i Bakru procijenjeni su vizualnim opažanjem jer je vodostaj premašio najviši mogući nivo mjerenja kod oba instrumenta. Visina dosegnutog maksimuma u Veneciji procijenjena je pomoću ostataka ulja na zidovima koje je iscurilo iz potopljenih spremnika [29]. Što se tiče Bakra, razina mora iznad gornjeg praga instrumenta dobivena je opažanjem i to korištenjem mjerne letve ispred postaje (slike A.1 i A.2).

Nizovi meteoroloških mjerenja (slike A.3 – A.6), ograničeni na obalno područje, dopunjeni su poljima tlaka zraka i vjetra iz baze Europskog centra za srednjoročne prognoze vremena (engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), kako



Slika 2.3: Batimetrija Jadrana, lokalna orografija i lokacije mareografskih i meteoroloških postaja čiji podaci su korišteni za analizu poplave iz 2008. (*gore*) i 1966. (*dolje*). Dubine veće od 250 m prikazane su istom bojom. Također je prikazan profil duž bazena korišten na slici 2.9.

bi se dobila slika atmosferskog forsiranja iznad otvorenog mora i šireg područja. Za kraće intervale bliske dvama maksimumima, analizirali smo reanalize ERA-Interim za 2008. i ERA40 za 1966., dostupne s vremenskom rezolucijom od 6 h interpolirane na mrežu $0.25^o \times 0.25^o$ [31], [32]. Poznato je da različite verzije ECMWF-ovog modela iznad Jadrana općenito dobro reproduciraju smjer vjetra ali podcjenjuju amplitudu [33], [34]. Stoga je potrebno modelirani vjetar pomnožiti, ovisno o rezoluciji modela, s koeficijentom u rasponu 1.2 – 1.5 kako bi se dobilo bolje slaganje s opaženim vrijednostima. Ovdje smo koristili koeficijent 1.47 za polja iz ERA-Interim (rezolucije oko 80 km) i 1.56 za ERA40 (rezolucije oko 125 km). Brojevi su dobiveni interpolacijom/ekstrapolacijom vrijednosti dostupnih u literaturi [33], [34]. Treba naglasiti da u ovoj analizi izbor koeficijenta nije presudan jer podatke koristimo za kvalitativnu analizu pozadinskih meteoroloških polja, a ne za numerički izračun osjetljivosti vodostaja na intenzitet vjetra. Kako bi se dokumentiralo djelovanje atmosfere na velikoj prostornoj i vremenskoj skali, analiziran je geopotencijal 500-hPa plohe. Korišteni su podaci duž meridijana 13^oE i 18^oE koji su usrednjeni između 40^oN i 46^oN te izglađeni niskopropusnim filtrom.

2.2 Empirijska analiza

Razina mora istražena je uzimajući u obzir četiri procesa: dugoperiodička (planetarna) komponenta vodostaja, morske mijene, prethodno generirani seš i olujni uspor.

Prvo je određena dugoperiodička komponenta, čije se promjene odvijaju na vremenskim skalama od 10 dana do nekoliko mjeseci, primjenom niskopropusnog digitalnog filtra (uz točku polupropusta na 10 dana). U Veneciji nije bilo moguće odrediti planetarnu komponentu jer je niz prekratak pa je ona preuzeta iz Trsta. Ovo se čini razumnim s obzirom da su dvije postaje prostorno bliske, a prostorna varijabilnost procesa na ovoj vremenskoj skali je mala [10].

Varijabilnost vodostaja uzrokovana morskim mijenama određena je harmonijskom sintezom pomoću alata *T_tide* [35]. U obzir je uzeto sedam harmonijskih konstituenata (K1, O1, P1, K2, S2, M2 i N2) koji se tradicionalno koriste u Jadranu i dominantno određuju signal morskih mijena. Konstante konstituenata, amplituda i faza, preuzete su iz dobro poznate literature [8], [36], [37] i [38]. Za postaje Bari i Pescara nisu bili

dostupni traženi podaci u literaturi pa su stoga izračunati pomoću harmonijske analize mjerenih nizova, iako je za ovu metodu potreban dulji niz[1]. Morske mijene su određene na mjerenim nizovima iz kojih je prethodno uklonjena planetarna komponenta vodostaja.

Osnovni mod jadranskog seša može se procijeniti primjenom prikladnog pojasno propusnog filtra na rezidualni niz. Međutim, filtriranje razmazuje nagli nastup seša te onda nije moguće razlučiti novonastali seš od onog pobuđenog kratko prije glavnog događaja. Druga mogućnost je korištenje valićne analize koja je u stanju bolje detektirati nagli nastup oscilacija. Ali, pri tome je potrebno koristiti puno širi pojas vremenskih skala, od 14 do 24 h, koje su dijelom pod utjecajem olujnog uspora. Stoga, kako bi se ocijenio doprinos već postojećeg seša na zabilježeni maksimum, osmišljen je novi pristup. Nizovi rezidualnih vodostaja vizualno su pregledani kako bi se provjerilo postoje li nagli skokovi razine nekoliko dana prije svakog događaja, kako bi se detektirale moguće epizode nastanka seša. Zatim je vremenski razvoj seša aproksimiran funkcijom

$$Z_{ns}(t) = A_{n0} e^{-\frac{t}{\tau}} cos(\frac{2\pi}{T} t), \tag{2.1}$$

gdje n označava pojedinu mareografsku stanicu, T je period oscilacija koji iznosi 21.5 sati, a τ je vrijeme slobodnog gušenja seša procijenjeno na 3.2 dana [7]. Period je odabran kao srednjak niza vrijednosti u rasponu 21 – 22 h dobivenih u različitim studijama. Početna amplituda A_{no} na svakoj mareografskoj postaji procijenjena je skaliranjem magnitude u Trstu [39]. Dakle, prvo je određena visina možebitne nagle promjene vodostaja u Trstu par dana prije poplave (A_{T0}). Zatim su iz rada [39] (slika 3.01 i tablica 7.01) preuzeti omjeri amplituda u Trstu i ostalih postaja (R_n) pomoću kojih su onda izračunate početne amplitude na ostalim postajama ($A_{n0} = A_{T0} R_n$). Još valja napomenuti da su periodi normalnih modova u Jadranu bliski periodima dnevnih i poludnevnih plimnih oscilacija pa je stoga nemoguće izbjeći prelijevanje energije između dva procesa.

Konačno, nakon što su tri procesa određena (planetarna komponenta vodostaja, morske mijene i prethodno pobuđeni seš) i uklonjena iz opaženog vodostaja, varijabilnost vodostaja koja ostaje pripisuje se procesu olujnog uspora (proces na vremenskoj skali od

[1]Klasični skup podataka za određivanje amplitude i faze harmonijskih konstituenata na nekoj lokaciji bio bi niz satnih vodostaja duljine godinu dana. Ovako dugi nizovi potrebni su kako bi se pravilno razdvojili doprinosi konstituenata bliskih frekvencija (P1 i K1 te S2 i K2).

nekoliko sati do nekoliko dana).

Mjerenja tlaka zraka, mjerena na visinama u rasponu 2 – 186 m, svedena su na srednju razinu mora. Za poplavu iz 1966. na talijanskoj obali Jadrana dostupne su samo trosatne (Brindisi, Bari i Rimini) i šesterosatne (Venecija, Trst, Ravenna, Pescara i Termoli) vrijednosti. Vjetar je općenito mjeren na visini 10 m iznad tla. Za događaj iz 1966. dostupni su trosatni podaci za vjetar na zapadnoj i jednosatni na istočnoj obali. Za razliku od tlaka, nizovi vjetra imaju brojne prekide zbog različitih čimbenika (postaje nisu radile, instrumenti onemogućeni jakim vjetrom ili prijenos podataka nije uspio). Dio atmosferskog prinudnog djelovanja u području niskih frekvencija (10 – 100 dana) određen je primjenom niskopropusnog filtra na nizove tlaka zraka i vjetra. Zbog mnogobrojnih prekida u opažanjima vjetra, ovu komponentu nije bilo moguće izračunati na nizu postaja. U skladu s dominantnim smjerovima Jadrana i okolne orografije, vjetar je rastavljen na uzdužnu (longitudinalnu, L) i poprečnu (transverzalnu, T) komponentu usmjerenu prema sjeverozapadu odnosno sjeveroistoku.

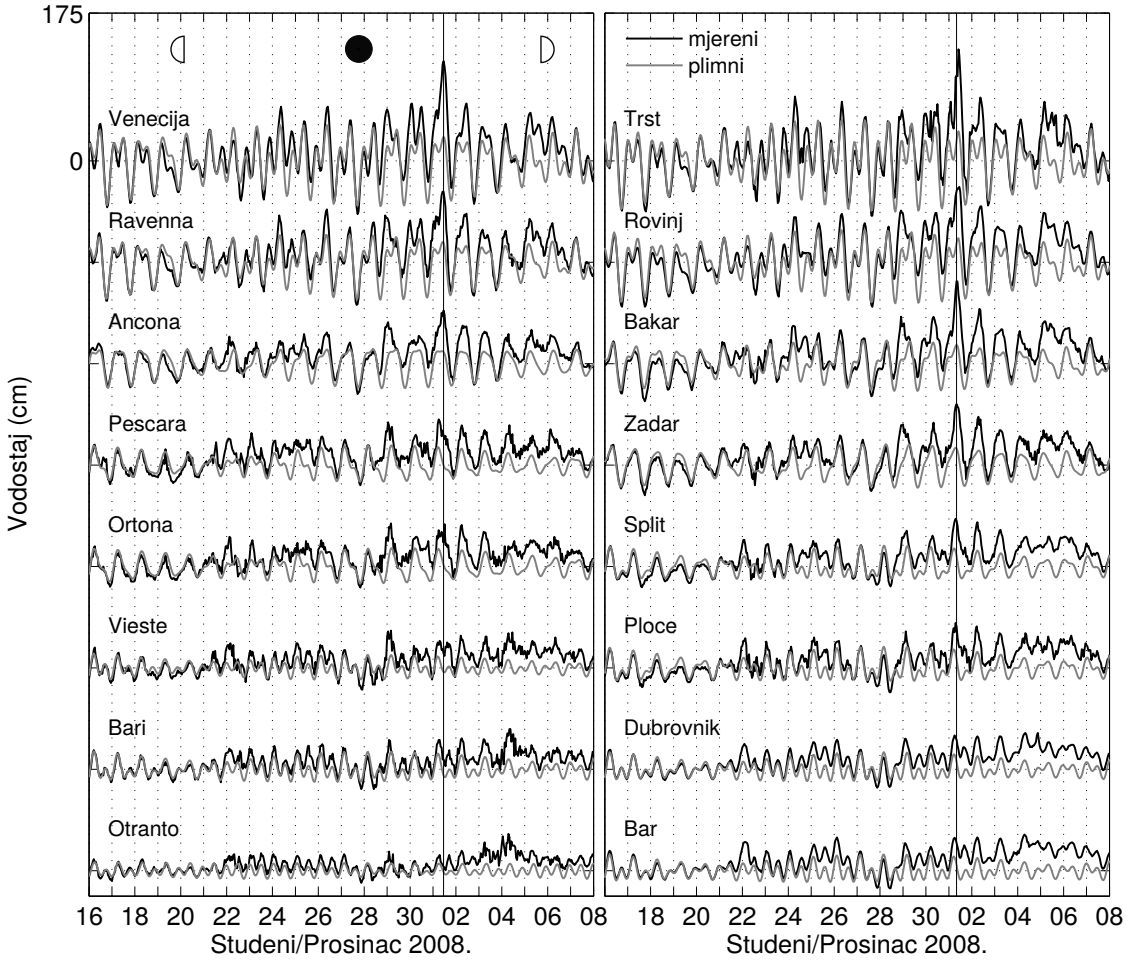
I za kraj, ne zaboravimo da se analiza temelji na nizovima vremenske rezolucije od sat (ili duže), što nam ne dopušta precizno određivanje nastupa poplava. Štoviše, visine stvarnih maksimuma vodostaja mogu se razlikovati od ovdje navedenih vrijednosti, posebice na mjestima jakih lokalnih seša.

2.3 Rezultati

2.3.1 Poplava na dan 1. prosinca 2008.

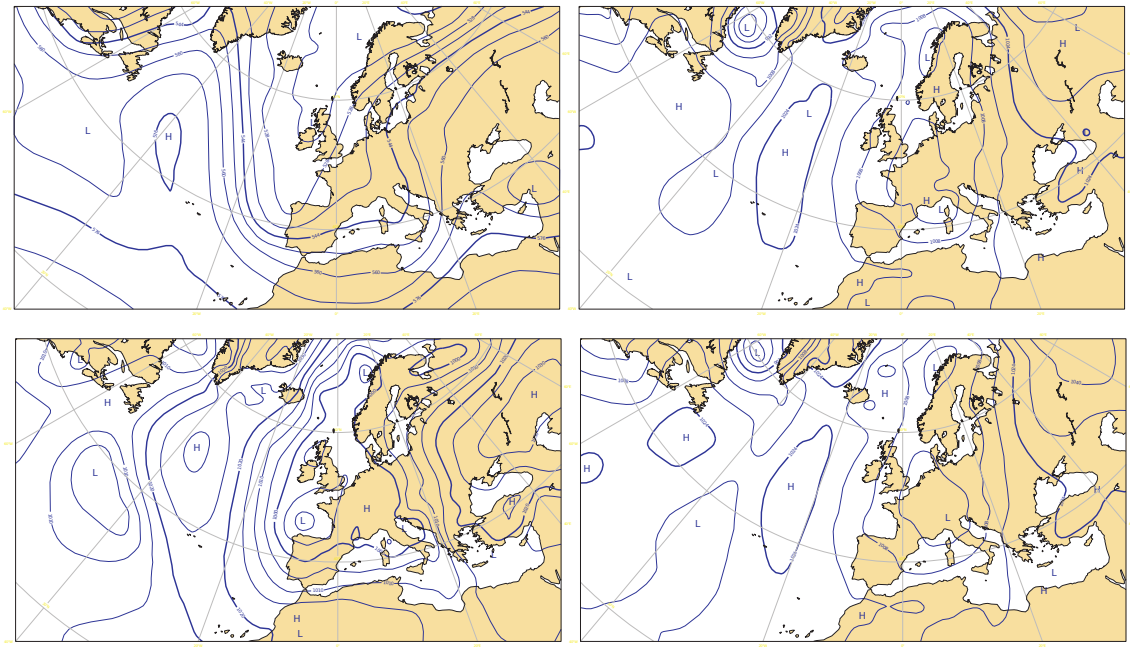
Dana 1. prosinca 2008. pobuđeni su iznimno visoki vodostaji duž većeg dijela Jadrana (slika 2.4). Poplava je bila intenzivnija duž istočne strane bazena gdje je veći dio obale, sjeverno od Splita, bio poplavljen. U Bakru je vodostaj u 08 CET dosegnuo do tada najviši nivo od početka mjerenja na toj lokaciji. Nešto kasnije, vrhunac je nastupio u Trstu (10 CET) i Veneciji (11 CET). S druge strane, zabilježeni maksimum na postaji Rovinj nije bio osobito visok.

U tjednu prije *acqua alta*-e iznad Jadrana je prošlo nekoliko sustava niskog tlaka. Sinoptička situacija odgovorna za ovaj događaj opisana je u [24] i može se sažeti u sljedećih nekoliko rečenica. Dva dana prije poplave, jaka ciklona povezana s dolinom u višoj at-



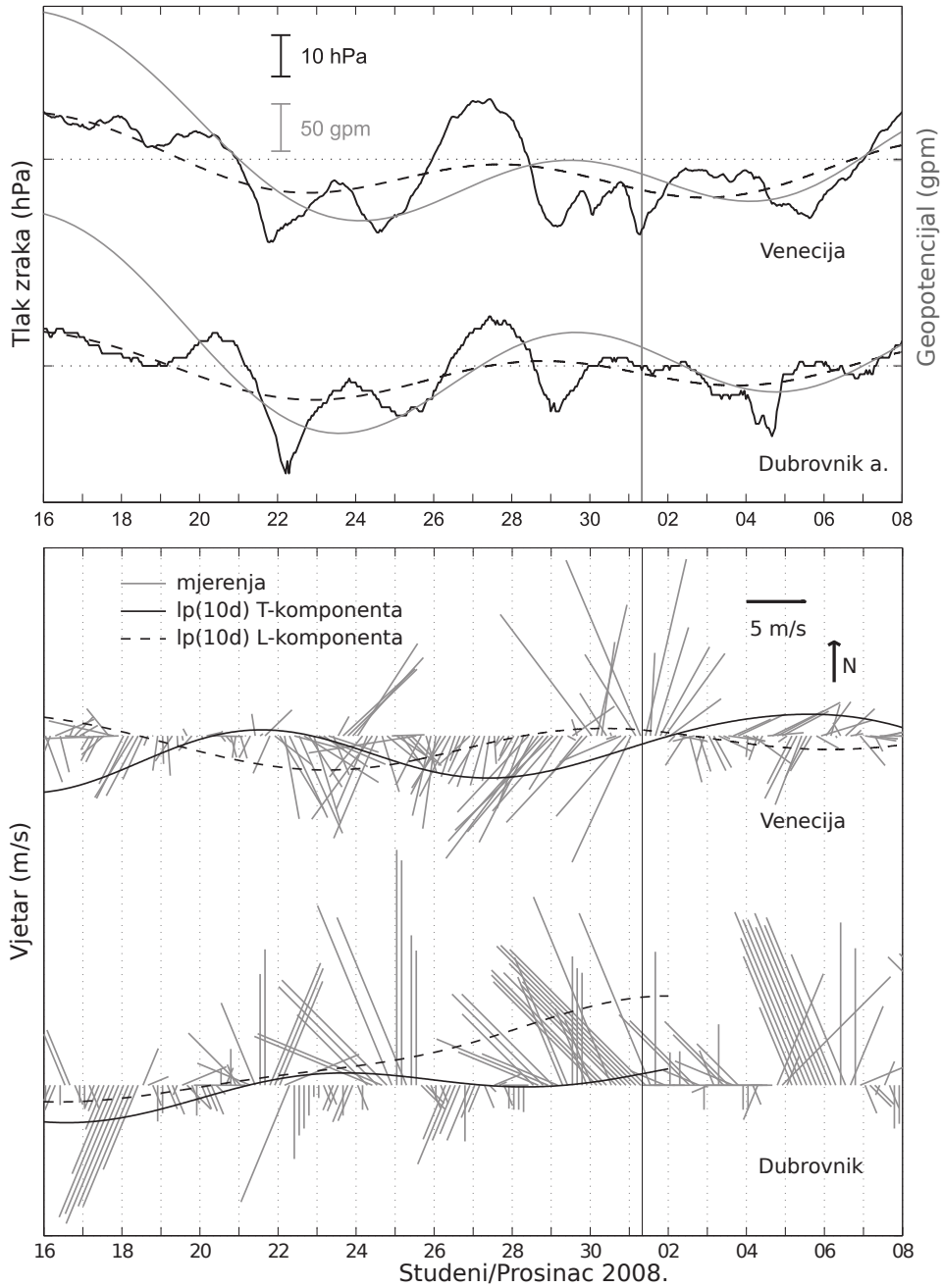
Slika 2.4: Izmjereni vodostaji u odnosu na četveromjesečne srednjake i plimne oscilacije duž zapadne (*lijevo*) i istočne (*desno*) obale za poplavu iz 2008. godine. Vertikalne linije (ovdje i na sljedećim slikama) označavaju vrijeme nastupa maksimuma u Veneciji (*lijevo*) i Bakru (*desno*). Na vrhu su prikazane Mjesečeve faze.

mosferi (slika 2.5, *gore lijevo*) s minimumom iznad zapadne Europe, poduprla je zapadno do jugozapadno strujanje iznad zapadnog dijela Sredozemlja (slika 2.5, *dolje lijevo*). Do 1. prosinca u 01 CET, sekundarna ciklona razvila se iznad Đenovskog zaljeva (slika 2.5, *gore desno*), što je promijenilo strujanje iznad Jadrana u vjetar južnog smjera. Vjetar je iznad Jadrana kulminirao u ranim jutarnjim satima 1. prosinca dok je manji atmosferski sustav putovao prema dolini rijeke Po i preko sjevernog Jadrana gdje je nestao u poslijepodnevnim satima (slika 2.5, *dolje desno*). Naši podaci pokazuju da je, dok je bila aktivna, ciklona poduprla snažan gradijent tlaka duž Jadrana (slike 2.6 i A.3). Tijekom 24 sata prije samog maksimuma, sve obalne postaje zabilježile su jugo nejednolikog in-

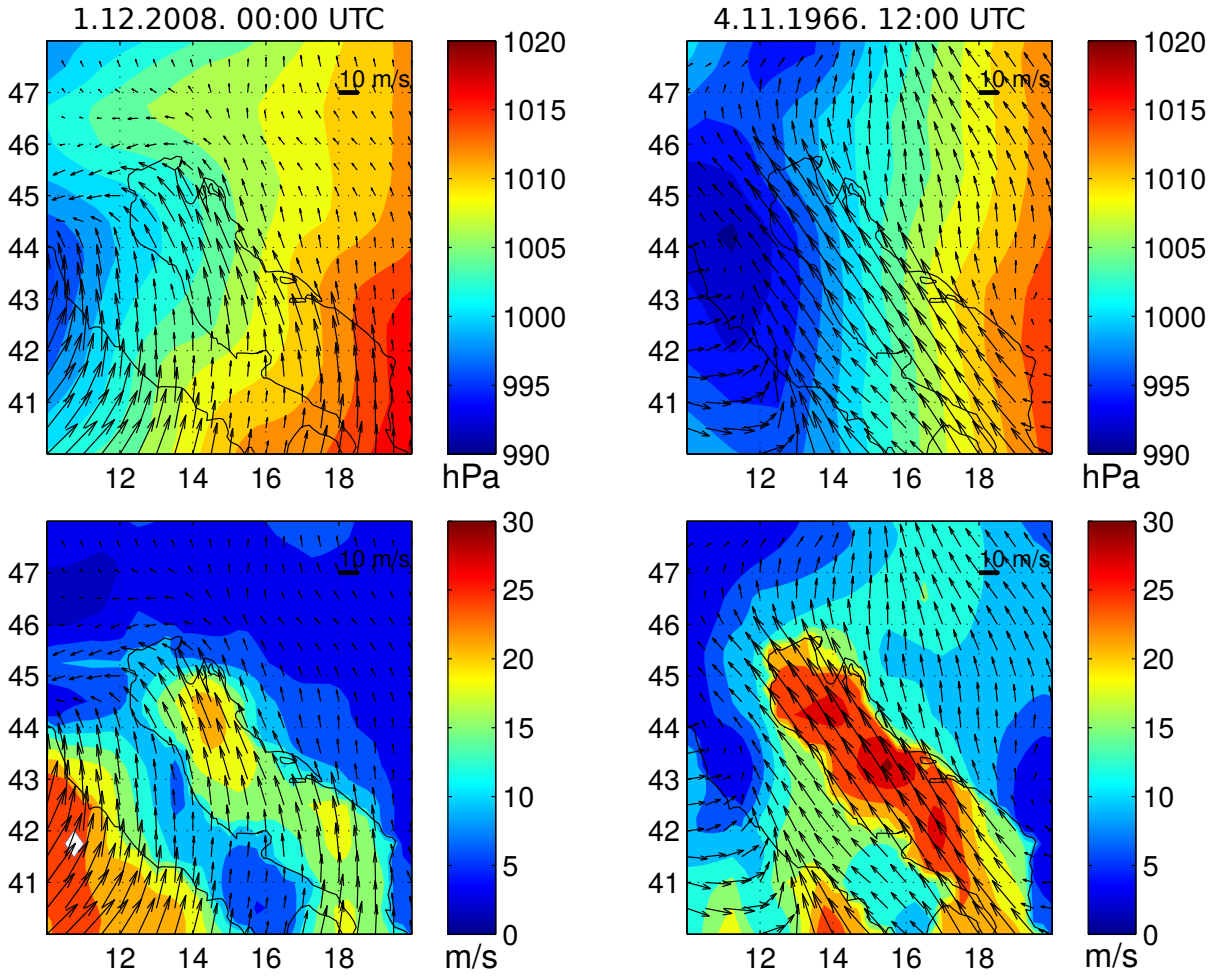


Slika 2.5: Meteorološka polja preuzeta iz ERA-Interim baze. *Lijevo*: geopotencijal 500-hPa plohe (*gore*), tlak zraka na srednjoj razini mora (*dolje*), oboje na dan 29. studenoga 2008. u 00:00 UTC tj. dva dana prije poplave. *Desno*: prizemni tlak zraka na dan 1. prosinca 2008. u 00:00 UTC (*gore*) i u 06:00 UTC (*dolje*).

tenziteta (slike 2.6 i A.4) – vjetar je općenito bio jači na istočnoj u odnosu na zapadnu obalu te nad južnim dijelom Jadrana. Na postaji Venecija zabilježen je promjenjiv vjetar od sjeverca do jakog juga. Tlak zraka i polje vjetra iznad bazena, dobiveni iz reanalize ERA-Interim, prikazani su na slici 2.7. Na dan 1. prosinca 2008. vremenska situacija iznad Jadrana okarakterizirana je gradijentom tlaka zraka orijentiranim uzduž glavne osi bazena i prostorno varijabilnim vjetrom. Polje vjetra je južnog smjera uz talijansku obalu te u najjužnijem dijelu Jadrana, a na sjeveru prelazi u jugoistočni smjer. Maksimalne brzine vjetra javljaju se bliže istočnoj obali. Ako usporedimo reanalizu s mjerenjima, vidimo da modelirana polja daju veće brzine iznad sjevernog dijela bazena dok su opažene vrijednosti veće u južnom Jadranu. Reanaliza dobro reproducira mjerenja u tome da je polje vjetra prostorno varijabilno s većim brzinama duž istočne obale. Uvjeti za poplavljivanje počeli su se razvijati više od tjedan dana prije glavnog događaja. Tada je vodostaj počeo polako rasti (slika 2.8, *sredina*) pod djelovanjem atmosferskog poremećaja koji je podržavao stalni pad tlaka i jačanje jugoistočnog vjetra (slika 2.6, crtkane krivulje). Poremećaj je pobuđen prolaskom planetarnih valova u srednjoj atmosferi koji se jasno vide iz krivulja geopo-

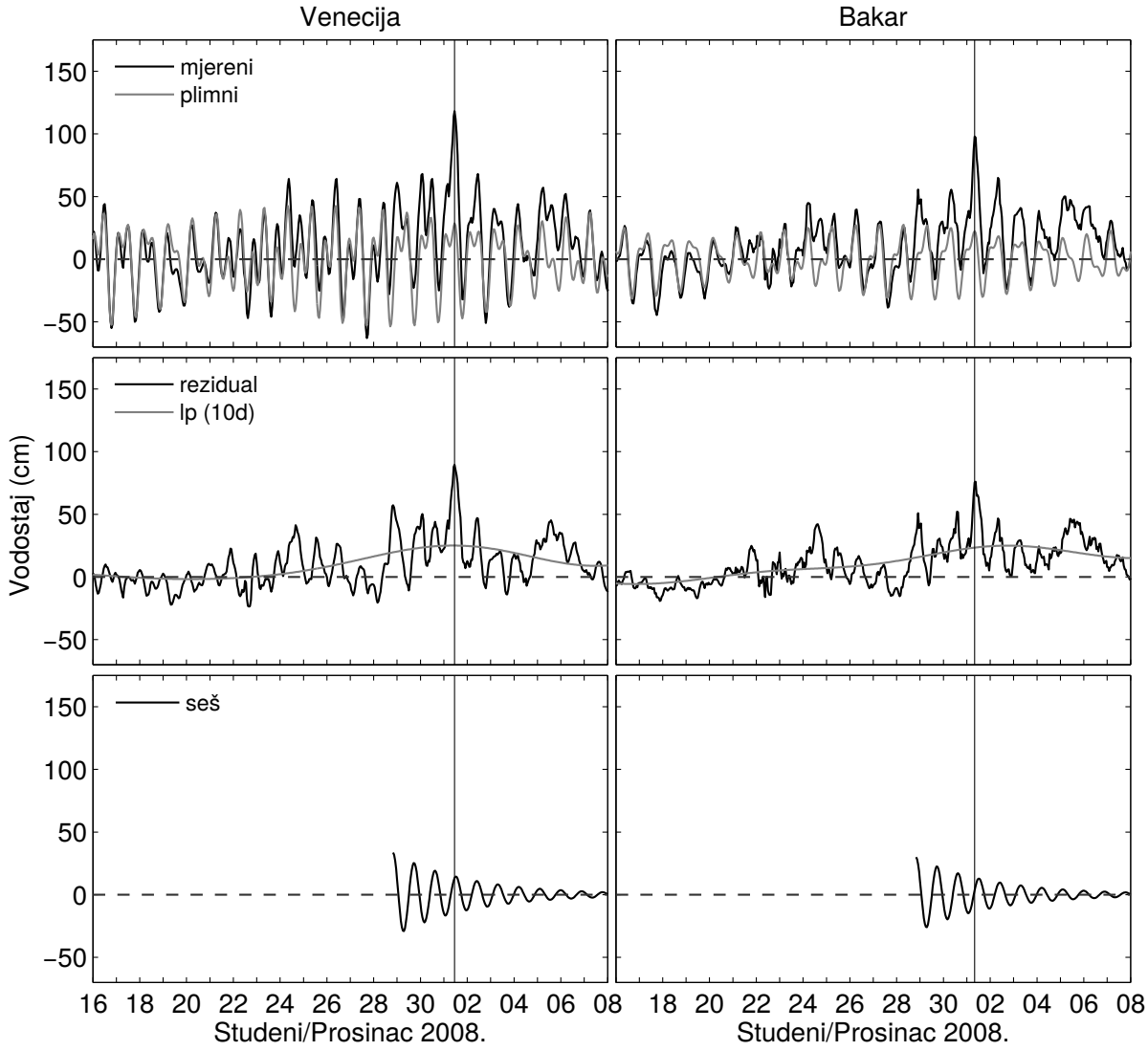


Slika 2.6: *Gore*: mjereni niz tlaka zraka (puna crna) i planetarna komponenta (crtkana crna) na postajama Venecija i aerodrom Dubrovnik za poplavu iz 2008.; podaci su prikazani u odnosu na referentnu vrijednost od 1013 hPa i nacrtani s proizvoljnim posmakom. Također su prikazane izglađene (niskopropusnim filtrom uz točku polupropusta na 10 dana) geopotencijalne visine 500-hPa plohe (siva) uzduž meridijana 13° E (za Veneciju) i 18° E (za Dubrovnik); podaci su prikazani u odnosu na referentni geopotencijal od 5500 gpm i nacrtani s proizvoljnim posmakom. *Dolje*: podaci o vjetru za poplavu iz 2008. – mjerene satne brzine na postaji Venecija i Dubrovnik te komponente vjetra filtrirane niskopropusnim filtrom (lp(10d)). Radi jasnoće prikazan je svaki treći vektor. Dijelovi planetarne komponente nedostaju zbog nedostatka mjerenih podataka. Vertikalna linija označava nastup maksimuma vodostaja u Bakru, a maksimum u Veneciji nastupio je 3 sata kasnije.



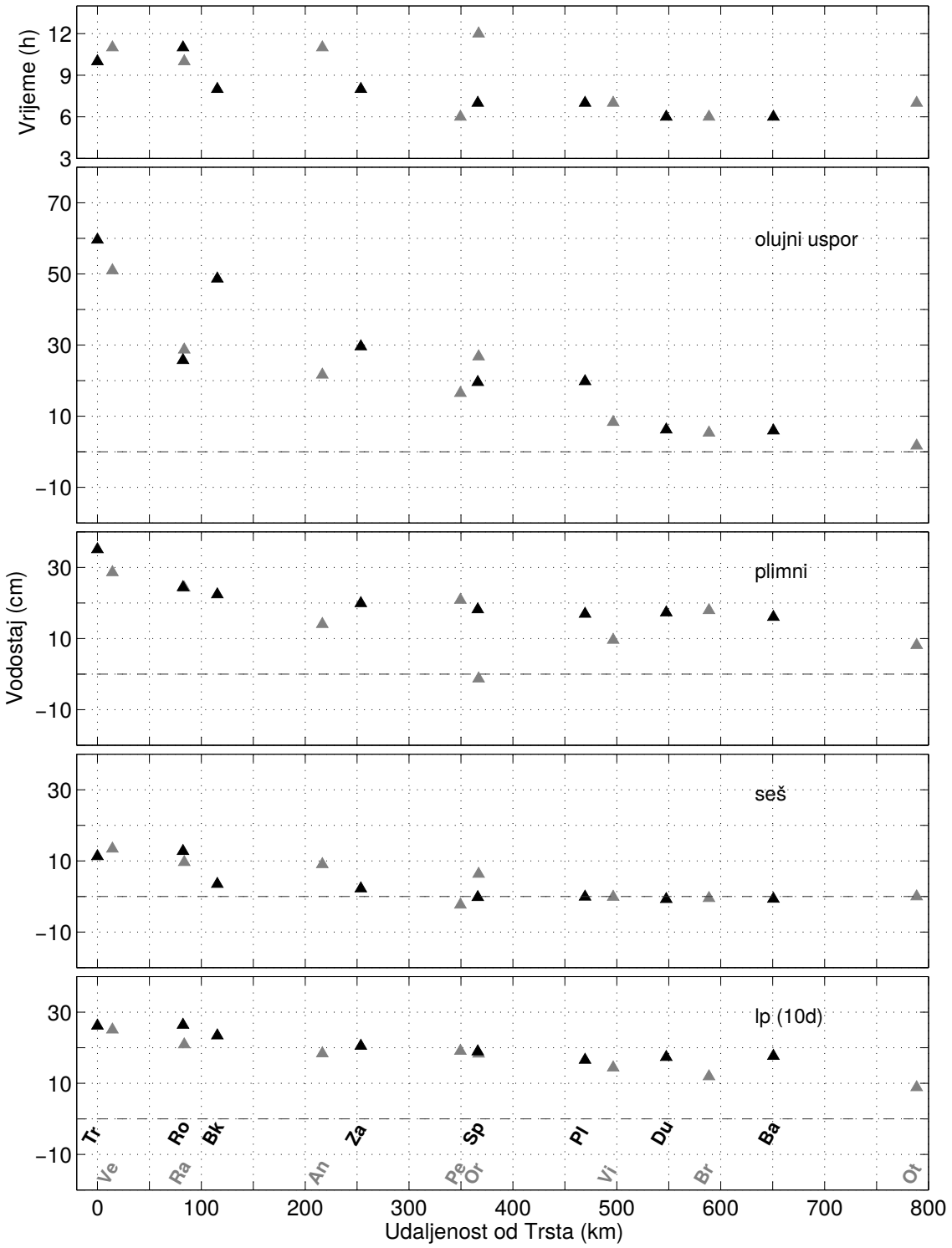
Slika 2.7: Tlak zraka (*gore*) i kalibrirano polje vjetra (*dolje*) iz baze ERA-Interim. Slika prikazuje atmosferske uvjete kratko prije nastupa maksimuma vodostaja tj. sedam sati prije maksimuma 1. prosinca 2008. u Bakru (*lijevo*), odnosno pet sati prije maksimuma 4. studenoga 1966. u Veneciji (*desno*).

tencijala 500-hPa plohe (slika 2.6, *gore*). Uslijed prolaska niza sinoptičkih poremećaja prije poplave, u bazenu su pobuđeni stojni valovi. Val generiran u noći 28./29. studenoga (slika 2.8, *sredina*) još je bio aktivan kada je iznad Jadrana naišla presudna fronta u jutro 1. prosinca. Tlak zraka u Rijeci pao je na minimum oko 08 CET, kratko prije dolaska dnevnog maksimuma plimnih oscilacija u Bakru i u trenutku pozitivne faze prethodno generiranog seša. Nastup maksimuma vodostaja na sjevernim postajama koincidirao je s maksimumom plimnih oscilacija (slika 2.4). U to vrijeme, Mjesec je bio u fazi između mladog Mjeseca i prve četvrti što znači da su morske mijene bile između poludnevnog i dnevnog tipa. Stoga je moguće da je propagacija poludnevne komponente M2 uzrokovala kašnjenje maksimuma duž obale (od Bakra prema Veneciji). Što se tiče maksimuma u



Slika 2.8: Nizovi razine mora za poplavu iz 2008. u Veneciji (*lijevo*) i Bakru (*desno*): opaženi vodostaj i pripadne plimne oscilacije (*gore*), rezidualni vodostaj i dugoperiodička komponenta (lp (10d)) razine mora (*sredina*), prvi mod prethodno pobuđenog jadranskog seša (*dolje*).

Rovinju, nastupio je pri kraju plime i pozitivne faze seša. Generirani olujni uspor bio je prilično visok (slika 2.9), a jako je zanimljiva činjenica da je bio neznatno viši u Veneciji, smještenoj u zatvorenom plitkom dijelu mora, nego u Bakru gdje su dubine znatno veće. Vjetar je uspostavio nagib morske površine duž bazena i slabiji nagib u poprečnom smjeru, s nešto višim razinama na istočnoj obali sjevernog Jadrana. Ovo je evidentno iz slike 2.9 gdje su analizirani doprinosi svih prethodno spomenutih procesa. Iz slike je vidljivo da se pod djelovanjem tlaka zraka i vjetra, voda uglavnom akumulirala u Tršćanskom zaljevu,



Slika 2.9: Doprinosi četiri komponente vodostaja u vrijeme nastupa lokalnog maksimuma za poplavu na dan 1. prosinca 2008. Istočne postaje označene su crnim trokutićima, a zapadne sivim: Trst (Tr), Rovinj (Ro), Bakar (Bk), Zadar (Za), Split (Sp), Ploče (Pl), Dubrovnik (Du), Bar (Ba), Venecija (Ve), Ravenna (Ra), Ancona (An), Pescara (Pe), Ortona (Or), Vieste (Vi), Bari (Br), i Otranto (Ot). Apscisa označava udaljenost postaje od Trsta kada se postaja projicira na profil označen na slici 2.3. Termini nastupa maksimuma naznačeni su na gornjem grafu; ordinata se odnosi na interval 03 – 14 h na dan 1. prosinca 2008.

a iznenađujuće slabo ispred Rovinja. Međutim, ovakvo ponašanje je u skladu s razdiobom vodostaja dobivenom numeričkim simulacijama poplava kod kojih dolazi do jačeg poplavljivanja istočne obale što će biti prikazano u sljedećem poglavlju.

Olujni uspor je, što je bilo za očekivati, bio odlučujući proces u poplavljivanju dok su ostali procesi doprinijeli njegovom intenzitetu. Na mnogim lokacijama olujni uspor je doprinio dva puta više od plimnih oscilacija, dok je planetarna komponenta bila usporedivog iznosa s doprinosom morskih mijena. Seš pobuđen nekoliko dana ranije nije bio snažan pa nije imao posebnu ulogu u poplavljivanju sjevernog Jadrana. Štoviše, u Bakru je bio blago pozitivan, a u Veneciji i Rovinju doprinio je ukupnom vodostaju oko 13 cm (slika 2.9). Možemo zaključiti da je do poplave na dan 1. prosinca 2008. došlo zbog pozitivnog odnosa relativnih faza uključenih procesa: visokog olujnog uspora, plime i prethodno generiranog seša koji su se superponirali na dugotrajno povišeni vodostaj od oko 20 cm. Međutim, prostorna struktura olujnog uspora (nagib morske površine prema istoku) rezultirala je poplavljivanjem većeg dijela istočne obale Jadrana, što se rijetko događa. Kako bismo identificirali sve uvjete ovakvog poplavljivanja, usporedit ćemo ovaj događaj s dobro istraženom poplavom koja se zbila 4. studenoga 1966. Usredotočit ćemo se na prostornu strukturu dvaju olujnih uspora i na razlike u pripadnim meteorološkim pozadinama.

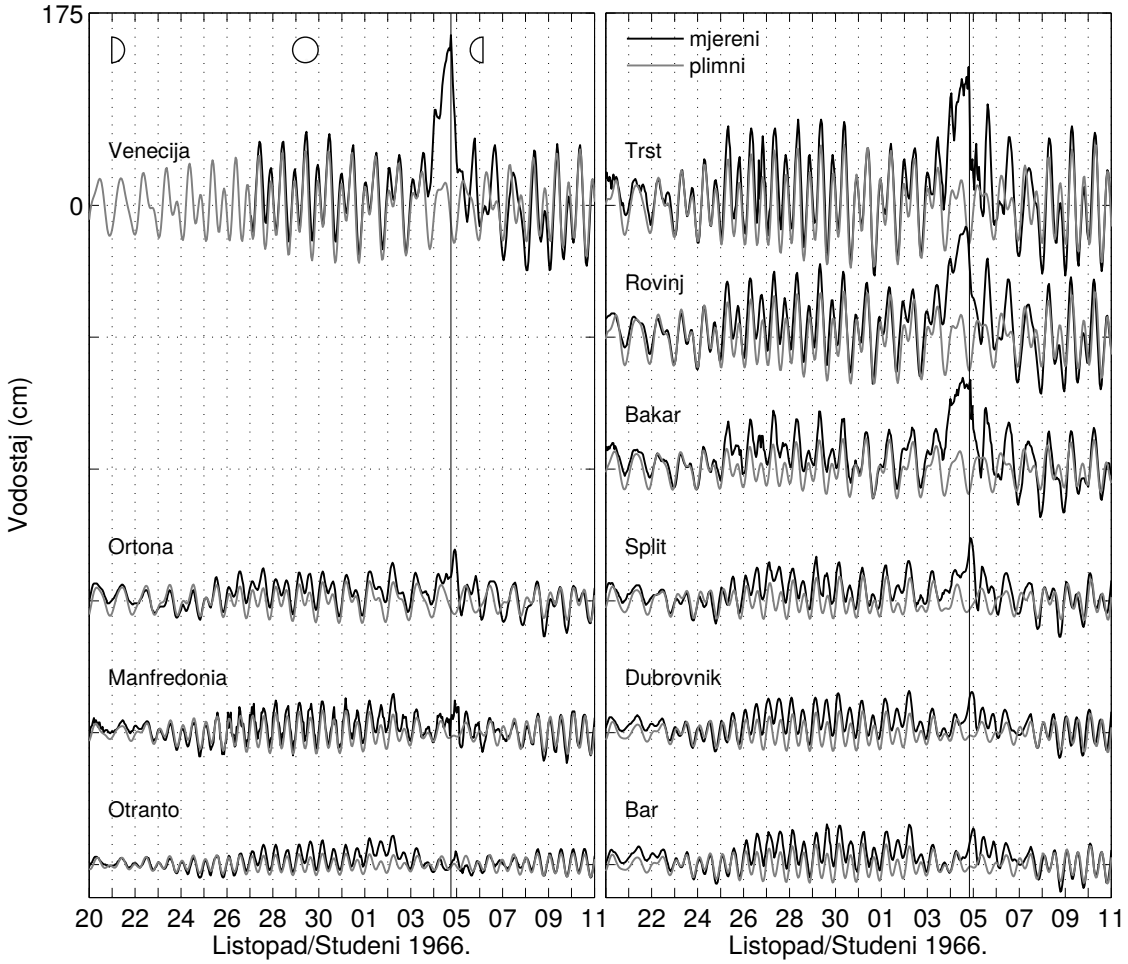
2.3.2 Poplava na dan 4. studenoga 1966.

Ovaj događaj često se u literaturi spominje kao poplava stoljeća. Tom prilikom je vodostaj u Veneciji dosegnuo najviši nivo ikada zabilježen na toj postaji, a iznosio je skoro 2 m iznad tadašnje srednje razine mora. Štoviše, ovaj događaj je bio 30 cm viši od drugog najvišeg vodostaja zabilježenog na postaji. Inače, Venecija je jedna od najstarijih mareografskih postaja u Jadranu, osnovana 1871. Starija je jedino postaja u Trstu, postavljena 1859. godine [40]. Ovaj događaj nije bio pretjerano izražen duž istočne obale. U Trstu je to tek sedma najjača poplava, četvrta u Rovinju i deveta u Bakru. Sinoptička pozadina događaja je već opsežno istraživana i opisana u literaturi [24], [28], [29], [41]. Poplavu je pobudila ciklona koja se dva dana prije formirala iznad Španjolske, a ujutro 3. studenoga stigla je iznad Đenovskog zaljeva. Istodobno, anticiklona iznad Balkanskog poluotoka jača što dovodi do jakog zonalnog gradijenta tlaka i perzistentnog vjetra južnog

smjera. Vjetar iznad Jadrana, kanaliziran okolnim planinskim lancima, dodatno jača te se usmjerava duž bazena. Dana 4. studenoga, ciklona se brzo produbljuje te kreće na sjever preko sjeverne Italije do Jadrana (dokumentirano na sinoptičkim kartama kod [41], njihova slika 1). Naši podaci pokazuju da je u 13 CET razlika u tlaku između Riminija i Dubrovnika iznosila 13 hPa (slika A.5). Obalne postaje u sjevernom Jadranu izmjerile su maksimalnu brzinu od 19 m/s u 16 CET (slika A.6), a vjetar malo dalje od obale postizao je brzinu od 28 m/s [24]. Dalje na jug, opaženi obalni vjetar u srednjem Jadranu usporedivih je amplituda i neznatno je jači na istočnoj strani. Ovo sugerira da je nekoliko sati prije vrhunca vodostaja polje vjetra iznad bazena bilo uniformno. Prema atmosferskim poljima ERA40 (slika 2.7, *desno*), sinoptička slika 4. studenoga 1966. odlikovala se jakim gradijentom tlaka u smjeru zapad-istok te homogenim poljem jugoistočnog vjetra iznad cijelog Jadrana. Treba spomenuti da se polja vjetra iz reanalize dobro slažu s opažanjima, pogotovo što se tiče smjera vjetra.

Acqua alta nastupila je navečer (slika 2.10) kada je tlak iznad sjevernog Jadrana pao na minimum, a fronta prošla velikom brzinom iznad bazena. Poplava bi bila sigurno jača i destruktivnija da u trenutku maksimuma plimne oscilacije nisu dosezale dnevni minimum. U Veneciji, morske mijene su ublažile poplavu za 16 cm, a u Trstu za više od 30 cm. S druge strane, u Bakru je maksimum vodostaja nastupio dva puta tog dana: prvo u 13 CET dok se olujni uspor još uvijek uspostavljao, a plima dosegnula vrhunac, i opet navečer u vrijeme prolaska fronte. Nadalje, olujni uspor na dan 4. studenoga 1966. bio je izolirani događaj i nisu mu prethodile oscilacije stojnih valova [28]; naši mareografski i meteorološki podaci nisu pružili dokaze da zaključimo suprotno.

Za kraj, možemo zaključiti da je poplava 4. studenoga 1966. bila rezultat dominantno olujnog uspora. Brzo i prostorno homogeno jugo puhalo je neprekidno više od jednog dana, potiskujući vodu u zatvoreni kraj bazena, pri čemu je uzrokovalo veliki uspor na sjevernojadranskom šelfu. U međuvremenu, niski tlak, pogotovo uz zapadnu obalu, doprinio je uzdizanju morske površine. Zanimljivo je primijetiti da je rezidualni vodostaj u Veneciji bio čak 36 cm viši u odnosu na onaj u Trstu, što sugerira uzdizanje morske površine prema zapadnoj obali. Što se tiče dugoperiodičke komponente vodostaja, ona je u sjevernom Jadranu iznosila 23 – 30 cm, međutim tijekom ove epizode nije utvrđena njena izravna veza s planetarnim atmosferskim valovima. Naime, dugoperiodičke pro-



Slika 2.10: Izmjereni vodostaji u odnosu na četveromjesečne srednjake i plimne oscilacije duž zapadne (*lijevo*) i istočne (*desno*) obale za poplavu iz 1966. godine. Vertikalne linije označavaju vrijeme nastupa maksimuma u Veneciji (*lijevo*) i Bakru (*desno*). Na vrhu su prikazane Mjesečeve faze.

mjene (perioda od 10 do 100 dana) prizemnog tlaka zraka nisu vjerno pratile promjene geopotencijala 500-hPa plohe (nije prikazano). Stoga ne možemo zaključiti da je ovdje dugoperiodička komponenta vodostaja generirana isključivo prolaskom atmosferskih planetarnih valova.

2.4 Diskusija

Zašto je poplava 1. prosinca 2008. imala takav izuzetan utjecaj na istočnu obalu, a nije na Veneciju, dok je poplava 4. studenoga 1966. bila devastirajuća u Veneciji, a istovremeno

blažeg intenziteta na suprotnoj obali? Podaci prikupljeni na obje obale Jadrana pokazuju da je 1966. formiran olujni uspor s izraženim poprečnim gradijentom, s vodostajem znatno višim uz zapadnu obalu sjevernog Jadrana. S druge strane, tijekom događaja iz 2008. olujni uspor formiran je sa slabijim gradijentom u poprečnom smjeru, s razinama nešto višim na istočnoj obali.

Dvije epizode generirane su različitim meteorološkim procesima. Kako bismo ilustrirali razlike, atmosfersko forsiranje prikazat ćemo pomoću ravnotežne denivelacije ζ_e. Njeno značenje će postati očito kada standardne jednadžbe olujnog uspora (npr. [42]) napišemo u ponešto drugačijem obliku:

$$\frac{d\vec{c}}{dt} - f\vec{c} \times \vec{k} = -g\vec{\nabla}(\zeta - \zeta_e) - \frac{\vec{\tau_b}}{D\rho} + \vec{\lambda}, \tag{2.2}$$

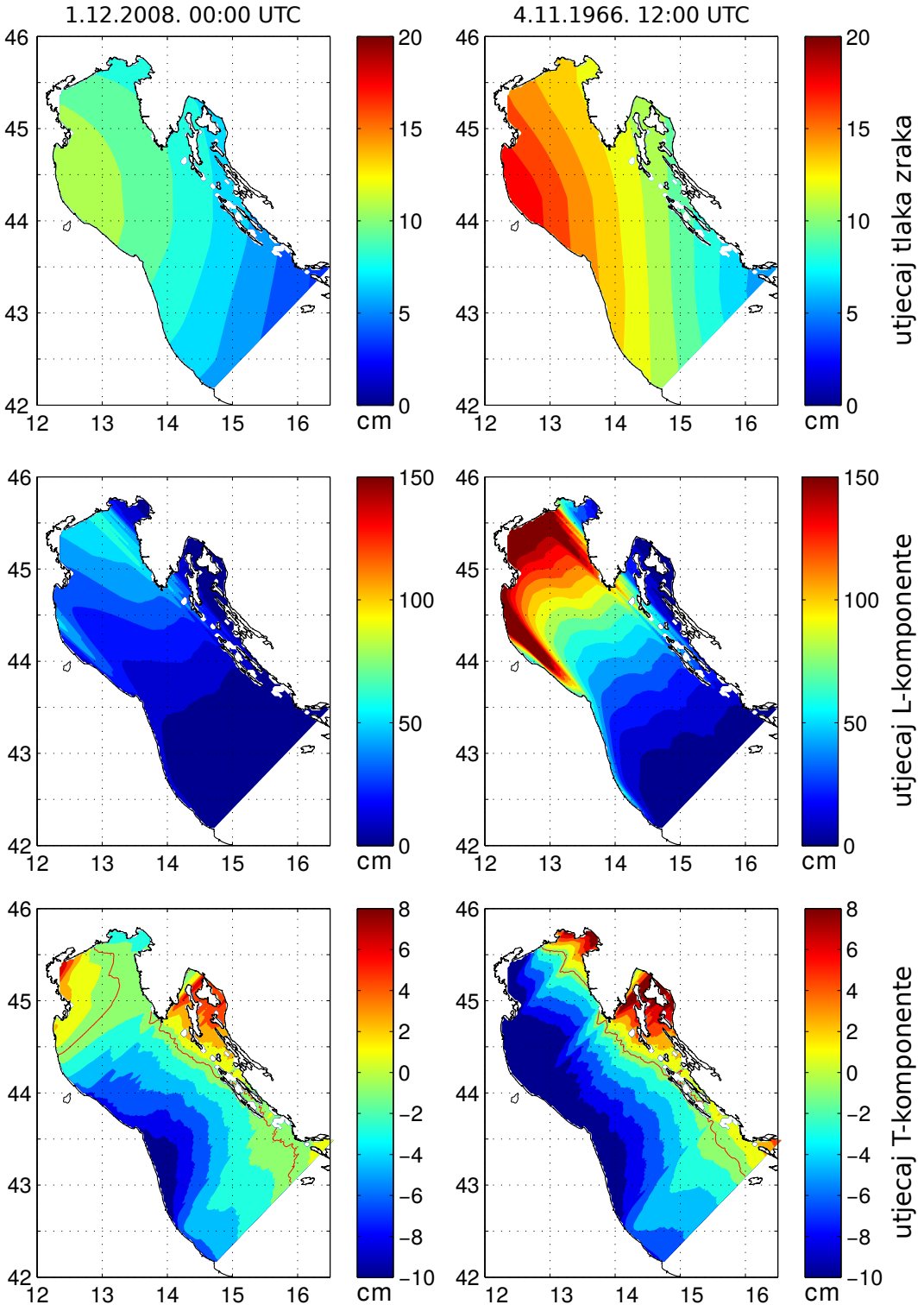
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{\nabla}(D\vec{c}) = 0, \tag{2.3}$$

gdje je ζ denivelacija, $\vec{c}$ vertikalno usrednjena brzina, $\vec{k}$ jedinični vektor usmjeren vertikalno prema gore, f Coriolisov parametar, g ubrzanje sile teže, D dubina bazena, ρ gustoća mora, $\vec{\tau_b}$ pridneno, a $\vec{\lambda}$ lateralno trenje. Ravnotežna denivelacija je zadana kao:

$$\vec{\nabla}\zeta_e = -\frac{\vec{\nabla}p_a}{g\rho} + \frac{\vec{\tau_s}}{gD\rho}, \tag{2.4}$$

gdje p_a označava prizemni tlak zraka a $\vec{\tau_s}$ napetost vjetra. Ako napetost vjetra rastavimo na uzdužnu i poprečnu komponentu, onda razmatramo tri doprinosa ravnotežnoj denivelaciji.

Kako bi se ispitao ravnotežni odziv razine mora na prostornu raspodjelu tlaka zraka, razmotrit ćemo ravnotežu između lijeve strane i prvog člana s desne strane jednadžbe 2.4. Jednadžbu smo numerički integrirali koristeći $g = 9.81$ m/s^2 i $\rho = 1029$ kg/m^3. Također, pretpostavili smo da se pozitivna i negativna odstupanja tlaka od prosjeka izjednačavaju iznad područja integracije te da je prosječni tlak 1013 hPa. Rezultat je prikazan na slici 2.11. Očito, tlak zraka je uzrokovao različitu distribuciju ravnotežne denivelacije u 1966. i 2008., s rasponom puno širim u 1966. U oba slučaja, ravnotežne razine bile su više duž zapadne obale te niti u jednoj godini doprinos tlaka ravnotežnoj razini nije prešao 10 – 20 cm.



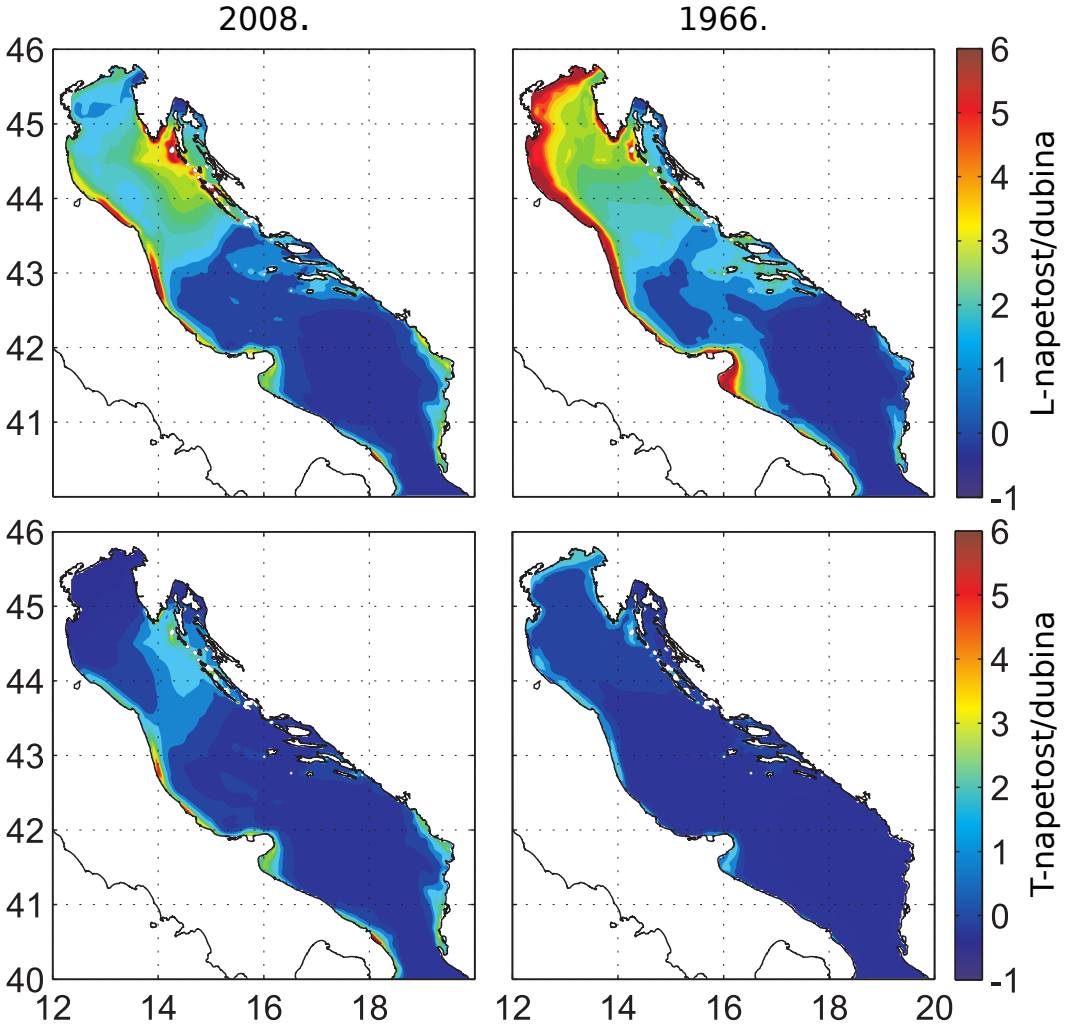
Slika 2.11: Atmosfersko prinudno djelovanje prikazano kao ravnotežni odziv razine (cm) za poplavu 1. prosinca 2008. (*lijevo*) i 4. studenoga 1966. (*desno*): utjecaj tlaka zraka (*gore*), uzdužne komponente vjetra (*sredina*) i poprečne komponente vjetra (*dolje*). Meteorološka polja (ERA-Interim) iz kojih su izračunate ravnotežne denivelacije prikazana su na slici 2.7.

S ciljem da se mapira ravnotežni odziv na vjetar, koristimo ravnotežu između lijeve strane i drugog člana desne strane jednadžbe 2.4. Napetost vjetra izračunata je pomoću jednadžbe

$$\vec{\tau_s} = C_D \rho_a |\vec{w}| \vec{w}, \tag{2.5}$$

gdje je $\vec{w}$ brzina vjetra, ρ_a gustoća zraka (1 kg/m^3) i C_D bezdimenzionalni koeficijent potezanja procijenjen kao funkcija brzine vjetra prema [43]. Ravnotežni odziv je izračunat uzimajući u obzir jadransku batimetriju i integrirajući uzduž i poprijeko bazena. Integracija u longitudinalnom smjeru započeta je od poprečnog profila u srednjem Jadranu, s proizvoljnom integracijskom konstantom postavljenom na nulu. Integracija u transverzalnom smjeru napravljena je od zapadne do istočne obale, zahtijevajući da integral ravnotežne denivelacije duž svakog transekta bude nula. Rezultati su također prikazani na slici 2.11, a ilustriraju združeni efekt napetosti vjetra i varijabilne topografije. Rezultati otkrivaju da je uzdužni vjetar podržao razdiobu ravnotežnog odziva značajno različitog oblika i intenziteta u dva promatrana slučaja (slika 2.11, *sredina*). Nagib uspostavljen duž bazena u 1966. bio je strmiji nego u 2008. zbog općenito većih brzina vjetra (slika 2.7, *dolje*). Međutim, najzanimljivija značajka nagiba je poprečni nagib induciran uzdužnim vjetrom. U 1966. godini prostorno ujednačeni longitudinalni vjetar, zbog efekta nagiba dna, naginje ravnotežnu razinu poprijeko bazena rezultirajući povišenjem uz plitku zapadnu obalu. U 2008. godini smicanje vjetra, s bržim vjetrom koji puše uzduž istočne obale, nadilazi utjecaj batimetrije te uzrokuje suprotan nagib razine mora tj. povišenje ravnotežnog vodostaja u blizini istočne obale. Poprečni nagib morske površine induciran poprečnim vjetrom (slika 2.11, *dolje*) je dosta nizak zbog relativno malih brzina poprečnog vjetra i kratkog privjetrišta. Osim toga, bio je usporedivih visina u 2008. i 1966., osim u najsjevernijem dijelu bazena. Zbog toga je poprečni vjetar bio od sekundarnog značenja u poplavljivanju istočne obale 2008. te nije imao bitnu ulogu u razlici između dviju epizoda.

Za očekivati je da se stvarna prostorna struktura razine tijekom poplava 2008. i 1966. razlikovala od ovdje prikazane ravnotežne jer je stvarni odziv razine rezultat dinamičke prilagodbe na atmosfersko forsiranje. U slučaju utjecaja tlaka zraka, odziv razine vjerojatno nije bitno odstupao od odziva inverznog barometra, jer je poremećaj bio veće skale (slika 2.11) i sporo se mijenjao. Naime, ako uzmemo u obzir brzinu dvaju poremećaja U procijenjenu na maksimalnih 15 m/s te srednju dubinu jadranskog šelfa $D = 100$ m, onda



Slika 2.12: Uzdužna (*gore*) i poprečna (*dolje*) napetost vjetra podijeljena s dubinom bazena i normalizirana srednjim vrijednostima napetosti iznad bazena (10^{-2} m^{-1}) na dan 1. prosinca 2008. (*lijevo*) i 4. studenoga 1966. (*desno*). Vrijednosti su izračunate iz polja vjetra ERA-Interim, prikazanih na slici 2.7.

je omjer $\frac{U^2}{gD} << 1$ [44]. Iz toga slijedi da je inercijalni efekt odziva razine na ovaj sinoptički poremećaj zanemariv. Ovakvo ponašanje sjevernog Jadrana poznato je od prije, a razmatrano je u radu [45] koristeći poprečnu spektralnu analizu meteoroloških i mareografskih nizova.

Slučaj utjecaja vjetra je kompliciraniji. Kao što je vidljivo iz slike 2.11 (sredina i dolje), prostorna varijabilnost prinudnog djelovanja je ovdje veća, pa se može pretpostaviti da je stvarni oblik vodostaja, koji je rezultat i inercijalnog efekta te efekta trenja, znatno odstupao od ravnotežnog. Povrh toga, na prilagodbu je najvjerojatnije dodatno utjecala izrazita razvedenost hrvatske obale. Očito je da bi za pravilnu reprodukciju procesa

bilo potrebno primijeniti numerički model velike razlučivosti, što će biti napravljeno u sljedećem poglavlju. Ipak, na temelju empirijske analize ovih dviju izuzetnih poplava možemo zaključiti da je ravnotežni odziv na utjecaj vjetra dominantno doprinio razini mora te da je utjecaj nagiba dna bio odlučujući pri uspostavi poprečnog nagiba u 1966., dok je smicanje uzdužne komponente vjetra odgovorno za uspostavljanje suprotnog nagiba u 2008.

Utjecaj napetosti vjetra iznad varijabilne topografije i relativna važnost uzdužnog i poprečnog vjetra na odziv morske razine mogu se vidjeti iz slike 2.12. Na njoj su prikazani omjeri napetosti vjetra i dubine dna normalizirani srednjim napetostima vjetra iznad bazena. Ovdje je evidentno da je u 1966. godini utjecaj uzdužnog vjetra bio značajno jači duž zapadne obale sjevernog Jadrana, dok se u 2008. godini njegov maksimum očitovao uz istočnu obalu. Kao što je već primijećeno, utjecaj poprečne komponente vjetra bio je manjeg značenja, a 2008. bio je neznatno veći uz istočnu obalu u odnosu na događaj iz 1966.

Poglavlje 3

Iznimni olujni uspori u Jadranu i poprečni nagib morske površine

Često poplavljivanje istočne jadranske obale posljednjih godina potaknulo je naše zanimanje za meteorološke uvjete koji kontroliraju snažniji odziv vodostaja na jednoj od suprotnih obala. Intenzitet poplavljivanja ovisi o iznosima i relativnim fazama svih uključenih procesa, pri čemu olujni uspor čini najveći doprinos te određuje vodostaj i način na koji on utječe na istočnu ili zapadnu obalu. U prethodnom poglavlju uspoređene su dvije jadranske poplave koje su se zbile 4. studenoga 1966. i 1. prosinca 2008. Analiza njihovih meteoroloških pozadina otkriva da je epizoda iz 1966. bila potaknuta uniformnim vjetrom orijentiranim duž glavne osi bazena koji je uzrokovao ekstremno uzdizanje mora duž sjeverozapadne obale. S druge strane, kod polja vjetra odgovornog za događaj iz 2008. bila je izražena transverzalna komponenta vjetra i, što je još važnije, smicanje longitudinalne komponente s većim brzinama u istočnom dijelu bazena. Potonje se pokazalo presudnim za intenzivnije nakupljanje vode duž istočne obale gdje su dubine puno veće nego uz talijansku obalu. Na temelju samo dva događaja ne možemo poopćiti naše zaključke jesu li ove specifične karakteristike polja vjetra odgovorne za veći uspor vode na pojedinoj jadranskoj obali. Da bismo to učinili potrebno je provesti opsežnije istraživanje koje uključuje niz različitih epizoda olujnih uspora.

Fokus ovog poglavlja je da se, analizirajući iznimne događaje u razdoblju od nekih 30 godina, odrede specifični sinoptički uvjeti odgovorni za uspostavu olujnih uspora s naglaskom na olujne uspore kod kojih je izražen poprečni nagib morske površine. Pri tome

ćemo analizirati empirijske podatke te provesti numeričke simulacije izdvojenih ekstremnih događaja. Poglavlje je napisano prema objavljenom radu [14].

3.1 Podaci

Analiza je provedena korištenjem satnih vrijednosti vodostaja mjerenih u Veneciji (Punta Salute) i Bakru u razdoblju 1984. – 2014. Vremenski interval odabran je prema dostupnosti i neprekidnosti meteoroloških podataka i podataka o razini mora. Oba niza su kontinuirana i izvrsne kvalitete bez stršećih vrijednosti za promatrani period. Mjereni vodostaj u Veneciji javno je dostupan te je preuzet s internetskih stranica Centra za mjerenje i prognozu vodostaja u Veneciji [12]. Bakarski mareografski podaci u vlasništvu su Geofizičkog odsjeka.

Meteorološka pozadina jadranskih olujnih uspora ispitana je upotrebom simulacija globalnog hidrostatičkog modela IFS spektralne horizontalne rezolucije T255 tj. polja reanalize ERA-Interim prostorne rezolucije oko 80 km u našim širinama [31]. Treba naglasiti da ovdje nije analiziran vremenski razvoj događaja već prostorna struktura meteoroloških prinudnih djelovanja. Stoga je za svaku epizodu olujnog uspora odabrano po jedno polje atmosferskih parametara tako da predstavlja specifične uvjete za uzdizanje razine mora. Analiza meteorološkog forsiranja bazirala se na dva skupa podataka. Prvo smo koristili polja reanalize ERA-Interim dostupna svakih 6 h (ovdje označena s ERA6h). Zatim smo, da bismo dobili bolju vremensku rezoluciju forsiranja, kombinirali polja reanalize s poljima kratkoročne prognoze koja su generirana istim modelom i s istom prostornom rezolucijom unutar projekta ERA-Interim. Naime, reanalize dostupne u 00, 06, 12 i 18 UTC u kombinaciji s prognozama dostupnim u 03 i 09 UTC (pokrenutim u 00 UTC) i u 15 i 21 UTC (pokrenutim u 12 UTC) osiguravaju meteorološko forsiranje svaka 3 h (ovdje označeno s ERA3h). I na kraju, za svaki olujni uspor odabrana je po jedna meteorološka pozadina iz dostupnog prethodnog termina. Korišteni su geopotencijal 500-hPa plohe, tlak zraka na srednjoj razini mora i prizemni vjetar (na 10 m visine), linearno interpolirani na mrežu $0.25^o \times 0.25^o$. Vektori vjetra razloženi su na uzdužnu (longitudinalnu, L) i poprečnu (transverzalnu, T) komponentu. Komponente su dobivene rotiranjem originalnog koordinatnog sustava za 135° prema zapadu, a koincidiraju s glavnim vjetrovima

nad Jadranom – jugom i burom.

3.2 Empirijska analiza

3.2.1 Izdvajanje epizoda olujnih uspora

Vodostaji mjereni u odnosu na lokalnu mareografsku nulu reducirani su na srednju razinu mora oduzimanjem srednjaka za promatrano 31-godišnje razdoblje. Valja imati na umu da se ovime ne uklanjaju spore varijacije vodostaja kao što su sezonski hod, međugodišnja i dugogodišnja promjena razine mora. Nadalje, koristeći programski paket *T_tide* [35], iz mjerenog vodostaja uklonjene su morske mijene uzimajući u obzir sedam najvažnijih konstituenata u Jadranu (K1, O1, P1, K2, S2, M2 i N2). Na dobivenim rezidualnim vodostajima rađena je analiza koja slijedi.

Najintenzivniji olujni uspori definirani su kao vodostaji koji premašuju prag zadan kao 99.95-ti percentil. Prag je izračunat uzevši u obzir podatke s obje postaje, a iznosi 73.31 cm. Ovako definiran kriterij uvažava činjenicu da se poplave javljaju češće i s većom magnitudom u Veneciji pa stoga snižava standard za Veneciju, ali povisuje za Bakar. Na ovaj način osigurali smo da se u obzir uzmu samo najintenzivniji jadranski olujni uspori. U suprotnom, kada bi definirali kriterije za svaku postaju zasebno, izdvojili bismo veliki broj nerelevantnih događaja. Epizoda je proglašena iznimnom ako je prešla zadanu visinu na barem jednoj postaji. Nezavisne epizode definirane su kao najviši vodostaji razdvojeni najmanje 36 sati. Ograničenje je bilo nužno kako bi se eliminirali vodostaji koji su velikim dijelom rezultat doprinosa prethodno generiranog seša, a ne intenzivnog meteorološkog forsiranja. Interval je odabran kao duljina jednog i pol perioda jadranskog seša, koji iznosi oko 21.5 sati. S druge strane, interval je dovoljno kratak da dopusti uzastopne olujne uspore generirane brzoputujućim ciklonama. Na ovaj način izdvojeno je 38 epizoda iznimnih jadranskih olujnih uspora u periodu 1984. – 2014. (tablica 3.1).

Poprečni nagib morske razine (transverzalni nagib, T-nagib) izračunat je za svaki olujni uspor kao razlika između maksimuma u Veneciji i Bakru. Pozitivan nagib znači da je morska površina uzdignuta prema zapadu. Za kvantificiranje T-nagiba korišteni su lokalni maksimumi umjesto simultanih vodostaja jer se maksimumi na dvije postaje ne postižu istovremeno. Vrhunac najčešće prvo nastupa u Veneciji (u 22 slučaja od njih

38) a zatim za nekoliko sati, oko 3 – 4, u Bakru. Ovo kašnjenje rezidualnog vodostaja povezano je s prolaskom ciklona iznad bazena koje se općenito kreću u smjeru zapad – istok. Tijekom ostalih epizoda maksimumi su bili simultani (4 epizode) ili su se prvo

Tablica 3.1: Kronološki niz iznimnih epizoda olujnih uspora u periodu 1984. – 2014. U kolonama su prikazani: (1) broj epizode (Br.), (2) datum nastupa, (3, 4) visina rezidualnog vodostaja (Z_r), (5) rang epizode, (6) postojanje prethodno generiranog seša (PS), (7) vremenski interval između epizode i prethodno dostupnog polja ERA-Interim iz skupa ERA6h i ERA3h i (8) tip olujnog uspora prema poprečnom nagibu morske površine. Zvjezdicom u trećoj i četvrtoj koloni označeni su vodostaji koji na jednoj od postaja nisu prešli zadani prag.

Episoda (Br.)	Datum Venecija/Bakar	Zr (cm) Venecija	Zr (cm) Bakar	Rang Venecija/Bakar	PS	Meteo polja (h) ERA6h/ERA3h	Tip W/O/E
1	21. svibnja 1984.	75.1	67.5*	35/20	Ne	6	O
2	1. veljače 1986.	101.4	74.0	5/15	Ne	9/6	O
3	11. listopada 1987.	83.6	65.5*	21/25	Ne	4	O
4	24. studenoga 1987.	83.0	83.2	22/3	Ne	5	E
5	25. studenoga 1990.	90.0	61.6*	15/32	Ne	8/5	O
6	9. prosinca 1990.	105.7	81.6	3/9	Ne	8/5	O
7	24. studenoga 1991.	93.2	57.9*	11/36	Ne	4	W
8	5. listopada 1992.	74.0	73.3	36/16	Da	7/4	E
9	5. prosinca 1992.	63.2*	75.8	38/14	Da	6	E
10	8. prosinca 1992.	98.0	61.5*	6/33	Da	7/4	W
11	2. listopada 1993.	87.5	81.7	17/7	Ne	5	O
12	18. studenoga 1996.	92.1	73.2*	12/17	Da	8/5	O
13	20. prosinca 1997.	90.1	79.7	14/12	Ne	5	O
14	28. prosinca 1999.	69.9*	80.1	37/11	Da	8/5	E
15	6. studenoga 2000.	117.0	68.6*	1/19	Ne	9/6	W
16	16. studenoga 2002.	104.4	82.5	4/4	Da	7/4	O
17	18. studenoga 2002.	81.1	66.2*	24/22	Da	7/4	O
18	31. listopada 2003.	77.9	64.4*	30/28	Da	7/4	O
19	1. prosinca 2008.	93.3	81.0	10/10	Da	9/6	O
20	10/11. prosinca 2008.	82.5	58.8*	23/35	Ne	6	O
21	29. ožujka 2009.	78.9	58.8*	27/34	Ne	5	O
22	23. prosinca 2009.	95.2	81.9	9/5	Da	9/6	O
23	25. prosinca 2009.	95.7	81.7	8/8	Da	6	O
24	9. siječnja 2010.	76.2	61.9*	34/30	Da	6	O
25	19. veljače 2010.	87.8	75.9	16/13	Da	4	O
26	22/21. studenoga 2010.	80.9	65.4*	25/26	Ne	7/4	O
27	24. prosinca 2010.	84.3	71.5*	18/18	Ne	7/4	O
28	1. studenoga 2012.	111.1	93.5	2/1	Ne	9/6	O
29	4. studenoga 2012.	78.5	65.0*	29/27	Da	5	O
30	11. studenoga 2012.	91.7	45.3*	13/38	Ne	7/4	W
31	28. studenoga 2012.	83.9	85.0	19/2	Ne	9/6	E
32	11. veljače 2013.	76.4	65.6*	33/24	Ne	7/4	O
33	18. ožujka 2013.	79.6	67.5*	26/21	Ne	6	O
34	26. prosinca 2013.	83.8	62.5*	20/29	Ne	5	O
35	31. siječnja 2014.	77.6	55.4*	31/37	Da	7/4	O
36	10. veljače 2014.	76.9	65.8*	32/23	Da	8/5	O
37	15/16. studenoga 2014.	78.5	61.8*	28/31	Ne	4	O
38	17. studenoga 2014.	96.9	81.9	7/6	Da	4	O

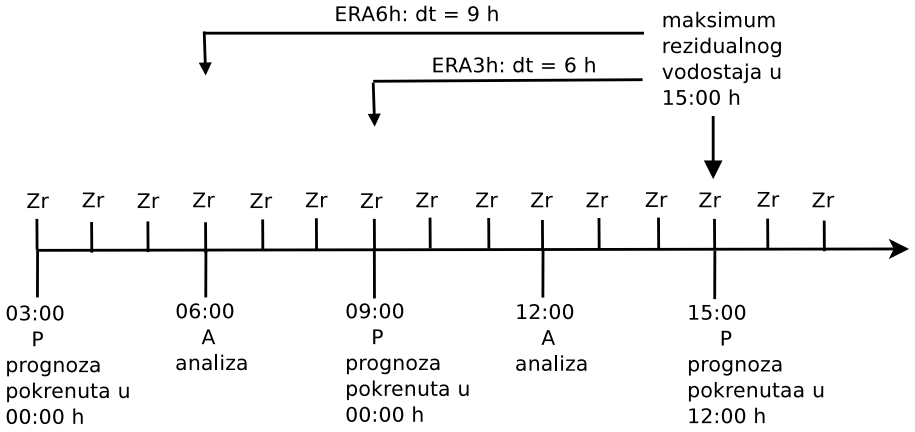
opazili u Bakru (12 epizoda).

Meteorološka polja odgovorna za olujne uspore identificirana su imajući na umu da je trenutno stanje u moru odraz prethodnih stanja u atmosferi te je stoga nužno uzeti u obzir vrijeme odziva Jadrana na atmosfersko prinudno djelovanje. Sukladno tome, za uzročna polja razmatrala su se ona dostupna najmanje 4 sata prije postignutog maksimuma vodostaja. Kako podaci nemaju istu vremensku rezoluciju, ERA-Interim je dostupna svakih 6/3 h iz skupova ERA6h/ERA3h, a vodostaj svaki sat, nametnuti vremenski razmak rezultirao je nizom meteoroloških pozadina koje su prethodile vrhuncima vodostaja 4 – 9/6 sati (tablica 3.1). Procedura je ilustrirana na sljedećem primjeru (slika 3.1). Zamislimo da se maksimum vodostaja opazio u 15:00 UTC. U tom slučaju imali bismo tri opcije: (i) odabrati polja analize u 12:00 UTC kao odgovorna za postignuti maksimum, (ii) uzeti polja analize od prije 9 sati tj. u 06:00 UTC ili (iii) odabrati kratkoročnu prognozu u 09:00 UTC (pokrenutu u 00:00 UTC). Prva opcija se odbija zbog vremena odziva bazena, dok se druge dvije testiraju, usporedbom modeliranih vodostaja (za detalje vidi potpoglavlje 3.3) s opaženima te se uspješnija opcija prihvaća. Interpolacija podataka u vremenu nije provedena jer bi podrazumijevala linearnu promjenu atmosferskih uvjeta unutar 6-satnog intervala što se čini predugim da bi bila ispunjena pretpostavka o linearnosti. Što se tiče vremenskog ograničenja od 4 sata, ono je određeno eksperimentalno jer je literatura prilično škrta po ovom pitanju. U radu [46] određeno je vrijeme odziva struja u sjevernom Jadranu na prisilu sinoptičke skale te ono iznosi 6 sati. Za očekivati je da bi onda vodostaj reagirao sporije pa smo ispitali nekoliko vremenskih razmaka duljine oko 6 sati. Ograničenje od 4 sata pokazalo se optimalnim jer smo s duljim razmacima propuštali većinu maksimuma vjetra.

Napetost vjetra ($\vec{\tau_s}$) koja odgovara odabranim poljima vjetra ($\vec{w}$) izračunata je prema

$$\vec{\tau_s} = C_D \rho_a |\vec{w}| \vec{w}, \tag{3.1}$$

gdje je ρ_a gustoća zraka koja iznosi 1.22 kg/m^3 a C_D je bezdimenzionalni koeficijent potezanja formuliran kao linearna funkcija brzine [47]. Brzina vjetra za procjenu napetosti pomnožena je faktorom 1.47. Ovo je bilo potrebno radi već spomenutog podcjenjivanja brzine vjetra iznad Sredozemlja modelom IFS manje prostorne razlučivosti.

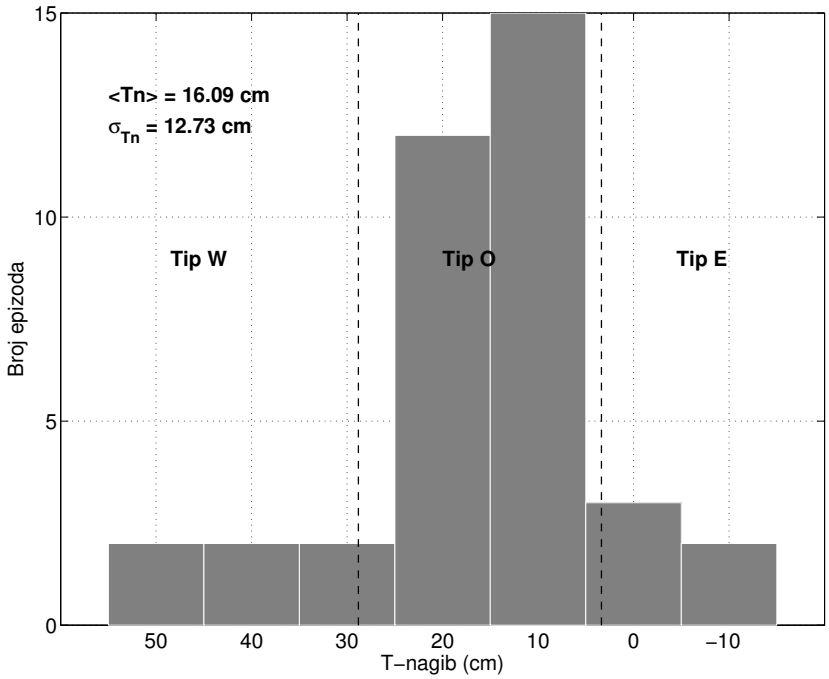


Slika 3.1: Ilustracija strategije odabira meteoroloških polja odgovornih za razvoj iznimnih olujnih uspora. Z_r označava rezidualni vodostaj dostupan svakih sat vremena. A i P označavaju analizu odnosno kratkoročnu prognozu iz baze ERA-Interim. Meteorološki podaci su dostupni svakih 6 sati ako se u obzir uzme samo analiza, odnosno svaka 3 sata ako dodamo kratkoročnu prognozu. Za navedeni primjer (maksimum vodostaja u 15:00 sati), uz nametanje vremenskog razmaka od minimalno 4 sata, iz ERA6h odabrat ćemo polja koja prethode maksimumu vodostaja 9 sati, dok će polja iz ERA3h prethoditi 6 sati.

3.2.2 Klasifikacija olujnih uspora

Olujni uspori u Jadranu podijeljeni su u tri kategorije prema poprečnom nagibu morske površine: olujni uspori s iznimnim nagibom prema zapadnoj obali (tip W, od engl. *westward*), olujni uspori s nagibom prema istočnoj obali (tip E, od engl. *eastward*) i uobičajeni tip olujnih uspora (tip O, od engl. *ordinary*). Marginalni tipovi, W i E, određeni su kao oni kod kojih T-nagib odstupa više od jedne standardne devijacije u odnosu na srednji nagib koji iznosi 16.09 cm (slika 3.2). Ostale epizode, tj. one koje se nalaze unutar jedne standardne devijacije, proglašene su uobičajenim tipom olujnih uspora (tip O).

Za uočena tri tipa olujnih uspora izračunati su kompoziti atmosferskih polja: geopotencijala 500-hPa plohe, tlaka zraka na srednjoj razini mora, prizemnog vjetra (10 m) i napetosti vjetra. Kompoziti brzine vjetra izračunati su usrednjavanjem njegovih komponenata. Zbog nelinearne veze između brzine i napetosti vjetra, kompoziti napetosti vjetra izračunati su kao prosjeci pojedinačnih polja napetosti.

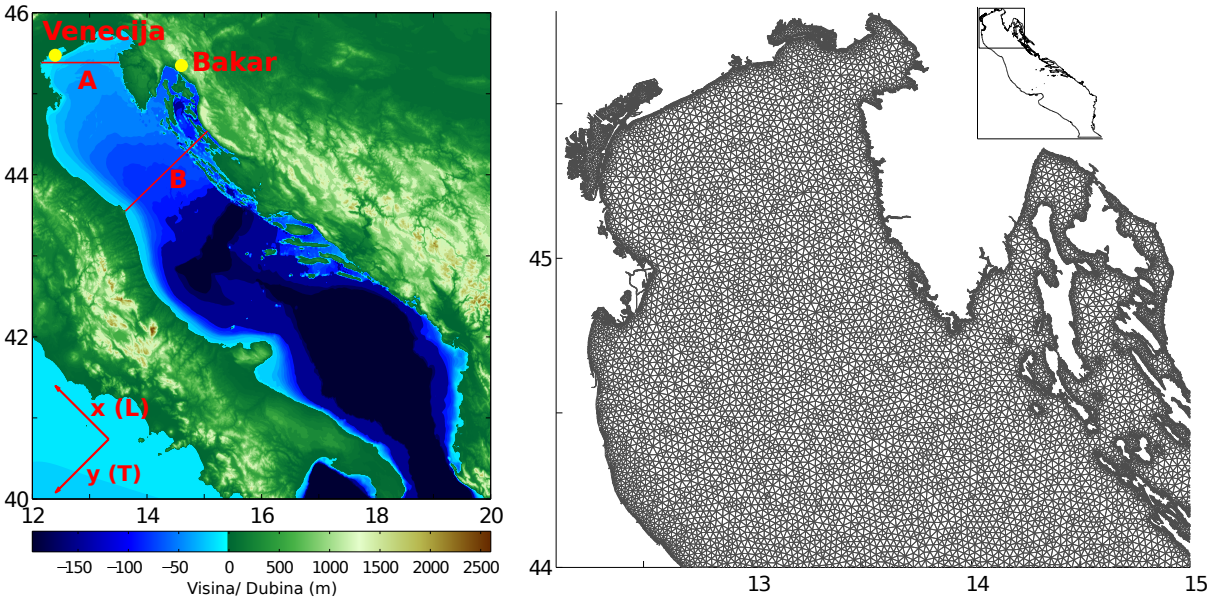


Slika 3.2: Razdioba olujnih uspora prema poprečnom nagibu morske površine (T-nagib). Granice između tipova označene su vertikalnim linijama, a određene su kao srednja vrijednost plus/minus jedna standardna devijacija.

3.3 Numeričke simulacije

Odziv morske razine na prinudno djelovanje tlaka zraka i vjetra simuliran je modelom SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model). To je semiimplicitni oceanografski model konačnih elemenata koji se koristi za modeliranje trodimenzionalne (3D) cirkulacije na skalama od uskih šelfova do oceanskih bazena, [48] i [49]. Temelji se na 3D jednadžbama plitke vode s hidrostatičkom i Boussinesq-ovom aproksimacijom te jednadžbama izmjene topline i soli. Zbog svoje formulacije, SCHISM je numerički vrlo efikasan i prikladan za bazene kompleksne geometrije. Pri korištenju semiimplicitne numeričke sheme za vremensku integraciju nije obavezno poštivati CFL kriterij stabilnosti pa se mogu koristiti dulji vremenski koraci. Zbog toga je, da bi se dovršila simulacija, potreban mnogo manji broj koraka nego što bi to bilo u slučaju modela s eksplicitnim shemama. Osim toga, metoda konačnih elemenata, koja je bazirana na fleksibilnoj mreži trokutića, omogućava da se prikladno razluče kompleksne domene s mnogo otoka i složenom obalnom linijom. Iz ovih razloga model SCHISM je prikladan za primjenu u Jadranu.

Simulacije su izvedene korištenjem modela u sfernom koordinatnom sustavu u 3D barotropnom modu. Pridneno trenje je kvadratno s prostorno uniformnim koeficijentom trenja koji iznosi 0.003, u skladu s već korištenim [5]. Napetost vjetra u modelu zadana je prema jednadžbi 3.1. Domena modela pokriva cijeli Jadran s otvorenom granicom na Otrantu (slika 3.3). Na otvorenom kraju primijenjen je radijacijski rubni uvjet pri čemu je razina korigirana za efekt inverznog barometra. Trokutasta mreža sastoji se od 134.065 elemenata i 84.280 čvorova rezolucije oko 3 km na otvorenom moru i 600 m uz obalu. Vremenska integracija jednadžbi izvedena je s vremenskim korakom duljine 300 s, koji zadovoljava uvjet da CFL broj bude veći od 0.6 unutar cijele domene. U protivnom bi numerička difuzija mogla uništiti rješenje.



Slika 3.3: *Lijevo*: batimetrija Jadrana i okolna orografija. Dubine veće od 250 m prikazane su istom bojom. Prikazane su lokacije mareografskih postaja Venecije i Bakra na kojima su izmjereni korišteni nizovi razine te profili A i B korišteni za kvantificiranje komponenata vjetra upotrebljenih na slici 3.9. Također je prikazan koordinatni sustav za računanje uzdužne i poprečne komponente vjetra. *Desno*: povećani prikaz dijela mreže Jadrana u SCHISM modelu i cijela domena prikazana u umetku gore.

Izvedeno je 38 idealiziranih numeričkih simulacija forsiranih vremenski neovisnim poljima tlaka zraka i vjetra. Odabrana meteorološka polja nametnuta su hidrodinamičkom modelu i držana konstantnima u vremenu sve dok u bazenu nije postignuto stacionarno stanje. Eksperiment je osmišljen kako bi se detektirale karakteristike polja vjetra presudne

za uspostavljanje poprečnog nagiba morske površine, a ne za realni prikaz odziva razine. Valjanost eksperimenta zasniva se na pretpostavkama linearnosti i kratkog vremena odziva bazena. Naime, nelinearne interakcije relevantnih procesa u Jadranu su zanemarive, što je pokazano u nekoliko radova (npr. [7] i [50]). To nam dopušta proučavanje svakog procesa zasebno. S druge strane, brzi odgovor bazena na sinoptičke poremećaje, procijenjen na oko 6 sati, opravdava korištenje samo jednog polja kao prisile odgovorne za nastali maksimum vodostaja.

Epizode su simulirane u trajanju od tri dana kako bi se postiglo stacionarno stanje u čitavom bazenu. Vrijeme uhodavanja modela (engl. *spin-up time*) postavljeno je na jedan dan čime je izbjegnuto moguće pobuđivanje lažnih seša u bazenu. Ovo znači da je brzina vjetra lagano rasla te je u jednom danu, krenuvši od nule, postigla svoj konačni iznos. Polja vjetra nametnuta oceanografskom modelu pomnožena su faktorom 1.47 zbog već poznatog podcjenjivanja brzine modelom IFS manje prostorne razlučivosti.

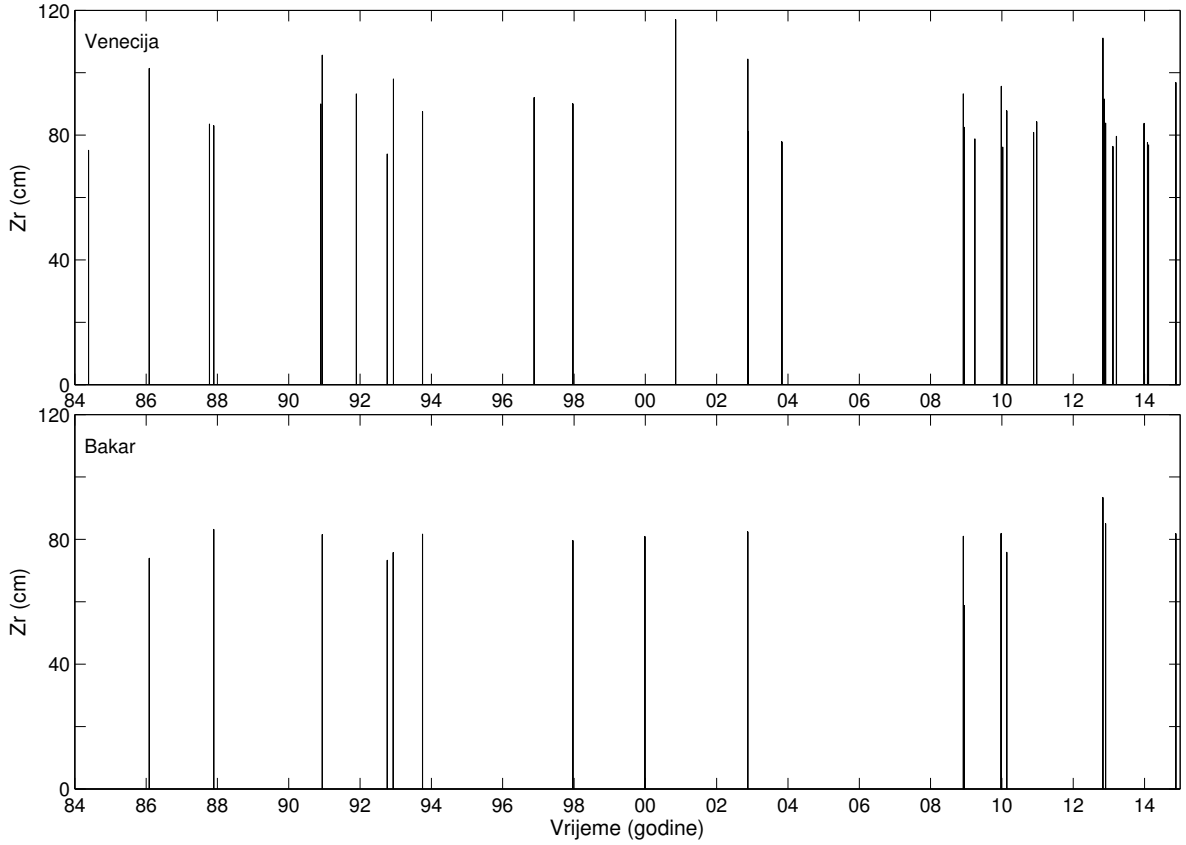
Usrednjavanjem pojedinačnih polja odziva dobivenih numeričkim simulacijama, dobivena su srednja polja razine mora za pojedini tip olujnog uspora.

3.4 Rezultati

3.4.1 Opaženi olujni uspori

Niz od 38 najviših olujnih uspora zabilježenih u Jadranu u razdoblju 1984. – 2014. dan je u tablici 3.1 i prikazan na slici 3.4, pri čemu su epizode definirane kao što je opisano u potpoglavlju 3.2.1. Dvije postaje, Venecija i Bakar, smještene su duž bazena na način da će jugoistočni vjetar općenito inducirati viši vodostaj u Veneciji. Stoga je, kao što je već rečeno, primijenjeni prag snizio kriterij za vodostaj u Veneciji, a povisio ga za vodostaj u Bakru. To se očituje u činjenici da je za vrijeme 21 epizode nivo premašen isključivo u Veneciji, za razliku od dvije epizode tijekom kojih je nivo premašen samo u Bakru (epizode 9 i 14). Izniman vodostaj je zabilježen na obje postaje tijekom 15 epizoda.

Tijekom promatranog razdoblja pojava olujnih uspora nije bila ujednačena (tablica 3.1). Posljednjih sedam godina bilo je najaktivnije – čak 20 epizoda, što je više od pola svih zabilježenih slučajeva, zbilo se u razdoblju 2008. – 2014. S druge strane, intenzitet epizoda ne pokazuje nikakav trend (slika 3.4). Ovdje treba imati na umu da je visina



Slika 3.4: Vremenska raspodjela i visina iznimnih olujnih uspora u Veneciji (*gore*) i Bakru (*dolje*).

olujnih uspora izračunata u odnosu na srednji vodostaj tijekom cijelog perioda. Stoga je moguće da je porast srednje razine dijelom utjecao na visinu olujnih uspora, ali i na veću frekvenciju pri kraju promatranog razdoblja. Kako god bilo, trend srednje razine nije mogao utjecati na poprečni nagib morske površine jer su postaje prostorno bliske pa se očekuje slična promjena srednje razine mora na dvije lokacije.

Za svaku epizodu procijenjeno je postojanje prvog moda prethodno generiranog seša (tablica 3.1). Vizualnim pregledom rezidualnih vodostaja provjereno je jesu li, u kratkom periodu prije samog maksimuma, prisutne nagle promjene razine praćene oscilacijama. Ovime je utvrđena prisutnost jadranskih slobodnih oscilacija, ali ne i njihov eventualni doprinos glavnom maksimumu. Prvo je potrebno pri interpretaciji rezultata, ali sam doprinos nije nužan jer ne utječe na poprečni nagib morske razine. Naime, amplituda prvog moda monotono raste od Otranta prema zatvorenom kraju s izolinijama manje-više okomitima na obalu [51]. Zato njegov doprinos ukupnom vodostaju ovisi o lokaciji

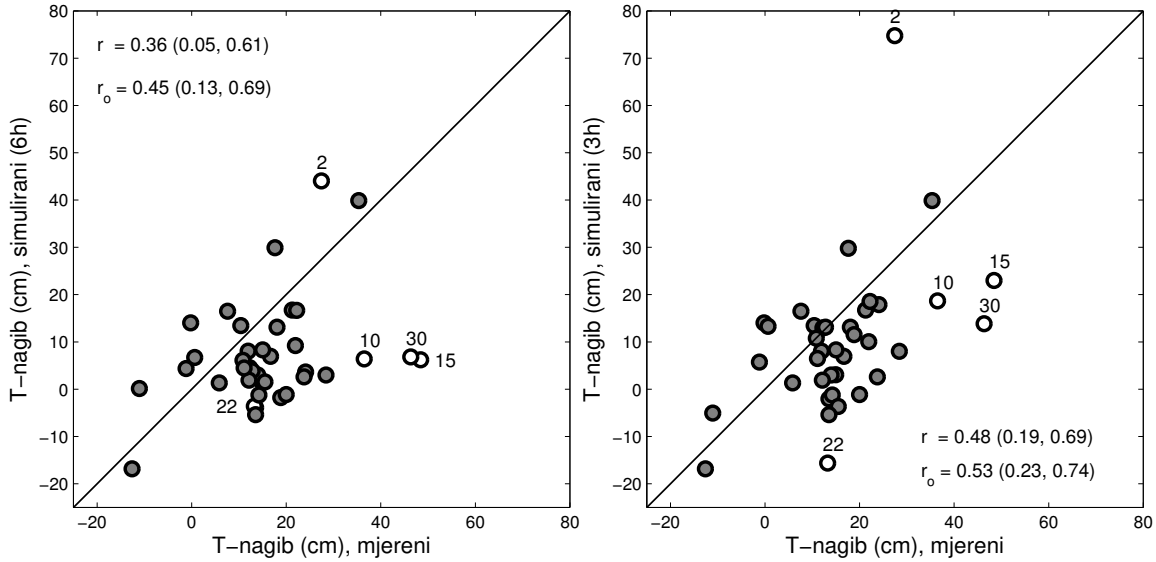
uzduž bazena, ali ne utječe na razliku vodostaja između suprotnih obala. Drugi mod seša bi, s obzirom da se giba u obliku Kelvinovog vala od istočne obale prema zapadnoj, mogao doprinijeti razlikama između obala, međutim, amplitude su mu u pravilu znatno niže kao što je pokazano u nastavku teksta.

Iz tablice 3.1 evidentno je da je većina epizoda, njih 21, bila rezultat isključivo olujnog uspora dok su ostale epizode formirane superpozicijom prethodno generiranih seša i novonastalih olujnih uspora. Važnost dvaju modova vlastitih oscilacija u formiranju iznimnih vodostaja određena je računanjem spektra snage. Za izračun su uzeti dijelovi nizova koji počinju 6 dana prije, a završavaju u trenutku maksimuma. Srednji spektar snage pokazao je da omjer energije prvog i drugog moda u prosjeku iznosi oko 10 u Veneciji dok u Bakru, koji je bliži amfidromijskoj točki, omjer je mnogo veći (oko 15). Stoga, možemo smatrati da je jedino prvi mod imao utjecaj na nadolazeće olujne uspore dok je drugi mod bio zanemariv. Ovdje je zgodno komentirati kašnjenje maksimuma u Veneciji za onima u Bakru, uočeno u 12 epizoda. Nismo pronašli dokaz da bi ovo bila posljedica propagacije Kelvinovog vala povezanog s drugim modom stojnih valova. Epizode su generalno okarakterizirane slabim energijama na periodu oko 11 sati te nije uočena povezanost između kašnjenja i povišene energije na ovom periodu. Ovo će biti korisno pri diskusiji rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem.

Vremenski intervali između vrhunaca razine i odgovarajućih meteoroloških uvjeta prikazani su u sedmoj koloni tablice 3.1. Ovdje su bile moguće dvije opcije – korištenje polja analize dostupnih svakih 6 h (ERA6h) ili kombinacija polja analize i prognoze dostupnih svaka 3 h (ERA3h). U prvom slučaju raspolažemo meteorološkim poljima koja prethode vodostajima 4 – 9 h, dok korištenjem kombinacije polja u 20 epizoda taj raspon reduciramo za 3 h.

3.4.2 Simulacije razine mora

Sve izdvojene epizode ekstremnih olujnih uspora, njih 38, simulirane su korištenjem pripadnih meteoroloških polja iz ERA6h i ERA3h skupa podataka. Rezultati su uspoređeni s mjerenjima (slika 3.5). Kvaliteta izvedenih simulacija ocijenjena je koeficijentom korelacije između modeliranog i opaženog poprečnog nagiba morske površine. Stršeće epizode ovdje smo definirali kao one kod kojih modelirani poprečni nagib odstupa



Slika 3.5: Mjereni naspram modeliranih poprečnih nagiba morske razine (T-nagib) za meteorološka forsiranja iz ERA6h (*lijevo*) i ERA3h (*desno*). Stršeće vrijednosti su prikazane praznim kružićima. Prikazani su i koeficijenti korelacije između modeliranih i mjerenih T-nagiba: r za sve epizode (n = 38) i r_o kada se isključe stršeće vrijednosti (n = 33), s pripadnim 95-postotnim intervalima pouzdanosti u zagradama. Dijagonala označava savršeno slaganje između modeliranih i opaženih vrijednosti.

od izmjerenog za više od 27 cm (broj je određen subjektivnom metodom testirajući nekoliko vrijednosti). Također, ako je epizoda proglašena stršećom za jedan skup simulacija onda je stršeća i za drugi skup bez obzira na kvalitetu reproduciranog poprečnog nagiba morske površine. Ovo je uvedeno kako bi se koeficijenti korelacije (prikazani na slici 3.5) računali na istim skupovima epizoda te bili međusobno usporedivi. Na slici 3.5 vidimo da je u oba slučaja dobiveni nagib nešto niži od izmjerenog – model podcjenjuje razinu mora u Veneciji više nego u Bakru. Opaženi nagib točnije je reproduciran korištenjem skupa ERA3h u odnosu na onaj dobiven korištenjem isključivo polja reanalize. Kao što je već spomenuto, model SCHISM primijenjen je na način da je atmosfersko prinudno djelovanje držano konstantnim do postizanja stacionarnog stanja. Znatna odstupanja od mjerenih vodostaja su stoga očekivana s obzirom da simulirani vodostaj ne sadrži inercijski dio odziva niti doprinose od mogućih prethodno pobuđenih seša. S obzirom na pojednostavljenje, možemo kazati da je model općenito uspješno reproducirao opaženi nagib. Epizode 10, 15 i 30 prilično su loše simulirane poljima iz ERA6h; rezultati su se poboljšali korištenjem ERA3h za prve dvije epizode dok je za posljednju poprečni nagib

ostao znatno podcijenjen. Za dva događaja, 2 i 22, model je dao bolje rezultate kada je forsiran poljima analize (ERA6h).

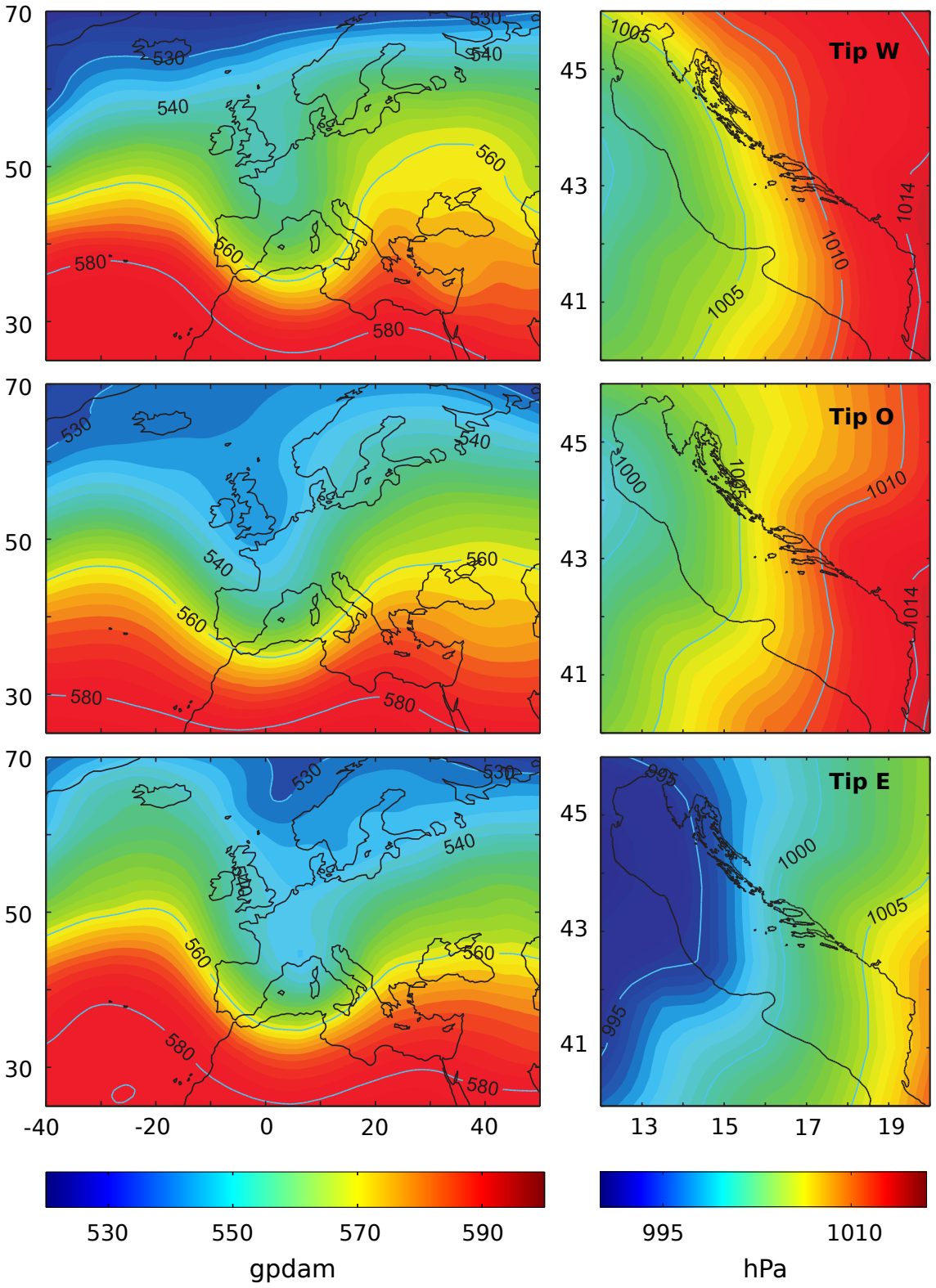
U sljedećim potpoglavljima koristit će se isključivo rezultati dobiveni kombiniranim meteorološkim poljima (ERA3h) jer su reproducirali poprečni nagib bolje od polja analize (ERA6h) (slika 3.5).

3.4.3 Analiza tipova olujnih uspora

Identificirali smo tri tipa olujnih uspora u Jadranu, ovisno o poprečnom nagibu morske razine, tj. prema odstupanju poprečnog nagiba od srednje vrijednosti (slika 3.2). Za vrijeme olujnih uspora, morska razina u sjevernom Jadranu uglavnom je uzdignuta prema zapadu – u prosjeku je razina u Veneciji viša za oko 16 cm od one u Bakru. Ovo je odraz konfiguracije dna, ali i duljine privjetrišta ispred dvije lokacije (slika 3.3). Sjevernojadranski šelf je široki prostor malih dubina što vjetar čini vrlo efikasnim ispred Venecije. S druge strane, more ispred Bakra je dublje, a privjetrište juga kraće pa su olujni uspori ondje niži. Situacije s izuzetno uzdignutom morskom površinom prema zapadu, s razlikom vodostaja između postaja > 28 cm, klasificiramo kao tip W. Događaji s horizontalnom površinom ili blago nagnutom prema istočnoj obali (do 13 cm višom u Bakru) svrstavamo u tip E. Od ukupno 38 epizoda, 29 ih je običnog karaktera (tip O), četiri su tipa W dok ih je pet svrstano u tip E (osma kolona tablice 3.1).

Srednja polja srednje i donje atmosfere kao i simuliranog odziva razine mora dana su na slikama 3.6, 3.7 i 3.8. Pojava olujnih uspora u Jadranu povezana je s dolinom iznad zapadne Europe (slika 3.6, *lijevo*) što su uočili i drugi autori (npr. [24], [52]). Ovakva razdioba geopotencijala praćena je zapadnim strujanjem iznad skoro cijelog Sredozemlja. Idući od W prema E tipu, dolina se produbljuje uzrokujući veći gradijent geopotencijala iznad Sredozemlja, a posljedično i jače strujanje. Odgovarajuća polja prizemnog tlaka (slika 3.6, *desno*) ispoljavaju dvije značajne razlike. Za tip E, centar sredozemne ciklone pomaknut je na sjever te je tlak iznad Jadrana općenito niži. Ovo utječe na intenzitet i smjer gradijenta tlaka – razlika u tlaku preko bazena raste od tipa W (12 hPa), preko tipa O (14 hPa), do tipa E (16 hPa). Za tip W gradijent je orijentiran u smjeru istok – zapad, a za tip E usmjeren je uzduž bazena.

Pripadna polja vjetra prikazana su na slici 3.7. Razlike između tipova najizraženije

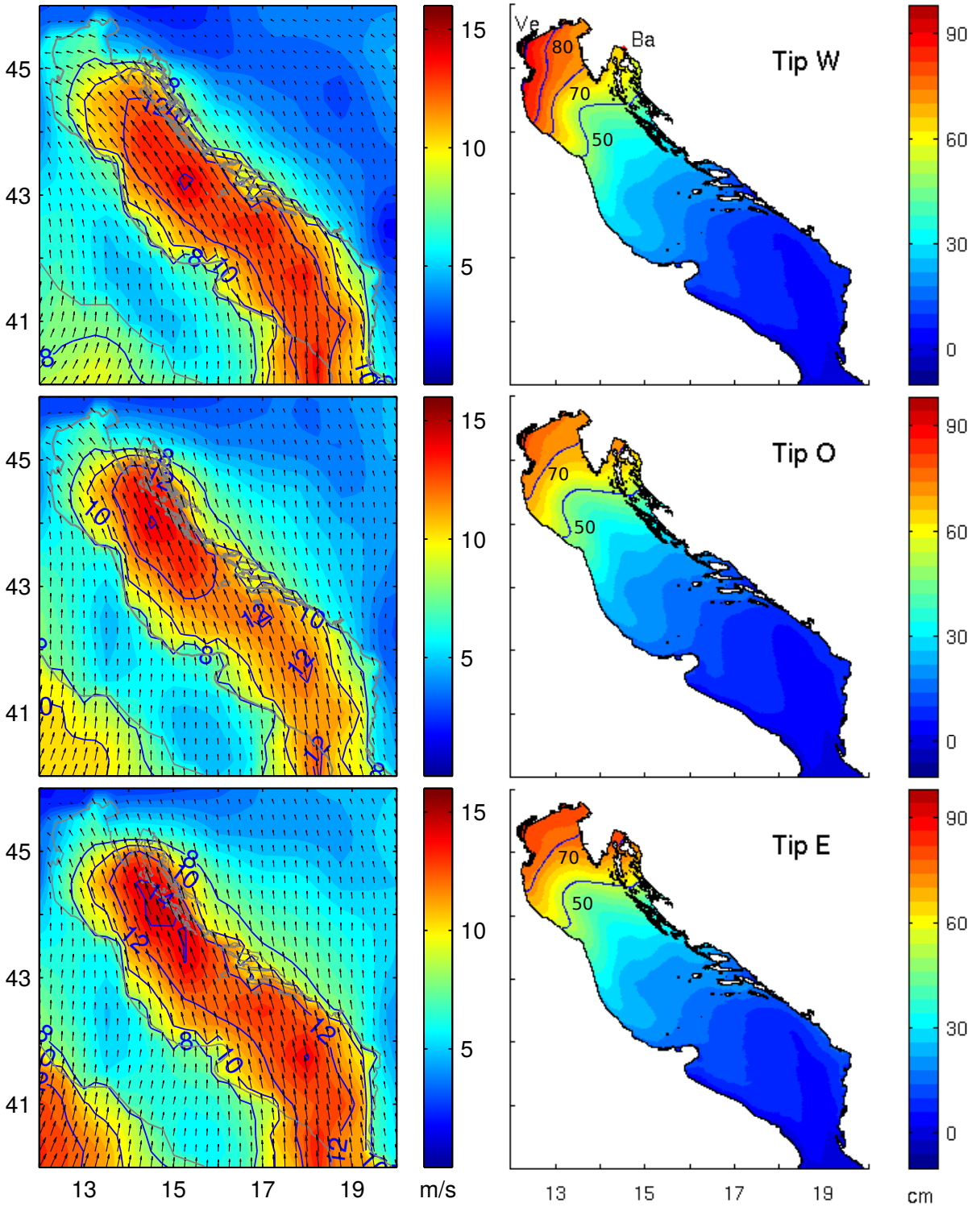


Slika 3.6: Kompoziti polja za tri tipa olujnih uspora. *Lijevo*: geopotencijal 500-hPa plohe iznad Europe i istočnog Atlantika. *Desno*: tlak zraka nad Jadranom. Podaci na ovoj i sljedećim slikama uzeti su iz skupa ERA3h.

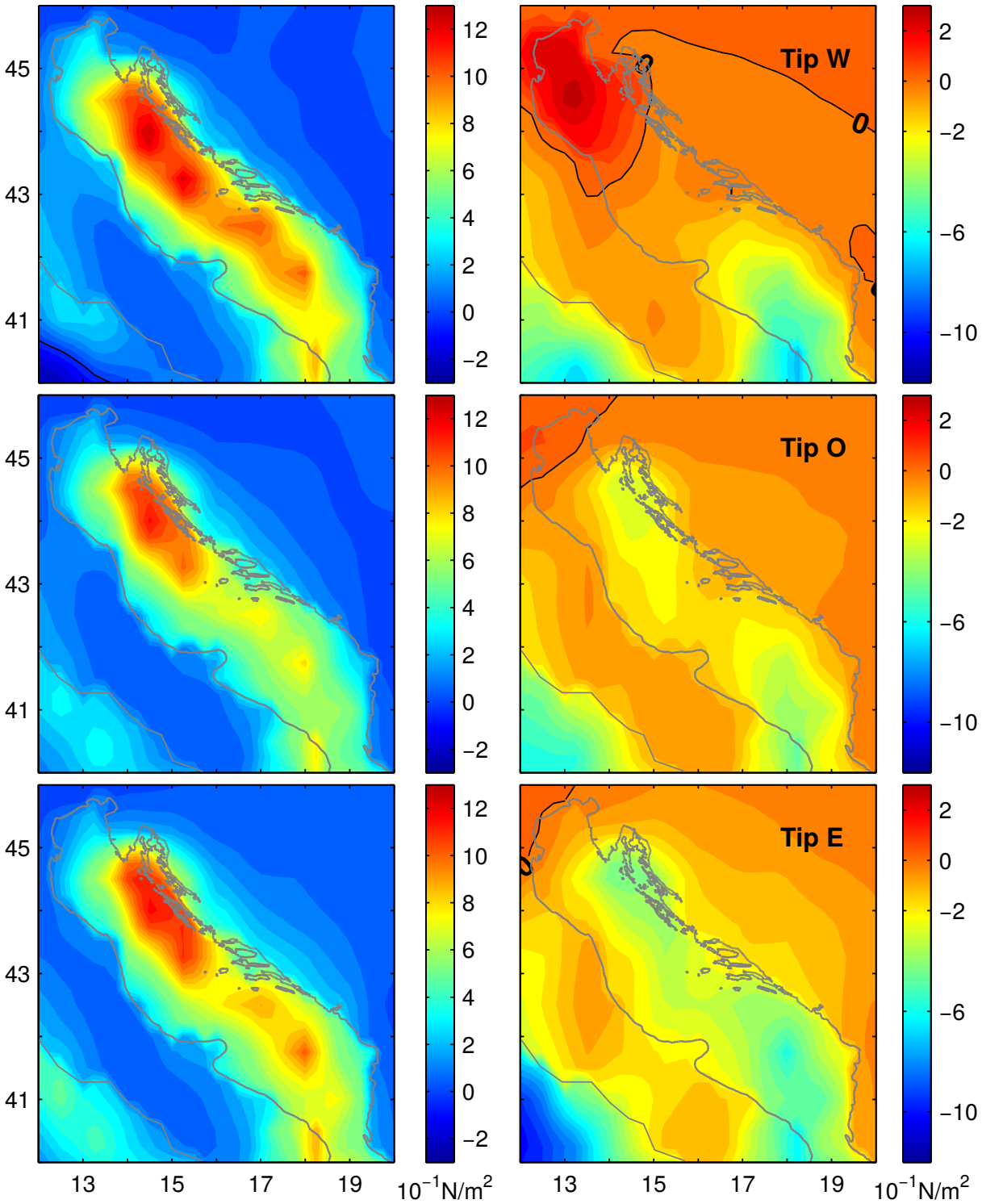
su u sjevernom i srednjem Jadranu, dok iznad južnog dijela bazena vjetar ima slične karakteristike. Štoviše, vjetar u južnom Jadranu djeluje iznad velikih dubina (D > 1000 m) pa stoga ima manji utjecaj na olujne uspore. Stoga ćemo se fokusirati na vjetar u sjevernom i srednjem Jadranu. Tip W olujnih uspora odlikuje se jugoistočnim vjetrom iznad većeg dijela bazena, osim iznad onog najsjevernijeg gdje prevladava istočni vjetar. U tipu O cijelo polje je lagano zarotirano prema istočnoj obali s većim brzinama bliže istočnoj obali. Najveće brzine vjetra, veće od 14 m/s, razvijaju se u tipu E što je naravno povezano s najizraženijim gradijentom tlaka (slika 3.6). Za razliku od tipa W, vjetar u tipu E dobiva smjer prema istoku te mu je područje maksimalnih brzina bliže istočnoj obali. Promjene smjera naročito su vidljive iznad najsjevernijeg plitkog dijela bazena gdje epizode tipa W koincidiraju s istočnim vjetrom, a epizode tipa E s jugoistočnim vjetrom.

Modelirani odzivi razine mora na djelovanje tlaka zraka i vjetra za tri tipa olujnih uspora prikazani su na slici 3.7. Kompoziti vodostaja dobiveni su usrednjavanjem pojedinih vodostaja za epizode unutar svakog tipa. Atmosfersko forsiranje induciralo je prilagodbu morske površine u cijelom sjevernom i dijelu srednjeg Jadrana, ali značajne razlike između tipova ograničene su na plitki dio čije dubine ne prelaze 60 m. Najviši poprečni nagib morske površine nastaje u tipu W te se postepeno smanjuje prema tipu E dok se površina skoro ne izravna. Rezultati reproduciraju glavne karakteristike opažanja: razlike između Venecije i Bakra za opažene/simulirane vodostaje iznose 42 cm/24 cm za tip W, 16 cm/10 cm za tip O i -5 cm/2 cm za tip E. Opaženi nagib površine mora rezultat je združenog djelovanja tlaka zraka i vjetra. Slika 3.6 sugerira da je tlak zraka bio najučinkovitiji u podizanju razine tijekom epizoda tipa E. Unatoč tome, podjednako je doprinio poprečnom nagibu morske razine jer je razlika tlaka zraka između Venecije i Bakra u sva tri tipa bila -3 hPa. Dakle, tlak je u sva tri slučaja podupirao nagib vodostaja prema zapadnoj obali doprinoseći otprilike 3 cm. Zato zaključujemo da je vjetar jedini čimbenik koji je kontrolirao intenzitet poprečnog nagiba u tri tipa olujnih uspora.

Nadalje, detaljnije ćemo ispitati djelovanje vjetra i pokušati identificirati svojstva njegovog polja koja su presudna za uspostavljanje poprečnog nagiba morske površine. Uzdužna (L) i poprečna (T) komponenta napetosti vjetra prikazena je na slici 3.8. Tip W olujnih uspora induciran je vjetrom čija je napetost u potpunosti longitudinalna iznad središnjeg dijela bazena (T-napetost iznimno je mala), a prema zatvorenom kraju tran-



Slika 3.7: Kompoziti polja vjetra iznad Jadrana (*lijevo*) i modelirani odziv razine mora na djelovanje tlaka zraka i vjetra (*desno*) za tri tipa olujnih uspora.



Slika 3.8: Kompoziti uzdužne (L, *lijevo*) i poprečne (T, *desno*) komponente napetosti vjetra. Napetosti su izračunate iz kalibriranih polja vjetra (faktor 1.47) prema relaciji 3.1. Pozitivne vrijednosti odnose se na L i T napetosti, usmjerene prema sjeverozapadu odnosno jugozapadu. Za T-komponentu izolinija nula označena je crnom linijom.

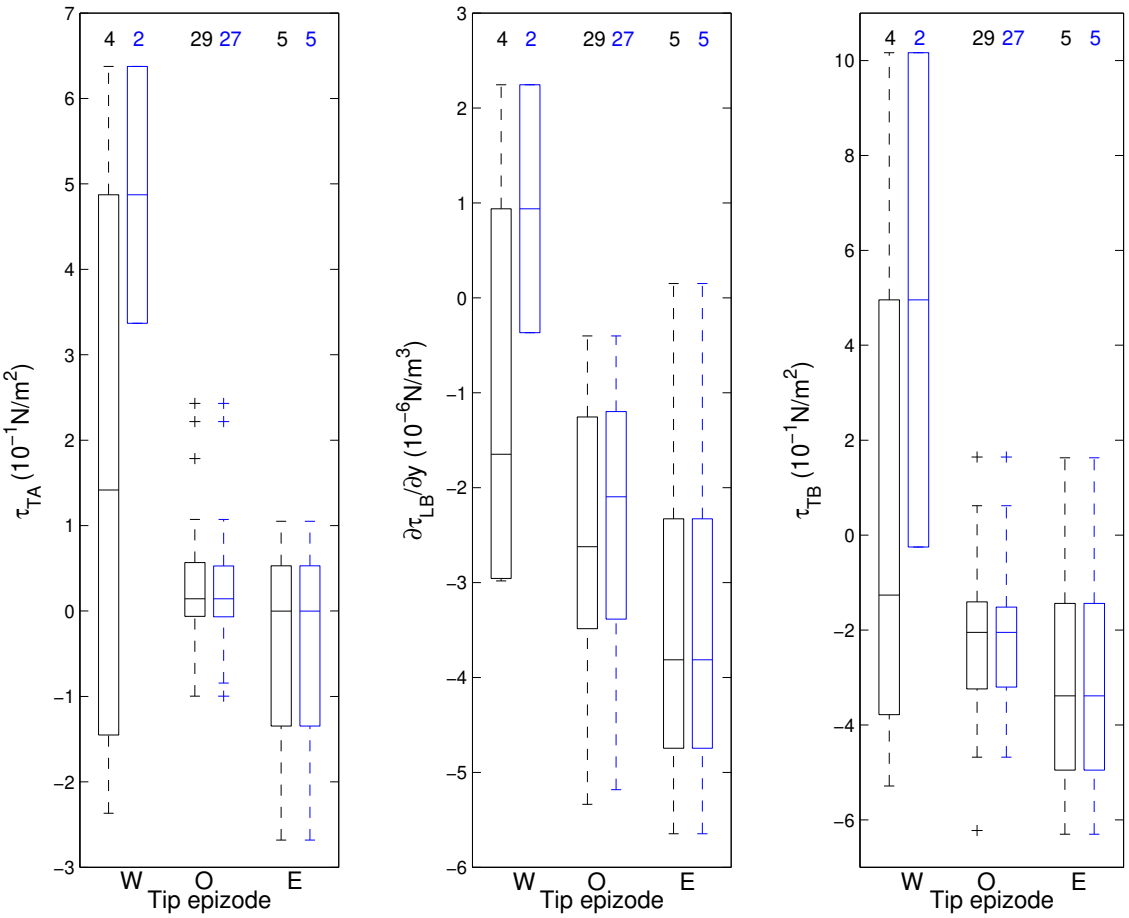
sverzalna komponenta poprima pozitivne vrijednosti. Takva prisila najučinkovitije diže vodostaj duž sjeverozapadne obale (slika 3.7, *gore desno*): L-napetost, djelujući u smjeru najduljeg privjetrišta i dominirajući iznad velikog prostora, akumulira vodu u zatvoreni kraj bazena, dok T-napetost, premda puno manjeg intenziteta, djeluje iznad najplićeg dijela mora i potiskuje vodu prema zapadnoj obali. Promjene u obje komponente vidljive su kada pređemo na tip O (slika 3.8, *sredina*). Najveće vrijednosti L-napetosti nalaze se bliže istočnoj obali, pri čemu je sjeverozapadni šelf izložen slabijem forsiranju. Dakle, postoji smicanje L-napetosti u poprečnom smjeru s većim iznosima na istočnoj strani (za tip W longitudinalna komponenta je gotovo homogena). Još veći kontrast vidi se u poprečnoj komponenti koja u tipu O iznad najsjevernijeg dijela mora gotovo iščezava, a nad ostatkom bazena poprima negativne vrijednosti. Takva konfiguracija vjetra prisiljava akumulaciju vode uz obje strane bazena, no budući da je istočni šelf dublji, rezultantna razina još uvijek je malo niža duž te obale (slika 3.7, *sredina desno*). Polja tipa E su u velikoj mjeri slična tipu O, ali općenito intenzivnija, osobito u južnom Jadranu i duž istočne obale, što dovodi do jačeg smicanja L-napetosti u poprečnom smjeru. T-komponenta je u ovom tipu negativna, s najvišim vrijednostima (po apsolutnom iznosu) ispred istočne obale sjevernog Jadrana te iznad najjužnijeg dijela bazena. Očigledno, razlike između W i O tipova su značajne u obje komponente napetosti vjetra, dok razlike između O i E tipova nisu tako očite. Možemo zaključiti da je tip E zapravo jača verzija običnog tipa olujnih uspora, tijekom kojih učinak vjetra nadilazi efekt nagiba dna i time podiže vodostaj podjednako s obje strane Jadrana.

I na kraju, razlike u meteorološkim uvjetima za dva marginalna tipa olujnih uspora, W i E, možemo sažeti kako slijedi. U usporedbi s tipom W, tip E je povezan s (i) dubljom sredozemnom ciklonom pomaknutom na sjever, (ii) intenzivnijim L-vjetrom duž istočne obale Jadrana u odnosu na suprotnu stranu, (iii) jačim T-vjetrom prema istočnoj obali na većem dijelu bazena, i (iv) potpunom odsutnošću T-vjetra na najsjevernijem kraju bazena.

3.4.4 Povezanost poprečnog nagiba morske površine i vjetra

Tlak zraka, vidjeli smo, djeluje na isti način na poprečni nagib razine mora u sva tri tipa olujnih uspora, podržavajući nagib prema zapadu. Stoga ćemo nadalje detaljno ana-

lizirati utjecaj vjetra. Ispitali smo tri karakteristike polja vjetra za pojedini tip olujnog uspora (slika 3.9) i način na koji kontoliraju nagib površine u poprečnom smjeru a to su: poprečna komponenta napetosti duž profila A (slika 3.3) na sjeveru (τ_{TA}) i duž profila B u srednjem Jadranu (τ_{TB}) te smicanje longitudinalne komponente napetosti duž profila B ($\frac{\partial \tau_{LB}}{\partial y}$). Profili su odabrani kako bi na najbolji način prikazali značajke kompozitnih polja vjetra za sva tri tipa. Napetosti τ_{TA} i τ_{TB} kvantificirane su pomoću srednjih vrijednosti duž profila. Smicanje L-napetosti izračunato je metodom najmanjih kvadrata pretpostavljajući linearnu promjenu duž profila B: $\tau_{LB} = a + by$, gdje je $b = \frac{\partial \tau_{LB}}{\partial y}$. S orijentacijom



Slika 3.9: Razdioba svojstava polja vjetra za tri tipa olujnih uspora: srednje vrijednosti T-napetosti na profilu A (*lijevo*), smicanje L-napetosti duž profila B (*sredina*) i srednje vrijednosti T-napetosti na profilu B (*desno*). Crni prikazi su rezultati kada se u obzir uzmu sve epizode, a plavi kada se isključe stršeće vrijednosti (epizode 15 i 30 u tipu W; epizode 2 i 22 u tipu O). Na vrhu grafa prikazan je broj epizoda u svakom tipu. Donja i gornja granica pravokutnika označava 25-ti odnosno 75-ti percentil, a crtkane linije minimalnu i maksimalnu vrijednost podataka. Poprečna linija unutar četverokuta označava medijan skupa.

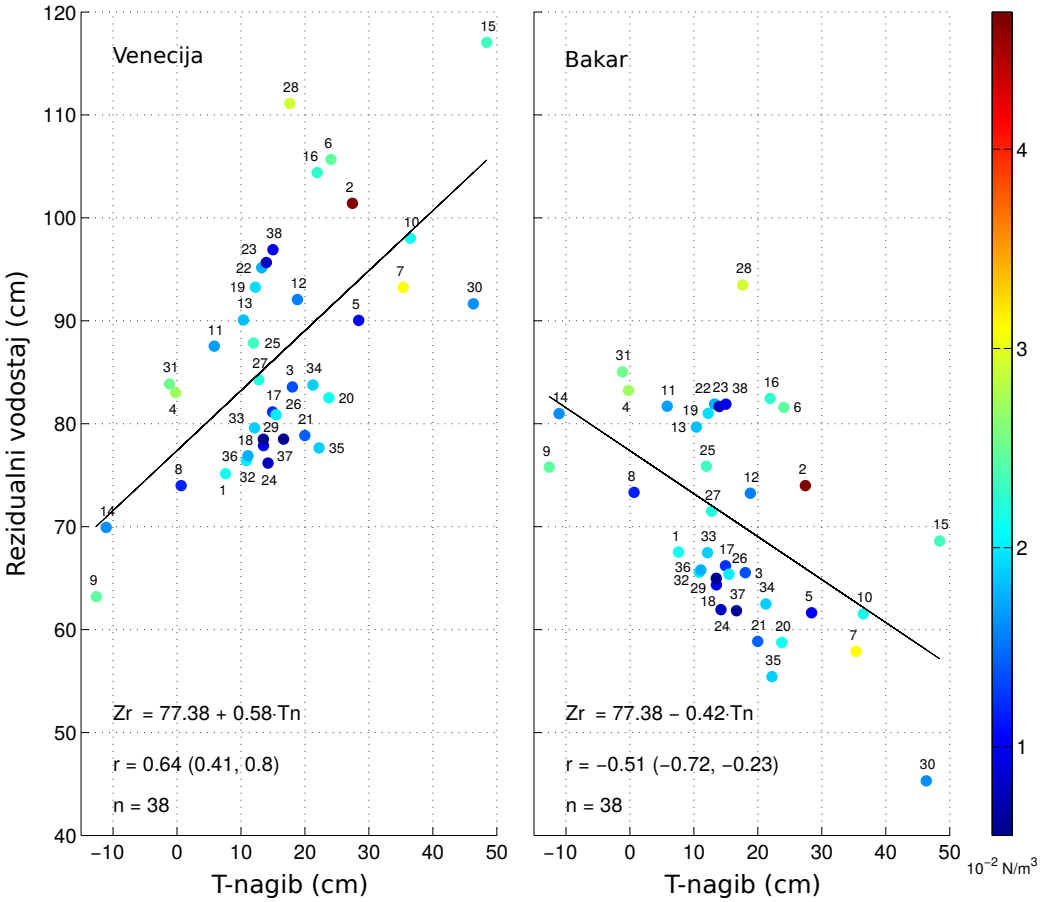
koordinatnog sustava kao na slici 3.3, situacije s jačim smicanjem L-napetosti, s većim brzinama duž istočne obale, odgovaraju negativnijim vrijednostima $b = \frac{\partial \tau_{LB}}{\partial y}$. Rezultati analize, prikazani na slici 3.9, podržavaju već spomenutu interpretaciju da nagib morske površine ne ovisi samo o vjetru prema toj obali (slika 3.9, *lijevo* i *desno*) već i o smicanju komponente paralelne s obalom (slika 3.9, *sredina*). Razlike između tipova ovdje su najočitije upravo kod smicanja L-napetosti: tip W olujnih uspora se dešava u situacijama uniformnog juga, ili čak s malo većim brzinama uz zapadnu obalu (pozitivne vrijednosti), dok je snažnije uzdizanje vode na istočnoj obali (tip E) uzrokovano izraženim smicanjem juga uz veće brzine u blizini istočne obale. Rasipanje rezultata je veliko zbog malog broja slučajeva u marginalnim tipovima. Kada se uklone stršeće vrijednosti, tip W se jasno izdvaja od ostala dva, dok razlika između tipova O i E nije tako oštra. Međutim, za svaki od tri navedena parametra, relativni položaji distribucija W, O i E (predočeni medijanima) sugestivni su i fizikalno očekivani.

3.5 Diskusija

3.5.1 Intenzitet olujnih uspora i poprečni nagib morske površine

Istražili smo formiranje poprečnog nagiba morske površine u Jadranu, koji se uspostavlja za vrijeme olujnih uspora, pod različitim meteorološkim uvjetima. Ovakav pristup problemu olujnih uspora u Jadranu je inovativan jer uzima u obzir njihov različit efekt duž suprotnih obala te utvrđuje atmosferske uvjete koji ga kontroliraju. Zašto je istraživanje T-nagiba u Jadranu bitno te kako nam razumijevanje njegovog nastanka može biti od praktične koristi? Poprečni nagib utječe na intenzitet olujnih uspora duž dviju suprotnih jadranskih obala i stoga diktira njihovu izloženost jačem poplavljivanju. Kada bi bazen bio uži, visina olujnog uspora bila bi jednoznačno određena nagibom morske površine duž glavne osi bazena (L-nagib) koji se uspostavlja djelovanjem jugoistočnog vjetra. Ali, geometrija Jadrana dopušta morskoj površini da se značajno naginje i u poprečnom smjeru. Stoga će visina olujnog uspora na pojedinoj obali biti određena kombinacijom dvaju uspostavljenih nagiba. Istražili smo odnos između T- i L-nagiba, pri čemu smo L-nagib procijenili kao srednju vrijednost opaženog rezidualnog vodostaja u Veneciji i Bakru, prešutno pretpostavivši da je na Otrantu rezidualni vodostaj jednak

nuli. Veza između T-nagiba i L-nagiba je slaba, koeficijent korelacije iznosi 0.12, što znači da se za istog uzdužnog nagiba mogu uspostaviti različiti nagibi u poprečnom smjeru. Prema tome, poznavanje atmosferskih uvjeta koji pogoduju da se uspostavi poprečni nagib površine mora pruža dragocijenu informaciju o tome koja će obala Jadrana, istočna ili zapadna, biti više izložena poplavljivanju. Utjecaj T-nagiba na intenzitet olujnih uspora ilustriran je na slici 3.10, gdje je prikazana ovisnost rezidualnog vodostaja na dvije postaje smještene na suprotnim stranama bazena o T-nagibu. Razina mora na određenoj obali općenito raste kako T-nagib raste prema toj obali. Povezanost je jača za zapadnu obalu (Venecija) koja je, za razliku od istočne (Bakar), izložena nesmetanom djelovanju vjetra. Veliki rasap rezidualnih vodostaja po epizodama, koji je dosta izražen, u rasponu



Slika 3.10: Regresija između rezidualnog vodostaja (Z_r) u Veneciji (*lijevo*) i Bakru (*desno*) i poprečnog nagiba morske površine (T_n). Koeficijenti korelacije izračunati su korištenjem svih 38 epizoda (n). U zagradi su dani 95-postotni intervali pouzdanosti. Simboli su obojani srednjim vrijednostima omjera napetosti vjetra i dubine bazena.

10 – 30 cm (tip O), objašnjava se činjenicom da se identičan T-nagib može razviti pod djelovanjem polja vjetra iste strukture, ali različitog intenziteta (na slici 3.10 intenzitet je prikazan omjerom napetosti vjetra i dubine usrednjenim preko bazena). Dobar primjer su epizode 3 i 28. Obje su se odvijale bez prisutnosti prethodno generiranog seša (tablica 3.1) što znači da su posljedica uzdizanja mora isključivo zbog olujnog uspora, induciranog promatranim meteorološkim poljima pa se stoga mogu lako usporediti. Epizode su generirane poljima gotovo iste strukture tipa O, ali različite snage (slike B.1 i B.2). Polje posljednje epizode obilježeno je brzinama vjetra većim od 14 m/s iznad cijelog Jadrana osim najsjevernijeg dijela, dok je u epizodi 3 maksimalna brzina vjetra, ograničena na manji prostor, bila manja od 14 m/s. Inače, spomenuta epizoda 28 izazvala je jedan od većih olujnih uspora u Jadranu koji je 1. studenoga 2012. poplavio većinu obalnih gradova – pogotovo one na istočnoj strani [53].

3.5.2 Metodološka pitanja

Ovdje ćemo komentirati određene aspekte analize. Prvo ćemo diskutirati položaj dviju postaja, Veneciju i Bakar, izabranih da predstavljaju dvije suprotne obale, pri čemu je Venecija smještena bliže zatvorenom kraju bazena (slika 3.3). Potencijalni problem pri interpretaciji rezultata je L-nagib, uspostavljen tijekom jugoistočnog vjetra u manjoj ili većoj mjeri, koji bi se lako mogao interpretirati kao T-nagib. Ovo je neizbježno ako podaci potječu s postaja smještenih na različitim lokacijama uzduž bazena. Alternativno smo mogli koristiti stanice Ravenna i Bakar, razmještene okomito na glavnu os bazena, pri čemu bi se spomenuti problem minimizirao. Međutim, mareografska stanica Ravenna, za razliku od Venecije i Bakra, nema kontinuirani niz vodostaja mjerenog u odnosu na jedinstveni referentni nivo [40]. Iz tog razloga korištene su postaje Venecija i Bakar čiji su nizovi kontinuirani, kvalitetni, pokrivaju dug vremenski period i mjereni su u odnosu na jedinstvene mareografske nule. Stoga ovdje pri interpretaciji dobivenih rezultata treba imati na umu da će procijenjeni T-nagib uvijek sadržavati i određeni doprinos L-nagiba.

Način klasificiranja također zaslužuje komentar. Olujne uspore smo kategorizirali prema uspostavljenom poprečnom nagibu morske površine te smo zatim izračunali pripadna prosječna meteorološka polja. Ovo je bilo potrebno kako bi se detektirala prostorna varijabilnost prinudnih polja, potrebna da se proizvede značajno različit odziv vodostaja

duž dvije obale. Ali, jesu li ovi kompoziti dobra reprezentacija pojedinih atmosferskih uvjeta iz kojih su izračunati? Vizualnom provjerom svih meteoroloških polja utvrdili smo da ona unutar određenog tipa u velikoj mjeri dijele iste značajke. Stoga smatramo da su kompoziti dobri predstavnici stvarnih meteoroloških uvjeta jer su izračunati iz sličnih atmosferskih polja. Posljedično, možemo kazati da sve primijećene atmosferske značajke određenog tipa moraju biti prisutne da bi se generirao određeni tip poplave. Jedine dvije epizode koje odstupaju od ovog pravila su epizode 15 i 30. Prema svom T-nagibu obje pripadaju tipu W olujnih uspora. Štoviše, najviši zabilježeni nagibi formirani su tijekom ove dvije epizode kada je vodostaj u Veneciji nadmašio onaj u Bakru za približno pola metra (slika 3.10). Uz to je epizoda 15 rezultirala najvišim olujnim usporom u Veneciji, kad je dosegnut nivo od skoro 120 cm. Ipak, njihove meteorološke situacije imaju mnogo više sličnosti s onima koje pripadaju tipu O (epizoda 30, slika B.3) ili čak tipu E (epizoda 15, slika B.4), pa nije sasvim jasno kako je tako strm T-nagib mogao biti uspostavljen u ovakvim uvjetima. Prethodno generirani seši nisu mogli biti uzrok jer nisu bili aktivni u to vrijeme (tablica 3.1). Druga mogućnost je da su se uspostavili vrlo strmi nagibi uzduž bazena, što meteorološka polja nameću kao logično, a mi smo ih interpretirali kao poprečene nagibe (zbog položaja postaja). U ovom slučaju, i pod pretpostavkom da su atmosferska polja točna, očekivali bismo da će se simulirani T-nagib slagati s opaženim. Međutim, iz slike 3.5 vidimo da simulacije jako podcjenjuju T-nagib za obje epizode, pogotovo u slučaju 6-satnih prinudnih polja. Zbog toga je vrlo vjerojatno da meteorološka polja za epizode 15 i 30 nisu ispravno reproducirana. Također, vrlo je moguće da ERA-Interim nije uspjela uhvatiti obrasce strujanja i za epizode 2 i 22. Kao što tablica 3.1 sugerira, kada se prebacimo s ERA6h na ERA3h polja, vremenski razmak između forsiranja i opaženih maksimuma vodostaja smanjuje se s 9 h na 6 h pri čemu simulacije epizoda 2 i 22 gube na kvaliteti (slika 3.5). Ovakav rezultat možemo jedino objasniti time da realni atmosferski uvjeti nisu adekvatno reproducirani meteorološkim modelom.

I konačno, prethodna diskusija dovela nas je do posljednje teme – prihvatljivost korištenih meteoroloških podataka za ovakvu studiju. Nad Jadranom generalno postoje dva režima iznimnog strujanja – jugo i bura. Jugo je vjetar velike prostorne skale, dok se kod bure javljaju dobro razvijene strukture manjih dimenzija. Kao što je pokazano na slici 3.7, jadranski olujni uspori razvijaju se u prisutnosti oba režima (tip W) ili djelo-

vanjem samo juga (tipovi O i E). Pitanje je sljedeće: možemo li podatke ERA-Interim, s rezolucijom od 80 km u našim širinama, koristiti kada je potrebno razlučiti značajke polja manje skale kao što je to u slučaju bure na sjeveru ili smicanja juga u središnjem dijelu bazena. Dobro je poznato (npr. [34] i [54]) da globalni cirkulacijski modeli (engl. *Global Circulation Model*, GCM), uključujući ECMWF-ov model korišten ovdje, zbog grube rezolucije ne uspijevaju ispravno opisati lokalnu topografiju i njen utjecaj na strujanje, pa stoga rezultiraju prostorno izglađenijim poljima nego u slučaju kada se koristi model ograničenog područja (engl. *Limited area model*, LAM). Problem je izraženiji nad bazenima okruženima kompleksnom orografijom kao što je Jadran. Važno pitanje je – u kojoj mjeri bi naši rezultati bili izmijenjeni da smo koristili prizemni vjetar iz nekog od dostupnih LAM modela? U jednoj zanimljivoj studiji [55] izvedeno je modeliranje prošlih epizoda (engl. *hindcast*) prizemnog vjetra iznad Sredozemlja s prostornom rezolucijom od 15 km. Simulacije su provedene za razdoblje 1989. – 2009. modelom WRF-ARW pri čemu su početni i rubni uvjeti uzeti iz ERA-Interim-a. Rezultati studije mogu se sumirati kako slijedi. Na osnovi usporedbe sezonske klimatologije globalnog modela i modela fine rezolucije, jasno je da model bolje rezolucije uspijeva reproducirati detalje cirkulacije te da daje veće brzine. Iznad Jadrana, polja ERA-Interim su prilično uniformna s vidljivim maksimumom uz istočnu obalu u zimskoj sezoni (prosinac-siječanj-veljača). S druge strane, polja visoke razlučivosti pokazuju jači kontrast brzine između dviju obala tijekom svih godišnjih doba. Kvaliteta dobivenog vjetra evaluirana je pomoću satelitskih mjerenja uzimajući sve podatke zajedno, bez sezonske dekompozicije. Pokazalo se da je u Jadranu povećanje rezolucije dalo slabije rezultate u odnosu na ostale bazene u Sredozemlju, ali ipak malo bolje u odnosu na ERA-Interim. Razlog tome je kompleksna topografija i razvedenost obale koje su očito izazov čak i za model rezolucije 15 km. Ovo je potvrdila studija [56] gdje su uspoređeni vjetar iz modela ALADIN te vjetar iz globalnog modela IFS sa satelitskim podacima iznad Jadrana. Slijedom navedenog, sumnjamo da bi vjetar dobiven modelom LAM promijenio bit naših rezultata, ali bi ih sigurno modificirao. Intenzitet bure bi bio veći [56] što je također razumno pretpostaviti za smicanje juga. Drugi argument koji daje prednost poljima ERA-Interim je njihova sposobnost da reproduciraju pravi slijed događaja sinoptičkih situacija. Istraživanje [57] pokazalo je da ERA-Interim, u usporedbi s ostalim dostupnim reanalizama dobivenima regionalnim modelima, ima

najveći vremenski koeficijent korelacije. To znači da bi broj stršećih vrijednosti u našem istraživanju (epizode 2, 15, 22 i 30) bio sigurno veći da smo koristili neki drugi skup meteoroloških podataka. Konačno, zaključujemo da su polja ERA-Interim dovoljno kvalitetna za našu primjenu u odnosu na uloženi trud i dobivenu korist.

Poglavlje 4

Promjene opasnih epizoda vjetra u budućoj klimi

U prethodnom smo poglavlju odredili meteorološke uvjete koji uzrokuju poplavljivanje zapadne odnosno istočne obale Jadrana. Ovdje ćemo ispitati njihova svojstva u sadašnjoj te budućoj klimi koristeći veliki skup simulacija iz tri regionalna klimatska modela. Na taj način saznat ćemo koji oblik polja vjetra će prevladavati u budućoj klimi odnosno hoće li hrvatsku obalu češće pogađati poplave i kakvog će biti intenziteta.

U prošlom poglavlju smo kvalitativno odredili bitne karakteristike polja vjetra koje određuju koja će obala biti poplavljena. Sada je potrebno te spoznaje pretočiti u algoritme pomoću kojih ćemo, iz povijesnih simulacija, a potom iz projekcija, izdvojiti epizode koje su opasne za poplavljivanje.

Prije nego pristupimo samoj analizi potrebno je (i) testirati algoritam da vidimo da li uspješno izdvaja ugrožavajuće epizode te (ii) vidjeti da li regionalni model koji ćemo upotrijebiti za analizu buduće klime dobro reproducira bivše događaje (tzv. evaluacijsko razdoblje).

Algoritam je prvo primijenjen na ERA-Interim podatke, a izdvojene epizode uspoređene su s doista realiziranim epizodama. Potom je isti algoritam primijenjen na simulacije regionalnim klimatskim modelom za evaluacijsko razdoblje i izdvojene epizode uspoređene su s onima iz ERA-Interim. Potom se postupak provodi na simulacijama za povijesno razdoblje i za projekcije te se analiziraju promjene u nastupu i intenzitetu opasnih epizoda koje možemo očekivati u budućnosti.

4.1 Baza podataka i statističke metode

Za analizu klimatske varijabilnosti potencijalno opasnih epizoda vjetra, u sadašnjoj i budućoj klimi, korišteni su podaci prikazani u tablici 4.1. Nizovi rezidualnog vodostaja preuzeti su iz prethodnog poglavlja. Polja prizemnog vjetra analizirana su uzevši u obzir četiri skupa podataka: reanalizu ERA-Interim te rezultate simulacija tri regionalna klimatska modela – ALADIN52 [15], RCA4 [16] i RegCM4 [17]. Vjetar iz ERA-Interim linearno je interpoliran na mrežu $0.25^o \times 0.25^o$ što je u našim širinama oko 25 km, dok je prostorna rezolucija regionalnih klimatskih modela 12.5 km. Simulacije modelima RegCM4 i RCA4 obavljene su prema protokolu EURO-CORDEX [58], [59], dok su simulacije modelom ALADIN52 obavljene prema protokolu Med-CORDEX [60]. Osnovna razlika između ovdje analiziranih simulacija jest u veličini domene, a to je čitava Europa u EURO-CORDEX-u, odnosno šire područje Sredozemlja u Med-CORDEX-u. Kao početni i rubni uvjeti za navedene regionalne klimatske modele korišteni su rezultati CMIP5 [61] globalnih klimatskih modela: (1) CNRM-CM, (2) MPI-ESM-MR/LR, (3) HadGEM2-ES,

Tablica 4.1: Nizovi razine mora i polja prizemnog vjetra iz različitih baza podataka. Prvi stupac označava skupove podataka: izmjereni vodostaj, reanaliza i rezultati simulacija regionalnim klimatskim modelima s pripadajućim početnim i rubnim uvjetima. Podaci su dostupni za razdoblja navedena u drugom, trećem i četvrtom stupcu. U zadnja dva stupca naznačene su vremenske i prostorne rezolucije svakog skupa podataka.

Podaci/ modeli	Opažanja/ reanaliza/ evaluacija	Povijesno	Projekcije rcp4.5/rcp8.5	Vremenska rezolucija	Prostorna rezolucija
Razina (Venecija/Bakar)	1984. – 2014.			1 h	
ERA-Interim	1984. – 2014.			6 h	~80 km
ALADIN52	1984. – 2012.	1971. – 2000.	2041. – 2100.	3 h	12.5 km
CNRM-CM5					
RCA4	1984. – 2010.	1970. – 2005.		6 h	12.5 km
CNRM-CM5			2041. – 2100.		
MPI-ESM-LR			2041. – 2100.		
HadGEM2-ES			2041. – 2099.		
EC-EARTH			2041. – 2100.		
IPSL-CM5			2041. – 2100.		
RegCM4	1984. – 2014.	1970. – 2005.	2041. – 2070.	3 h	12.5 km
CNRM-CM5					
MPI-ESM-MR					
HadGEM2-ES					
EC-EARTH					

(4) EC-EARTH i (5) IPSL-CM5. Za ALADIN52 dostupne su simulacije forsirane globalnim klimatskim modelom (1), za RCA4 od (1) do (5) te za RegCM4 od (1) do (4). Polja vjetra analizirana su prema dostupnosti za razdoblje 1970. – 2070. za RegCM4, odnosno 1970./1971. – 2099./2100. za druga dva modela. Do simulirane 2005. godine globalni i regionalni klimatski modeli koriste izmjerene koncentracije stakleničkih plinova, a za razdoblje poslije 2005. pretpostavljena su dva scenarija prema IPPC-u: RCP4.5 i RCP8.5 [62].

Kako bi se ispitala značajnost razlika između simulacija, budućih naspram povijesnih, korišten je neparametarski statistički Wilcoxon-Mann-Whitney test (WMW test) [63]. Test se koristi za varijable kod kojih se ne očekuje normalna distribucija, a ispituje hipotezu koja kaže: podjednako je vjerojatno da nasumično odabrana vrijednost iz prvog skupa bude manja/veća od nasumično odabrane vrijednosti iz drugog skupa. Test uspoređuje razdiobe dva skupa te ocjenjuje jesu li one signifikantno različite. S obzirom na formulaciju, moguće je da za dva skupa s istim ili vrlo sličnim mjerama distribucije (npr. medijanom), WMW ispit rezultira značajnom razlikom između njih. Dakle ovim testom moguće je procijeniti jesu li dva skupa podataka značajno različita, ali ne možemo znati kolika je ta promjena. Zato smo prethodnu informaciju dopunili još jednom mjerom, tzv. Perkinsovim pokazateljom klimatske promjene (PCC). On se određuje koristeći Perkinsov pokazatelj uspješnosti (engl. *Perkins skill score*, PSS) na način da je $PCC = 1 - PSS$. Perkinsov pokazatelj uspješnosti uveden je u [64], a računa se prema relaciji

$$PSS = \sum_{1}^{n} \min(H_o, H_p), \tag{4.1}$$

gdje je n broj razreda korišten za izračun histograma, H_o je relativna frekvencija vrijednosti u određenom razredu za povijesno razdoblje, a H_p relativna frekvencija vrijednosti u određenom razredu za projicirano razdoblje. PSS je mjera sličnosti dviju razdioba, bazirana na relativnim histogramima. Stoga se PCC može smatrati vjerojatnošću da nastupi klimatska promjena određenog svojstva. PCC je za ovu potrebu podijeljen u razrede kojima su pridruženi sljedeći atributi: mala vjerojatnost promjene (za vrijednosti 0 – 0.3), umjerena vjerojatnost promjene (za vrijednosti 0.3 – 0.6) i velika vjerojatnost promjene (za vrijednosti 0.6 – 1).

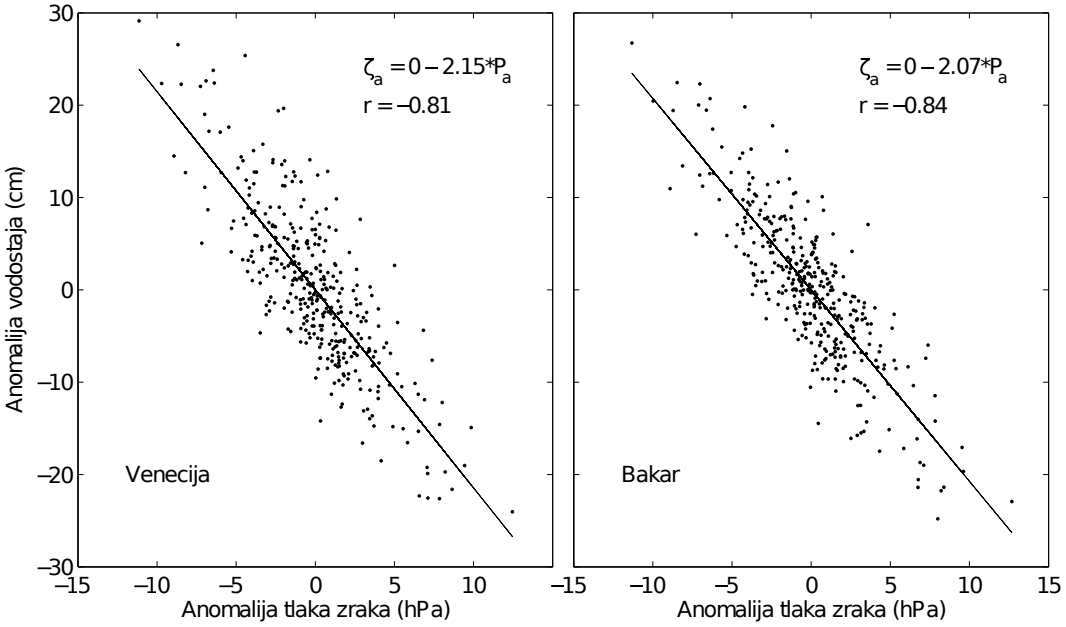
4.2 Prilagodba algoritama i izdvajanje epizoda

Važan korak za daljnju analizu je izrada algoritama kojima će se vjerno izdvojiti meteorološke situacije koje su odgovorne za opažene poplave. U tu svrhu potrebno je koristiti polja vjetra za koja se pouzdano zna da dobro reproduciraju obrasce strujanja nad Jadranom. Zbog toga je odabrana reanaliza ERA-Interim za koju je više puta pokazano da, unatoč svojoj gruboj rezoluciji iznad jadranske regije (oko 80 km), uspješno prikazuje strujanja i to s iznimnim vremenskim koeficijentom korelacije [55], [56], [57]. Nakon što se algoritmi podese na poljima vjetra iz reanalize ERA-Interim, primijenit će se u identičnom obliku na simulacije regionalnim klimatskim modelima. U ovom potpoglavlju bit će opisane metode kojima su definirane (i) epizode na temelju razine mora (razinske epizode) i (ii) epizode na temelju polja vjetra (vjetrovne epizode) te (iii) klasificirane vjetrovne epizode. Također će se demonstrirati uspješnost kreiranih algoritama.

4.2.1 Izdvajanje razinskih epizoda

Postupak izdvajanja iznimnih olujnih uspora vrlo je sličan onom opisanom u prethodnom poglavlju s jednom bitnom razlikom. Ovdje je iz početnih nizova uklonjen porast srednje razine mora uslijed procesa koji nisu povezani s direktnim atmosferskim djelovanjem. Naime, izdvojene razinske epizode koristit će se u podešavanju algoritama za izdvajanje epizoda vjetra, stoga je bitno u razini ostaviti samo one komponente koje potječu od atmosferskog djelovanja.

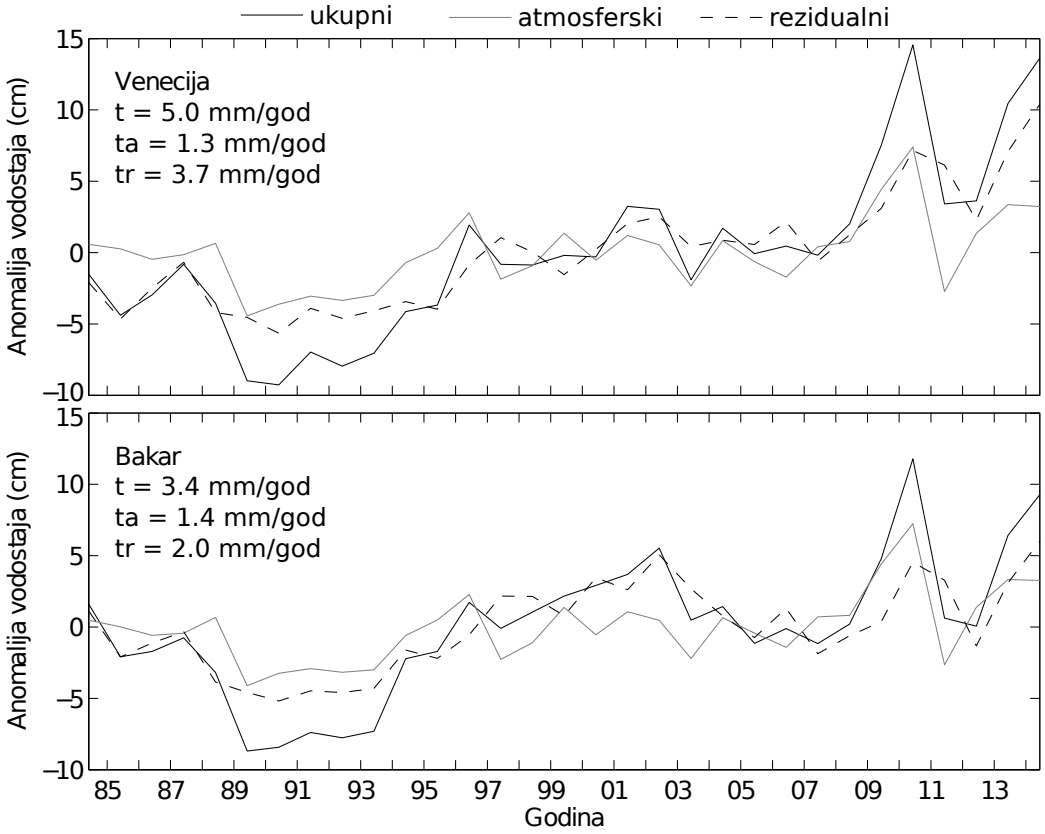
Trendom srednje razine mora koja se registrira mareografom upravljaju procesi različitog porijekla. To su termohalini procesi (sterički doprinos), procesi koji dovode do promjene mase vode, vertikalni pomaci tla te direktno djelovanje tlaka zraka i vjetra. Kako bi se iz vodostaja uklonio trend kojeg kontroliraju prva tri procesa, primijenjena je metoda opisana u [65]. Ukratko, atmosferski utjecaj na trend srednje razine mora izračunat je pomoću regresijske analize između anomalija vodostaja i pripadnih anomalija tlaka. Tlak zraka za dvije promatrane mareografske postaje preuzet je iz ERA-Interim baze u točkama najbližim traženim lokacijama. Prvo su iz početnih nizova tlaka zraka i vodostaja izračunati mjesečni prosjeci i pripadni godišnji hodovi. Zatim su iz mjesečnih prosjeka uklonjeni godišnji hodovi i na dobivenim anomalijama razine mora i tlaka zraka (ζ



Slika 4.1: Regresijska analiza mjesečnih anomalija tlaka zraka i vodostaja u Veneciji i Bakru za period 1984. – 2014.

odnosno P_a) provedena je linearna regresija (slika 4.1). Vodostaj se očigledno prilagođava odzivom (-2 cm/hPa) puno jačim od inverznog barometra što je rezultat koherentnog djelovanja tlaka zraka i vjetra [66]. Nadalje, koeficijenti prilagodbe iskorišteni su za izračun anomalija razine izazvanih atmosferskim djelovanjem (ζ_a, $\zeta_a = a + b \times P_a$) te za izračun korigiranih anomalija koje su izazvane procesima neatmosferskog porijekla ($\zeta_c = \zeta - \zeta_a$). I konačno, dobivene komponente vodostaja svedene su na godišnje prosjeke na kojima su određeni linearni trendovi (slika 4.2).

Brzina ukupnog porasta srednje razine mora veća je u Veneciji (5.0 mm/god) nego u Bakru (3.4 mm/god). Trend atmosferskog porijekla sličnog je iznosa (1.3 mm/god), što je za očekivati s obzirom na malu prostornu udaljenost postaja, pa je i trend razine uslijed neatmosferskog djelovanja veći u Veneciji. Uzrok razlici između trendova može biti spuštanje tla u Veneciji (što ima efekt porasta razine jer se vodostaj mjeri u odnosu na kopno). Iako je subsidencija tla u Veneciji bila najizraženija 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća, nedavna studija [67] pokazala je da se spuštanje još uvijek odvija. Satelitskim mjerenjima određena je brzina subsidencije šireg središta grada za dva kraća razdoblja, 1992. – 2002. i 2003. – 2010., koja je iznosila -0.8 ± 0.7 mm/god, odnosno -1.0 ± 0.7 mm/god. Spuštanje je objašnjeno činjenicom da je Venecija izgrađena na



Slika 4.2: Godišnje anomalije razine mora u Veneciji i Bakru: ukupne (puna crna linija), atmosferski uvjetovane (puna siva linija) i bez utjecaja atmosfere (crtkana crna linija). Navedeni su iznosi linearnih trendova za ukupni vodostaj (t), atmosferski uvjetovani vodostaj (ta) te za rezidualni vodostaj (tr).

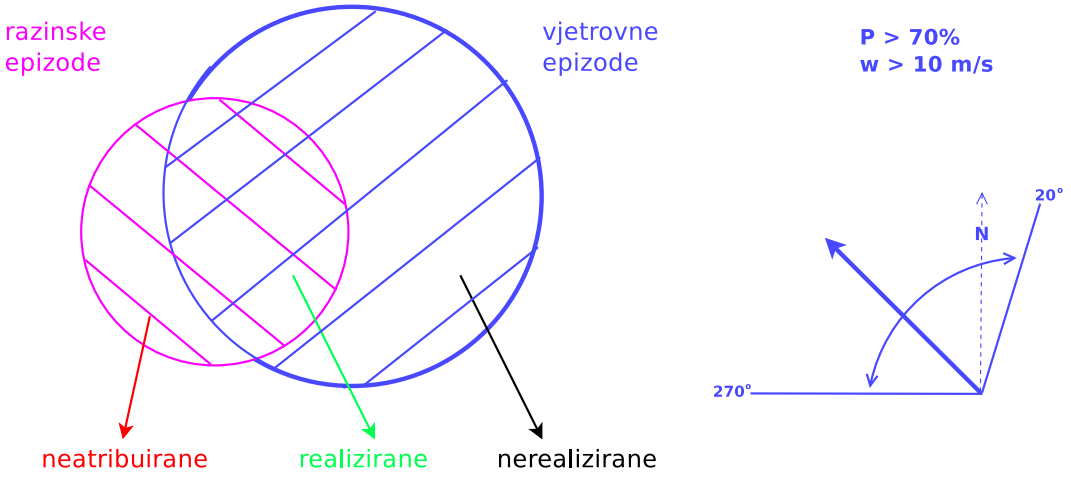
mekoj pjeskovito-glinovitoj podlozi pa grad prirodno tone, ali postoje i razni antropogeni uzroci kao što je izvođenje većih građevinskih radova (npr. izgradnja brane MOSE). Ova studija ne objašnjava u cijelosti razliku trendova u Veneciji i Bakru, ali objašnjava njezin predznak.

I na kraju, dobiveni trendovi srednje razine mora uzrokovani neatmosferskim procesima uklonjeni su iz izmjerenih vodostaja. Zatim su izdvojene iznimne epizode olujnih uspora primjenom praga na novonastalim nizovima (99.95-i percentil, 71.84 cm). Ostatak provedene procedure isti je kao u prethodnom poglavlju.

4.2.2 Izdvajanje vjetrovnih epizoda

Za izdvajanje potencijalno opasnih vjetrovnih epizoda, ovdje iz podataka ERA-Interim, a poslije iz simulacija tri regionalna klimatska modela, korišteni su uvjeti o

smjeru i brzini vjetra. Prvo se zahtjeva da iznad 70% površine Jadrana puše vjetar iz jugoistočnog kvadranta ili dijela jugozapadnog kvadranta (slika 4.3, *desno*). Iznad ostatka bazena dozvoljeno je da puše vjetar bilo kojeg smjera. Na izdvojene događaje zatim se primjenjuje uvjet o brzini tj. ostavljaju se samo oni čija srednja brzina premašuje 10 m/s. Događaji u nizu grupiraju se u jednu epizodu, a nezavisne epizode definiraju se kao one razdvojene s najmanje 24 sata; iz niza s poljem vjetra, ono polje karakterizirano maksimalnom srednjom brzinom odabire se da predstavlja pojedinu nezavisnu epizodu. Na slici 4.3 (*lijevo*) ilustriran je princip na temelju kojega su odabrani navedeni kriteriji. Uvjeti su definirani na način da se dva nezavisna skupa podataka, epizode izdvojene direktno iz vodostaja (razinske epizode) i epizode izdvojene direktno iz vjetra (vjetrovne epizode), optimalno preklapaju. Dakle, prvo smo zadali preliminarne uvjete koji su se odnosili na smjer vjetra, postotak površine bazena iznad koje se taj smjer zahtjeva (P) te na minimalnu srednju brzinu vjetrovnih epizoda (w). Zatim smo varirali uvjete pri čemu smo pratili utjecaj promjene na odnos broja realiziranih, neatribuiranih i nerealiziranih epizoda (za definiciju vidjeti sliku 4.3, *lijevo*). Ovdje smo inzistirali da snižavanjem kriterija (npr. smanjivanjem minimalne srednje brzine vjetra) poraste broj realiziranih epizoda, a isto-



Slika 4.3: *Lijevo*: skica objašnjava postupak odabira kriterija za izdvajanje vjetrovnih epizoda. Definirane su tri kategorije epizoda – realizirane (opažene u podacima vjetra i razine), nerealizirane (opažene samo u podacima vjetra) i neatribuirane (opažene samo u nizovima vodostaja). Postupak se temelji na optimalnom preklapanju dva skupa epizoda, a rezultirao je uvjetima prikazanima na desnom dijelu grafa. *Desno*: dozvoljeni smjerovi vjetra iznad barem 70% površine bazena (P) i zadane minimalne brzine (w).

vremeno broj nerealiziranih ostane stabilan tj. ne poraste značajno. Kriteriji su testirani subjektivnom metodom pa ćemo ovdje dati primjer kako bi pojasnili proceduru. Početni uvjeti definirali su vjetrovnu epizodu kao događaj kod kojeg je vjetar jugoistočnog smjera iznad najmanje 75% bazena pri čemu je srednja brzina vjetra veća od 11 m/s. Ovime je izdvojeno 89 vjetrovnih epizoda, a usporedbom sa skupom razinskih epizoda utvrđeno je 25 realiziranih i 64 nerealizirane vjetrovne epizode te 13 neatribuiranih razinskih epizoda. S obzirom da su ovako definirani uvjeti rezultirali malim brojem realiziranih događaja (25 od mogućih 39) bilo je nužno sniziti kriterije tako da detektiramo veći broj razinskih epizoda. Stoga je minimalna brzina vjetra snižena na 10 m/s. Također, uočeno je da uvjet na smjer vjetra (na početku je bio dozvoljen vjetar samo iz jugoistočnog kvadranta) ograničava polja tipa E koja mogu imati izraženu poprečnu komponentu vjetra (vidi potpoglavlje 3.4.3). Iz ovog razloga dozvoljen je širi raspon smjerova vjetra odnosno vjetar iz jugoistočnog i dijela jugozapadnog kvadranta i to iznad 70% površine bazena. Ovako definirani uvjeti, vjetar iz jugoistočnog i dijela jugozapadnog kvadranta iznad 70% površine bazena srednje brzine veće od 10 m/s, pokazali su se optimalnim jer bi daljnje snižavanje kriterija rezultiralo iznimno velikim brojem nerealiziranih epizoda na račun malog broja realiziranih.

Vjetrovna epizoda je proglašena realiziranom ako je nastupila u intervalu od 26 sati prije do 26 sati nakon razinske epizode. Svim vjetrovnim epizodama pridružene su dugoperiodičke (Z_{lp}) i kratkoperiodičke ($Z_r - Z_{lp}$) komponente vodostaja u Veneciji i Bakru. Dugoperiodička komponenta je određena kao u poglavlju 2, tj. primjenom niskopropusnog digitalnog filtra (uz točku polupropusta na 10 dana), dok se kratkoperiodička komponenta definira kao varijabilnost vodostaja kada se iz rezidulanog vodostaja (Z_r) ukloni dugoperiodička komponenta (Z_{lp}). Kratkoperiodičku komponentu čine procesi olujni uspor i seš, ako je prethodno bio generiran. Pripadne komponente su ocijenjene uvažavajući vrijeme odziva razine mora na atmosfersko prinudno djelovanje, kao doprinosi u trenutku maksimuma rezidualnog vodostaja koji je nastupio najkasnije 12 sati nakon termina vjetrovne epizode. Vremenski intervali, 26 sati i 12 sati, određeni su subjektivnom metodom testirajući veći skup mogućih vrijednosti. Zatim, za svaki je događaj procijenjeno je li bio pod utjecajem prethodno generiranog seša koji je također mogao utjecati na visinu vodostaja. Prisutnost seša ocijenjena je subjektivnom metodom – vizualnom provjerom

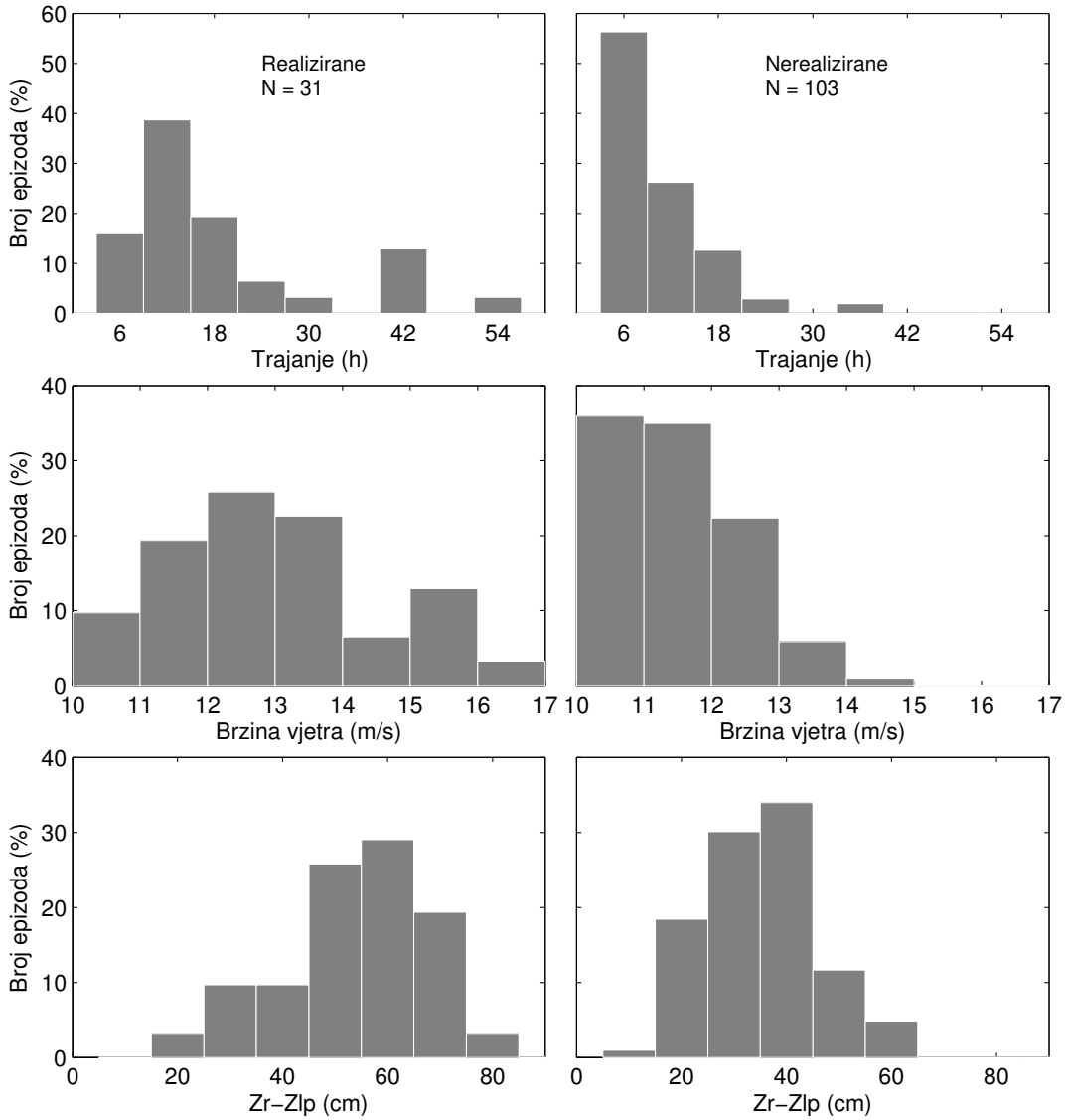
nizova vodostaja ispitano je jesu li bili prisutni nagli skokovi u kratkom periodu (oko 3 dana) prije glavnog maksimuma i s očitim oscilacijama nakon toga.

4.2.3 Pregled izdvojenih epizoda

Prema opisanim procedurama izdvojeno je 39 razinskih i 134 vjetrovne epizode. Skup razinskih epizoda razlikuje se u manjoj mjeri od onoga u poglavlju 3. Naime, uklanjanjem trenda srednje razine mora izgubili smo dvije epizode pri kraju razdoblja i dobili tri na početku pa se novi skup razlikuje za 5 epizoda od staroga. Skup vjetrovnih epizoda sastoji se od 31 realiziranog i 103 nerealizirana događaja, izdvojena iz polja vjetra ERA-Interim, uz pomoć mareografskih podataka (slika 4.3, *lijevo*).

Za očekivati je da se sve vjetrovne epizode neće manifestirati kao visoki vodostaji jer na njihovo formiranje ne utječe isključivo trenutna atmosferska situacija već i prilike koje su joj prethodile. Karakteristike polja vjetra te stanje morske razine na koju ono djeluje određuje kako će se meteorološka situacija odraziti na vodostaj. Slika 4.4 prikazuje osobine izdvojenih vjetrovnih epizoda i pripadnu morsku razinu. U realiziranim epizodama u pravilu vjetar postiže veću brzinu a i dulje traje, što se onda očituje u jačem podizanju vodostaja. S druge strane, više od 50% nerealiziranih epizoda trajalo je svega 6 sati (detektirane su u jednom terminu) te su im brzine većinom malo premašile donju graničnu vrijednost. Visina odgovarajućeg vodostaja u njihovom slučaju iznosila je uglavnom manje od 40 cm.

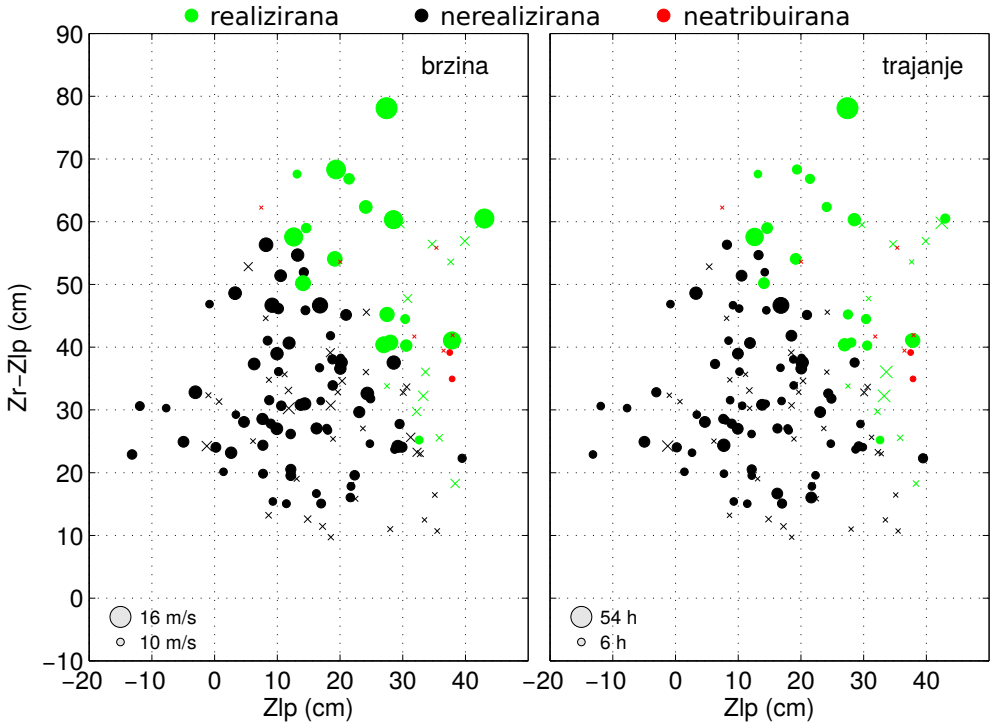
Vjetrovne epizode superponirale su se na različita stanja u moru koja kontroliraju procesi na različitim vremenskim i prostornim skalama. To se jasno vidi na slici 4.5 gdje su prikazane realizirane i nerealizirane vjetrovne epizode te neatribuirane razinske epizode s pripadnim dugoperiodičkim (Z_{lp}) i kratkoperiodičkim ($Z_r - Z_{lp}$) komponentama vodostaja. Očito je grupiranje vjetrovnih događaja – kao visoki vodostaji realizirale su se one epizode kod kojih je vodostaj već bio povišen zbog atmosferskih procesa na planetarnoj skali. Utjecaj ovih procesa, kao onih koji stvaraju dugotrajne preduvjete za pojavu iznimno visokih vodostaja u sjevernom Jadranu, poznat je od prije i detaljno je istražen u radovima [9] i [10]. Također, u nekim slučajevima u moru su već bile aktivne oscilacije jadranskog seša pa su one dodatno povisile ili snizile, ovisno o relativnoj fazi, vodostaj generiran izravnim atmosferskim djelovanjem. S druge strane, neatribuirane



Slika 4.4: Relativni histogrami trajanja i brzine vjetra te pripadnih vodostaja za realizirane (*lijevo*) i nerealizirane (*desno*) vjetrovne epizode. Prikazani vodostaj podrazumijeva kratkoperiodički dio signala tj. olujni uspor i seš, ako je prethodno bio generiran (postaja Venecija).

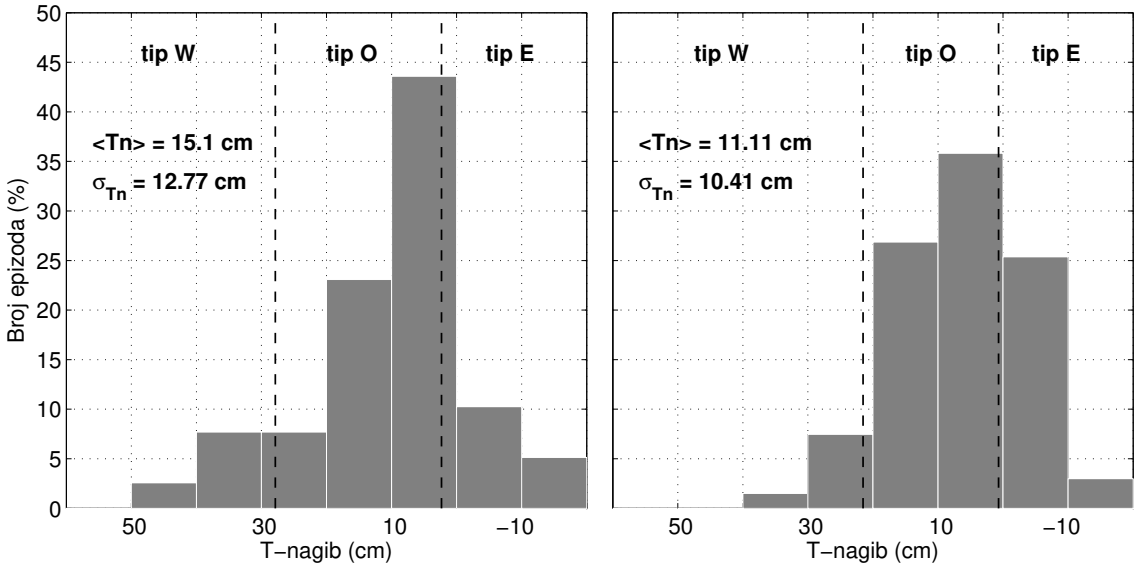
razinske epizode rezultat su djelovanja vjetra manjih amplituda na uglavnom iznimno povišen vodostaj uzrokovan planetarnim procesima ili oscilacijama postojećeg jadranskog seša. U prilogu (slika C.1) prikazani su vodostaji za odabrane epizode kako bi se ilustrirala ova zapažanja.

Kako bi se uvjerili da smo predloženim procedurama zaista izdvojili epizode vjetra koje generiraju razdiobu morske razine u Jadranu kakva je primijećena u najvišim izmjerenim vodostajima, usporedili smo relativne histograme poprečnih nagiba razine mora



Slika 4.5: Planetarna (Z_{lp}) i kratkoperiodička ($Z_r - Z_{lp}$) komponenta razine mora na postaji Venecija za vjetrovne i neatribuirane razinske epizode. Potonja se može smatrati odzivom razine na zajednički učinak olujnog uspora i eventualnih postojećih oscilacija jadranskog seša. Veličina simbola označava brzinu odnosno trajanje vjetra (ERA-Interim). Križićima su naznačeni događaji kojima je prethodio seš.

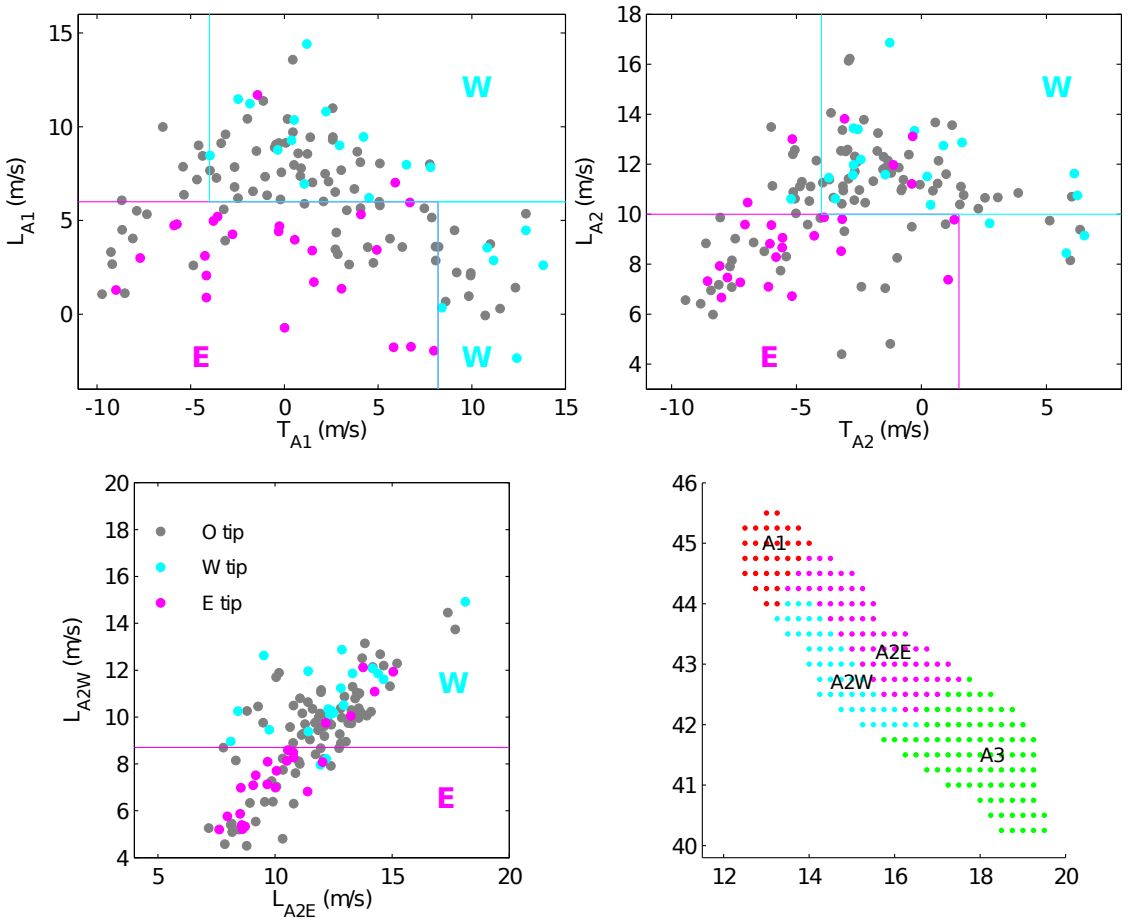
(odnosno razlike rezidulnog vodostaja u Veneciji i Bakru) u razinskim i vjetrovnim epizodama (slika 4.6). Moguće je, s obzirom na raspon dozvoljenih kuteva vjetra (slika 4.3, *desno*), da (ni)smo ograničili određene oblike polja koji se javljaju iznad bazena a (ne)bitni su za našu analizu. Gledajući dvije razdiobe, jasno je da vrlo nalikuju jedna drugoj s nagibima raspoređenima oko bliskih srednjih vrijednosti te sa sličnim standardnim devijacijama. Razlike su minorne, a očituju se u zastupljenosti određenih nagiba – kod vjetrovnih epizoda nedostaju iznimni pozitivni nagibi (oko 50 cm) te je povećan udio epizoda s negativnim nagibom (viši vodostaj u Bakru). Ova neslaganja, koja su zaista malena, ne moraju nužno potjecati od podcjenjivanja/precjenjivanja određenih oblika vjetra, nego od načina na koji je vodostaj pridruživan svakom maksimumu vjetra. Naime, treba imati na umu da vrhunci vodostaja nastupaju nakon maksimuma vjetra s različitim vremenskim posmakom. Budući da je ovdje posmak ograničen na najviše 12 sati, moguće je da smo time kod nekih epizoda precijenili/podcijenili stvarni nagib.



Slika 4.6: Distribucije poprečnog nagiba (T-nagib) morske razine za razinske (*lijevo*) i vjetrovne epizode (*desno*). Granice između tipova naznačene su vertikalnim linijama, a dobivene su kao odstupanja od srednjeg nagiba ($< Tn >$) za jednu standardnu devijaciju (σ_{Tn}).

4.2.4 Klasifikacija vjetrovnih epizoda

U ovoj radnji polja vjetra klasificirana su prema učinku na vodostaj. U tu svrhu koristili smo poprečni nagib morske razine definiran kao razlika rezidualnog vodostaja u Veneciji i Bakru. Međutim, da bismo odredili promjene tipova polja vjetra u budućoj klimi, za koju ne raspolažemo nizovima vodostaja, potrebno je kvantificirati obilježja tipova za proteklo razdoblje te pomoću njih prepoznati tipove u budućnosti. Prema tome, promatrana su svojstva vjetrovnih epizoda (slika 4.7) za koje unaprijed znamo prema nagibu razine kojem tipu pripadaju. Uočeno je da se tip W i E razdvajaju po svim promatranim parametrima, dok se za tip O ne mogu odrediti svojstva koja ga bitno razlikuju od ostalih. Stoga je moguće definirati osobine marginalnih tipova, što nas u konačnici i najviše zanima, a sve ostale epizode koje ne zadovoljavaju zadane kriterije proglasiti nedefiniranima. Sukladno navedenome, klasifikacija je bazirana na vrijednostima usrednjenih uzdužnih i poprečnih komponenata vjetra nad različitim dijelovima Jadrana (tablica 4.2), a u stanju je identificirati tipove W i E. Polje vjetra tipa W definirano je s dvije kombinacije uvjeta prikazane u tablici 4.2, a polje tipa E s jednom kombinacijom uvjeta. Ovaj pristup rezultirao je razvrstavanjem 63% događaja a ostali su označeni kao nedefinirani.

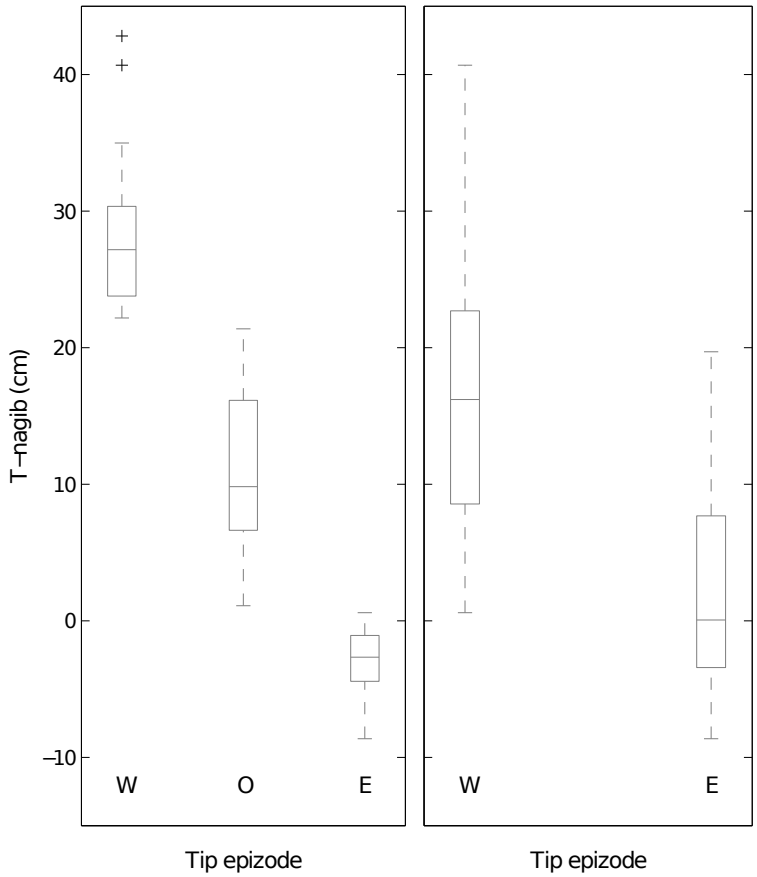


Slika 4.7: *Gore i dolje lijevo*: srednje vrijednosti uzdužne (L) i poprečne (T) komponente vjetra nad različitim područjima bazena za skup vjetrovnih epizoda. Bojama kružića označeni su tipovi epizoda dobiveni pomoću poprečnog nagiba morske razine, a linijama su označene granične vrijednosti komponenata vjetra koje će se iskoristiti za klasifikaciju po tipovima poplava (W i E). *Dolje desno*: točke iznad Jadrana (maska) za polja iz ERA-Interim reanalize; bojama su označena različita područja iznad bazena koja su se koristila pri klasifikaciji epizoda preko karakteristika vjetra.

Nadalje, potrebno je provjeriti kako se poprečni nagibi morske razine novonastalih klasa slažu s onima dobivenima izravno iz nagiba razine. Na slici 4.8 uspoređeni su nagibi istog skupa podataka za klase dobivene na dva nezavisna načina. Razdiobu na lijevoj strani slike možemo smatrati idealnom, a ona s desne strane sličit će joj onoliko koliko je dobar algoritam za razvrstavanje. S obzirom da algoritam uzima u obzir samo nekoliko osobina polja vjetra, a izmjereni vodostaji rezultat su sveukupnog višednevnog razvoja meteorološke situacije nad bazenom, za očekivati je da će se dvije distribucije donekle razlikovati. Međutim, na nekim osobinama novonastalih klasa moramo inzistirati:

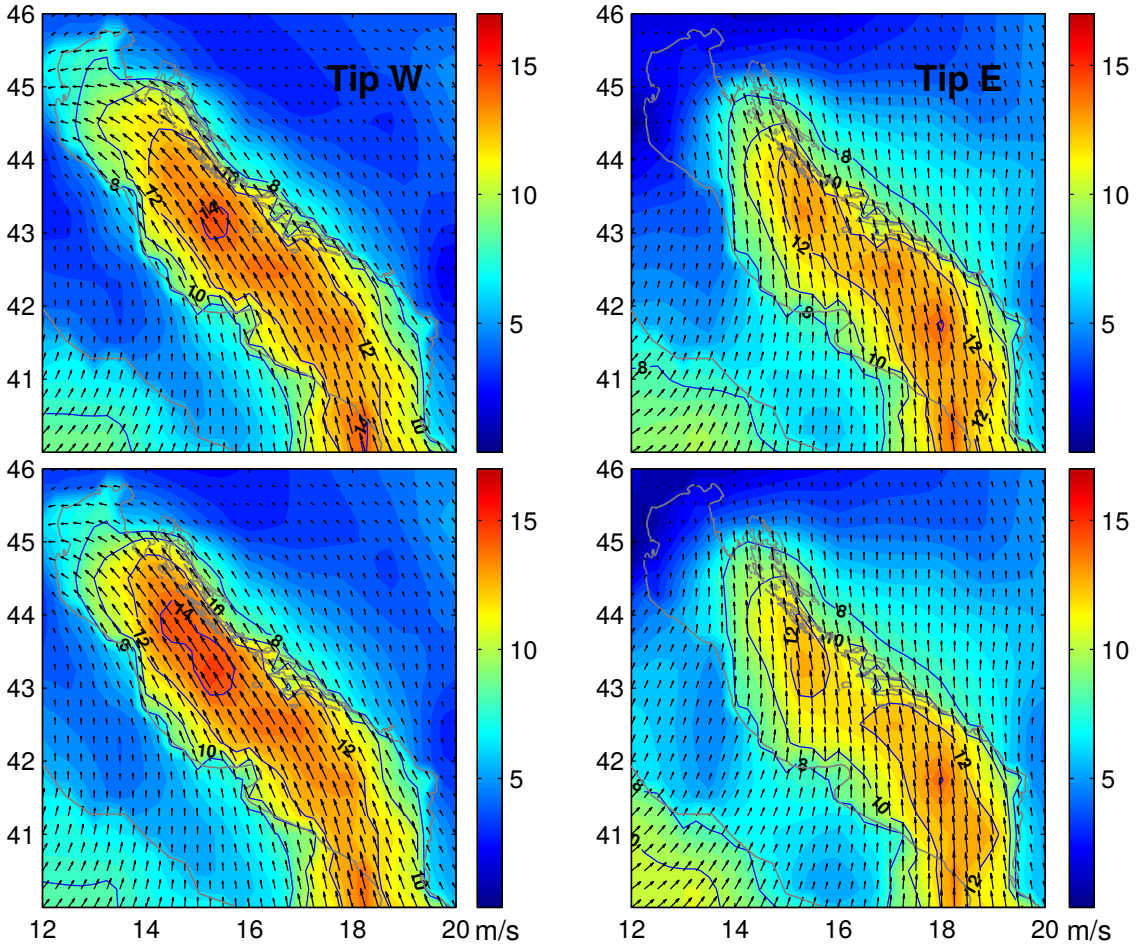
Tablica 4.2: Uvjeti za klasifikaciju epizoda (tipa W i E), prema karakteristikama polja vjetra nad Jadranom, u područjima prikazanima na slici 4.7. Za uzdužnu (L) komponentu, pozitivno je prema NW, a za poprečnu (T) komponentu, pozitivno je prema SW. Koordinatni sustav za dekompoziciju vektora vjetra prikazan je na slici 3.3.

Komponente vjetra	L_{A1} (m/s)	T_{A1} (m/s)	L_{A2} (m/s)	T_{A2} (m/s)	L_{A2W} (m/s)
tip W	> 6.0	> -4.0	> 10.0	> -4.0	> 8.5
	< 6.0	> 8.2	> 10.0	> -4.0	> 8.5
tip E	< 6.0	< 8.2	< 10.0	< 1.5	< 8.5



Slika 4.8: Poprečni nagibi morske razine za tipove vjetrovnih epizoda: (*lijevo*) razvrstani direktnom metodom tj. klasifikacijom preko nagiba morske razine i (*desno*) razvrstani algoritmom (tablica 4.2) koji koristi svojstava specifična za dva marginalna tipa vjetra. Donja i gornja granica pravokutnika označava 25-ti odnosno 75-ti percentil, a crtkane linije minimalnu i maksimalnu vrijednost podataka. Poprečna linija unutar četverokuta označava medijan skupa.

epizode klasificirane kao tip W doista moraju uzrokovati nagib razine prema zapadnoj obali, odnosno epizode tipa E nagib prema istočnoj. Iz desnog grafa slike 4.8 očito je da je taj uvjet ispunjen, ali rasponi nagiba puno su širi od očekivanih te se u jednom dijelu preklapaju, što znači da su različitim vjetrovnim strukturama ponekad pridruženi isti nagibi morske razine. Međutim, glavnine skupova (područja između 25-og i 75-og percentila) u potpunosti su razdijeljene, medijani dviju klasa razlikuju se za više od 15 cm te su događaji s minimalnim i maksimalnim nagibima svrstani u odgovarajuće kategorije. Ovo je dovoljno da ustanovljeni algoritam klasifikacije prihvatimo kao uspješan. Također ne smijemo zaboraviti da podaci mogu sadržavati stršeće vrijednosti koje su lako mogle uzrokovati ovako široke raspone klasa. U prethodnom poglavlju imali smo 5 stršećih



Slika 4.9: Kompoziti za dva tipa vjetrovnih epizoda. *Gore*: dobiveni direktnom metodom tj. klasifikacijom pomoću nagiba morske razine. *Dolje*: dobiveni pomoću algoritma baziranog na karakteristikama polja vjetra.

vrijednosti na 38 izdvojenih epizoda. Za njih smo utvrdili da meteorološka polja ne odgovaraju obliku induciranog vodostaja pri čemu događajima s izraženim nagibom prema jednoj obali pripadaju polja vjetra koja induciraju nagib prema suprotnoj obali. Stoga se i ovdje moglo očekivati slično što je u konačnici doprinijelo da pojedinim oblicima polja vjetra pridijelimo jako široke raspone nagiba morske razine.

Pogledajmo na kraju kako izgledaju kompoziti razvrstanih polja vjetra (slika 4.9). Novonastala polja ispoljavaju očekivanu strukturu – idući od tipa W prema tipu E vidljivo je zakretanje smjera vjetra i premještanje maksimuma brzine prema istočnoj obali. Položaji izolinija brzine dobro se slažu s očekivanima, a smjer vjetra bolje je uhvaćen za tip W dok se tip E očituje u nešto izraženijoj transverzalnoj komponenti od očekivane.

Slijedeći opisane procedure, u narednom odjeljku provjerit ćemo sposobnost odabranih regionalnih klimatskih modela da reproduciraju specifične meteorološke situacije te ćemo ocijeniti koliko su oni prikladni za promatranu problematiku.

4.3 Ocjena regionalnih klimatskih modela

Za ocjenu tri regionalna klimatska modela, ALADIN52, RCA4 i RegCM4, koristili smo stroge kriterije. Naime, ispitali smo koliko dobro modeli reproduciraju konkretne meteorološke situacije koristeći simulacije u kojima su rubni i početni uvjeti nametnuti iz reanalize ERA-Interim (evaluacijsko razdoblje). Iz ukupnog broja te omjera broja realiziranih i neatribuiranih epizoda možemo procijeniti kvalitetu simulacija. Iz tablice 4.3 vidljivo je da regionalni klimatski modeli u odnosu na ERA-Interim rezultiraju većim brojem epizoda. Ovo je očekivano, a posljedica je bolje rezolucije regionalnih modela zbog koje se onda razvijaju veće brzine vjetra. Usporedimo li odnose realiziranih i neatribuiranih epizoda za tri modela, možemo zaključiti da je ALADIN52 superioran te je u tome čak nadmašio ERA-Interim. Za njegovu uspješnost u odnosu na druga dva regionalna klimatska modela vjerojatno je presudna širina domene. ALADIN52 pokriva šire područje Sredozemlja za razliku od druga dva modela koji uzimaju u obzir područje cijele Europe. Pošto širina domene utječe na vremenski koeficijent korelacije[1] ([68], za manje domene on je veći) razumljivo je da su onda RCA4 i RegCM4 manje uspješni po pitanju

[1]Vremenski koeficijent korelacije između simulacije i mjerenja je mjera koliko dobro rezultati modela reproduciraju kronološki slijed opaženih događaja.

Tablica 4.3: Broj vjetrovnih epizoda za različite skupove meteoroloških podataka u evaluacijskom razdoblju: 1984. – 2014. za ERA-Interim, 1984. – 2012. za ALADIN52, 1984. – 2010. za RCA4 i 1984. – 2014. za RegCM4. Realizirane i neatribuirane epizode izražene su u odnosu na maksimalni mogući broj epizoda s obzirom na dostupnost podataka: 39 za ERA-Interim, 34 za ALADIN52, 30 za RCA4 i 39 za RegCM4.

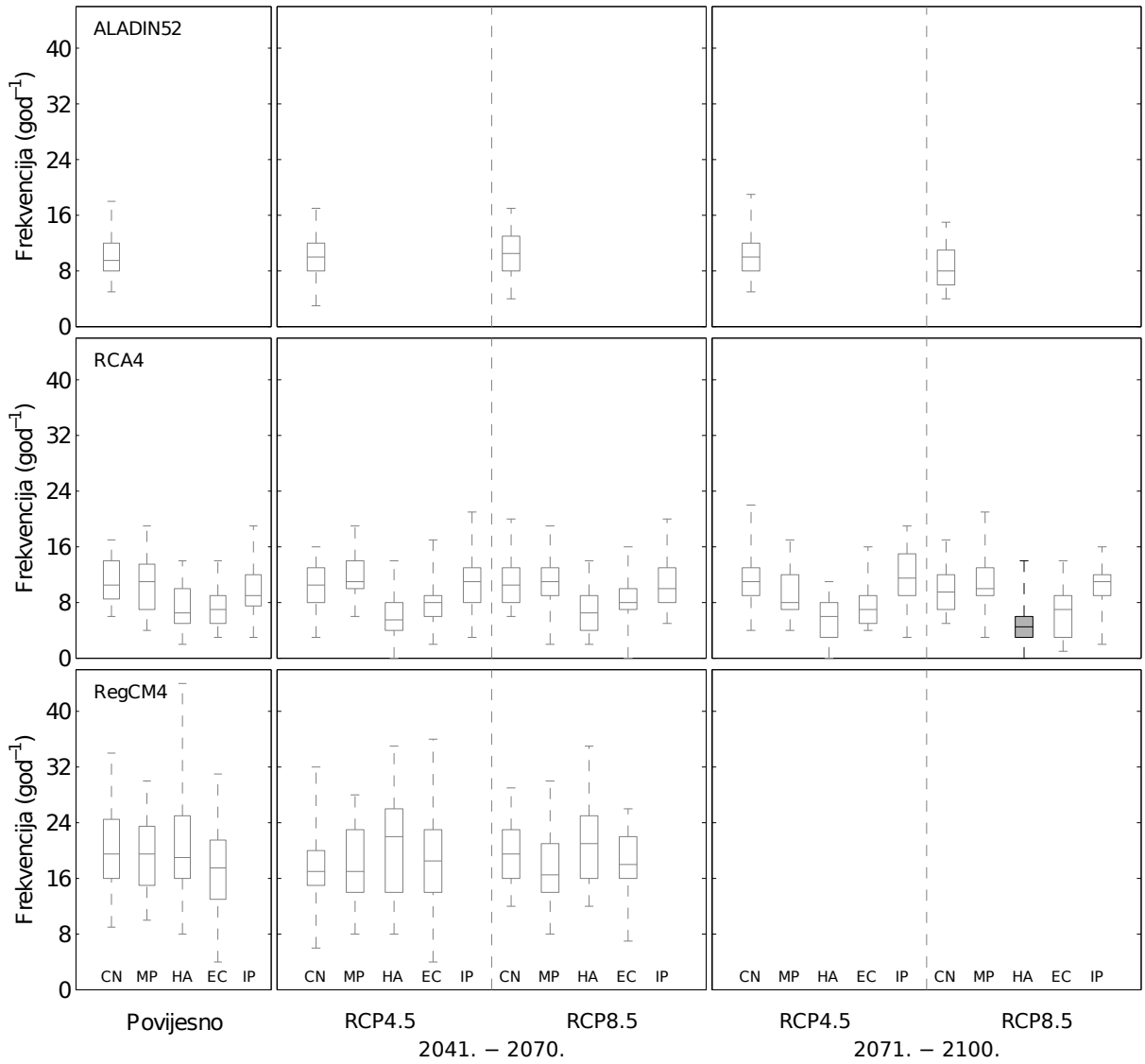
Skup podataka	Ukupan broj epizoda	Realizirano (%)	Neatribuirano (%)	Frekvencija (god^{-1})
ERA-Interim	134	79.49	20.51	4.3
ALADIN52	175	85.29	14.71	6.0
RCA4	205	63.33	36.67	7.6
RegCM4	508	41.03	58.97	16.4

reproduciranja konkretnih meteoroloških situacija. Što se tiče same frekvencije događaja, ALADIN52 i RCA4 daju vrlo slične vrijednosti, između šest i osam epizoda godišnje, za razliku od RegCM4 koji je rezultirao dvostruko većim brojem. Prema tome, možemo zaključiti da ALADIN52 i RCA4 vrlo dobro reproduciraju opasne strukture vjetra iznad Jadrana dok je RegCM4 po tom pitanju manje uspješan. Ponašanje triju modela u povijesnom razdoblju bit će prikazano u sljedećem potpoglavlju.

4.4 Rezultati

Očekivane promjene vjetrovnih epizoda u budućoj klimi istražene su usporedbom brzine, frekvencije i godišnjeg hoda s onima iz sadašnje klime. Razmotrena su dva scenarija, umjereni RCP4.5 i ekstremni RCP8.5, te dva razdoblja – sredina i kraj 21. stoljeća (2041. – 2070. i 2071. – 2100). Analiza je provedena za sve epizode skupa te po pojedinačnim tipovima.

Razmatranjem frekvencije vjetra za tri modela u sadašnjoj klimi (slika 4.10, *lijevo*), vidljivo je da postoje razlike u samoj klimatologiji modela. U simulacijama modela RegCM4 epizode se javljaju dvostruko češće te im pripadaju puno širi rasponi vrijednosti. Modeli ALADIN52 i RCA4 su konzistentni te im se broj kreće od 7 do 11 događaja godišnje (brojčane vrijednosti dane su u prilogu, tablica C.1). Simulacije s rubnim i početnim uvjetima iz globalnog modela HadGEM u većini slučajeva odstupaju od osta-



Slika 4.10: Razdioba **frekvencije** vjetrovnih epizoda u simulacijama triju regionalnih klimatskih modela sadašnje i buduće klime (umjereni RCP4.5 i ekstremni RCP8.5 scenarij). Ispunjeni simboli označavaju simulacije čije se razdiobe signifikantno razlikuju (na nivou značajnosti od 95%) od onih u povijesnom razdoblju (ocijenjeno korištenjem WMW testa). Pri dnu slike označeni su globalni modeli iz kojih su preuzeti rubni i početni uvjeti: CNRM-CM5 (CN), MPI-ESM-LR/MR (MP), HadGEM2-ES (HA), EC-EARTH (EC), IPSL-CM5 (IP).

tka skupa. Ovo ne čudi s obzirom da se HadGEM u literaturi ponekad spominje kao model s lošom kvalitetom iznad Sredozemlja (npr. [69]). Usporedbom buduće i sadašnje klime jasno je na prvi pogled da ne postoje značajne razlike. To potvrđuje i WMW test kojim je ispitana značajnost razlika – za samo jednu simulaciju (RCA4), i to forsiranu globalnim modelom HadGEM, ispostavilo se da signifikantno odstupa od sadašnje klime.

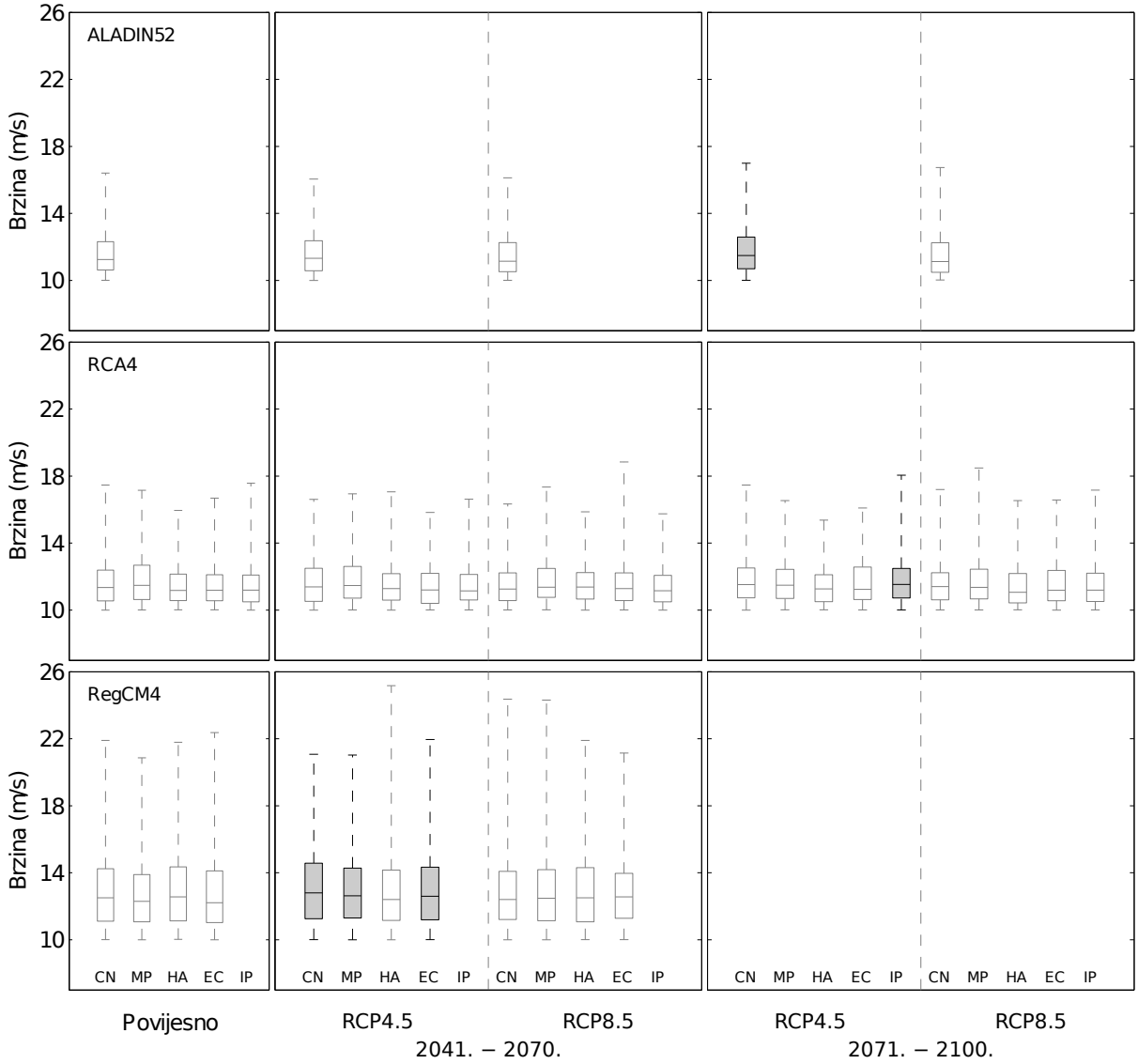
Tablica 4.4: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **frekvenciju** vjetrovnih epizoda.

Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.20	0.23	0.23	0.27
RCA4	CNRM-CM5	0.20	0.24	0.34	0.34
	MPI-ESM-LR	0.28	0.20	0.26	0.36
	HadGEM2-ES	0.19	0.13	0.31	0.43
	EC-EARTH	0.17	0.33	0.12	0.30
	IPSL-CM5	0.31	0.23	0.29	0.27
RegCM4	CNRM-CM5	0.33	0.27		
	MPI-ESM-MR	0.20	0.31		
	HadGEM2-ES	0.43	0.33		
	EC-EARTH	0.21	0.29		

Dodatna provjera napravljena je računanjem Perkinsovog pokazatelja klimatske promjene (PCC) prikazanog u tablici 4.4. Na osnovi njega očekuje se uglavnom mala (do 0.3), a za neke simulacije i umjerena (0.3 – 0.43), vjerojatnost klimatske promjene frekvencije vjetra. Stoga možemo zaključiti da se broj potencijalno opasnih vjetrovnih epizoda u budućoj klimi, bez obzira na scenarij ili promatrano razdoblje, neće značajno promijeniti u odnosu na sadašnju klimu.

Slično možemo zaključiti o intenzitetu epizoda (slika 4.11), analiziramo li prostorne srednjake vjetra tijekom izdvojenih vjetrovnih epizoda. Modeli ALADIN52 i RCA4 općenito daju vrlo bliske brzine, nešto više od 11 m/s, dok RegCM4 premašuje taj iznos za oko 10% (tablica C.2). Rasponi brzina kod zadnjeg modela, bez obzira na promatrano razdoblje, širi su u odnosu na druga dva. Odnos brzina u budućoj i sadašnjoj klimi otkriva da će vjetrovne epizode zadržati dosadašnja svojstva bez obzira na scenarij. WMW testom pokazano je da određene projekcije, njih pet, odstupaju od sadašnje klime s nešto povišenim brzinama. Međutim, ako se uzme u obzir da raspolažemo velikim skupom simulacija (ukupno 32 projekcije) od kojeg samo 16% realizacija nagovještava promjenu, onda možemo očekivati samo manje promjene u brzini vjetra prema analiziranim simulacijama i projekcijama. To potvrđuje i pripadni PCC čije su vrijednosti iznimno niske i ne premašuju iznos od 0.14 (tablica 4.5).

Što se tiče sezonskog hoda u sadašnjoj klimi, sva tri modela slijede očekivani obrazac



Slika 4.11: Razdioba **brzine** vjetra za vjetrovnih epizoda u simulacijama triju regionalnih klimatskih modela sadašnje i buduće klime (umjereni RCP4.5 i ekstremni RCP8.5 scenarij). Ispunjeni simboli označavaju simulacije čije se razdiobe signifikantno razlikuju (na nivou značajnosti od 95%) od onih u povijesnom razdoblju (ocijenjeno korištenjem WMW testa). Pri dnu slike označeni su globalni modeli iz kojih su preuzeti rubni i početni uvjeti: CNRM-CM5 (CN), MPI-ESM-LR/MR (MP), HadGEM2-ES (HA), EC-EARTH (EC), IPSL-CM5 (IP).

– veći postotak događaja javlja se u hladnom dijelu godine kada je učestaliji prolazak sredozemnih ciklona nad Jadranom (slike 4.12 i 4.13). Najaktivniji mjesec ovisi o modelu i simulaciji, a najčešće je u razdoblju od studenoga do veljače. Amplitude godišnjeg hoda usporedive su za većinu simulacija, jedino one forsirane modelom HadGEM odstupaju u nekim slučajevima. Vizualna usporedba za sadašnju i buduću klimu ne daje naznake bilo

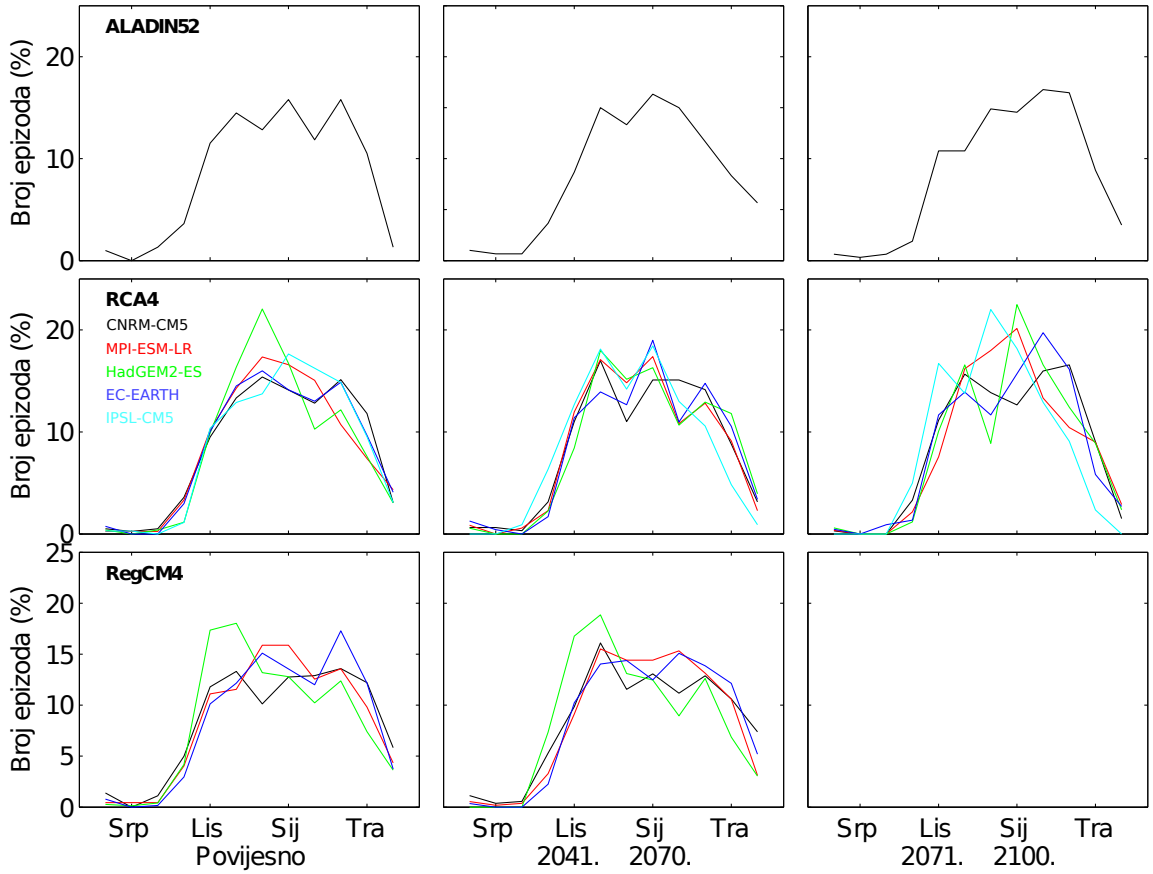
Tablica 4.5: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **brzinu** vjetra u vjetrovnim epizodama.

Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.07	0.06	0.07	0.07
RCA4	CNRM-CM5	0.06	0.08	0.06	0.05
	MPI-ESM-LR	0.03	0.07	0.06	0.05
	HadGEM2-ES	0.09	0.08	0.08	0.14
	EC-EARTH	0.12	0.08	0.07	0.05
	IPSL-CM5	0.07	0.04	0.11	0.04
RegCM4	CNRM-CM5	0.06	0.05		
	MPI-ESM-MR	0.08	0.06		
	HadGEM2-ES	0.12	0.05		
	EC-EARTH	0.08	0.11		

kakve promjene, bilo da se radi o amplitudi ili fazi hoda. Također, nisu očite razlike između pojedinih klimatskih scenarija niti između dva budućа razdoblja. Formalno testiranje nije provedeno zbog malog broja epizoda u pojedinim mjesecima, ali i s obzirom na prethodne rezultate za druga svojstva vjetra malo je vjerojatno da su promjene signifikantne.

Promjene prostorne strukture polja vjetra možemo ispitati razmatranjem osobina pojedinih tipova. Preraspodjela među tipovima ukazala bi na promjene velike prostorne skale jer su različite strukture vjetra iznad Jadrana inducirane ciklonama različitog intenziteta i položaja iznad Sredozemlja (slika 3.6).

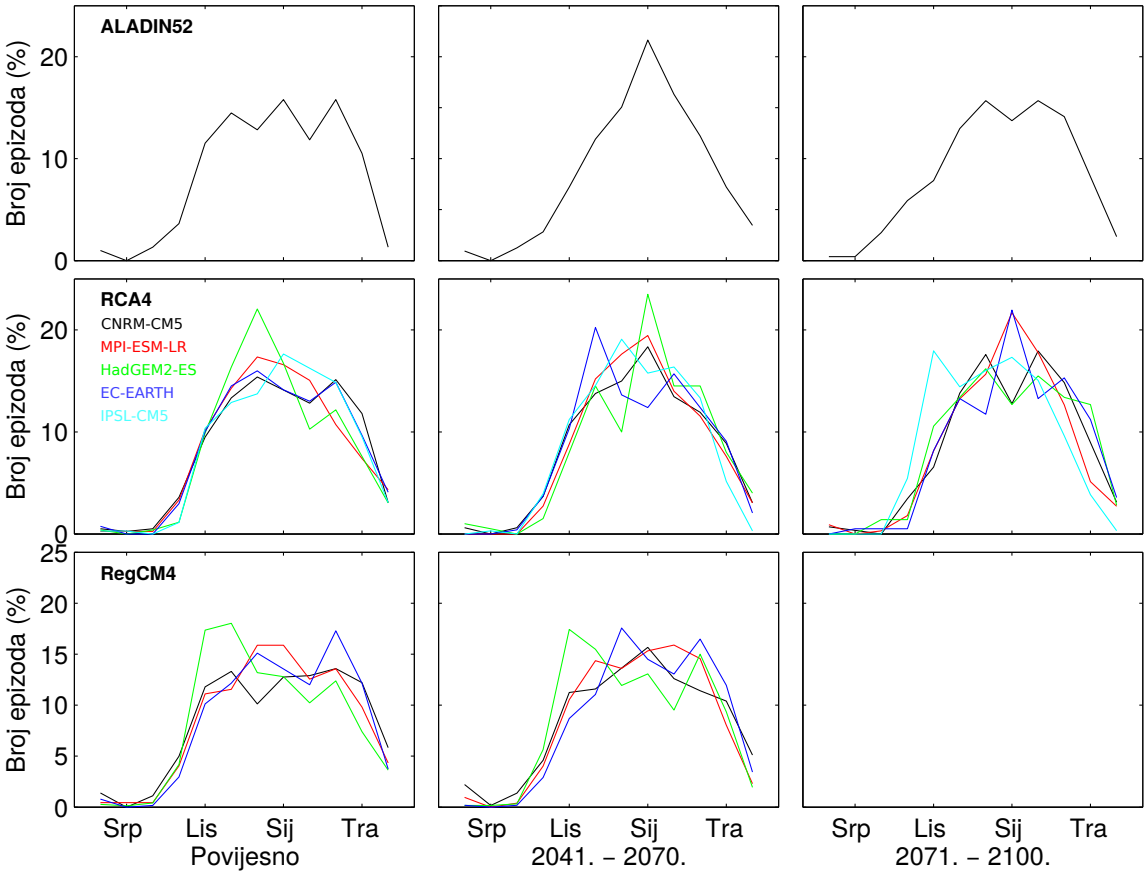
Uspoređujući povijesno razdoblje za dva tipa polja vjetra (slike 4.14 i 4.15), očito je da su trenutno učestalija polja s izraženom komponentom duž glavne osi bazena (tip W) koja su odgovorna za jače akumuliranje vode uz sjeverozapadnu obalu. U ovome se slažu sva tri modela s tim da RegCM4 daje malo veće frekvencije za obje klase (za brojčane vrijednosti pogledati u prilogu tablice C.3 i C.4). Nadalje, ako se pogleda sredina i kraj 21. stoljeća proizilazi da su razdiobe za oba tipa vrlo slične onima u proteklom razdoblju te nema naznaka da bi broj određenih struktura vjetra porastao na račun drugih. Ovo je formalno ispitano WMW testom pri čemu je razlika ponovno bila statistički signifikantna za mali dio realizacija pa ne možemo govoriti o robusnom signalu klimatske promjene ovog svojstva. Analiza Perkinsovog pokazatelja klimatske promjene dodatno potvrđuje ovaj zaključak (tablice 4.6 i 4.7).



Slika 4.12: Godišnji hod broja vjetrovnih epizoda u simulacijama triju regionalnih klimatskih modela forsiranih s nekoliko globalnih modela (označeni različitim bojama) u sadašnjoj i budućoj klimi (umjereni scenarij **RCP4.5**).

Tablica 4.6: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **frekvenciju** vjetrovnih epizoda **tipa W**.

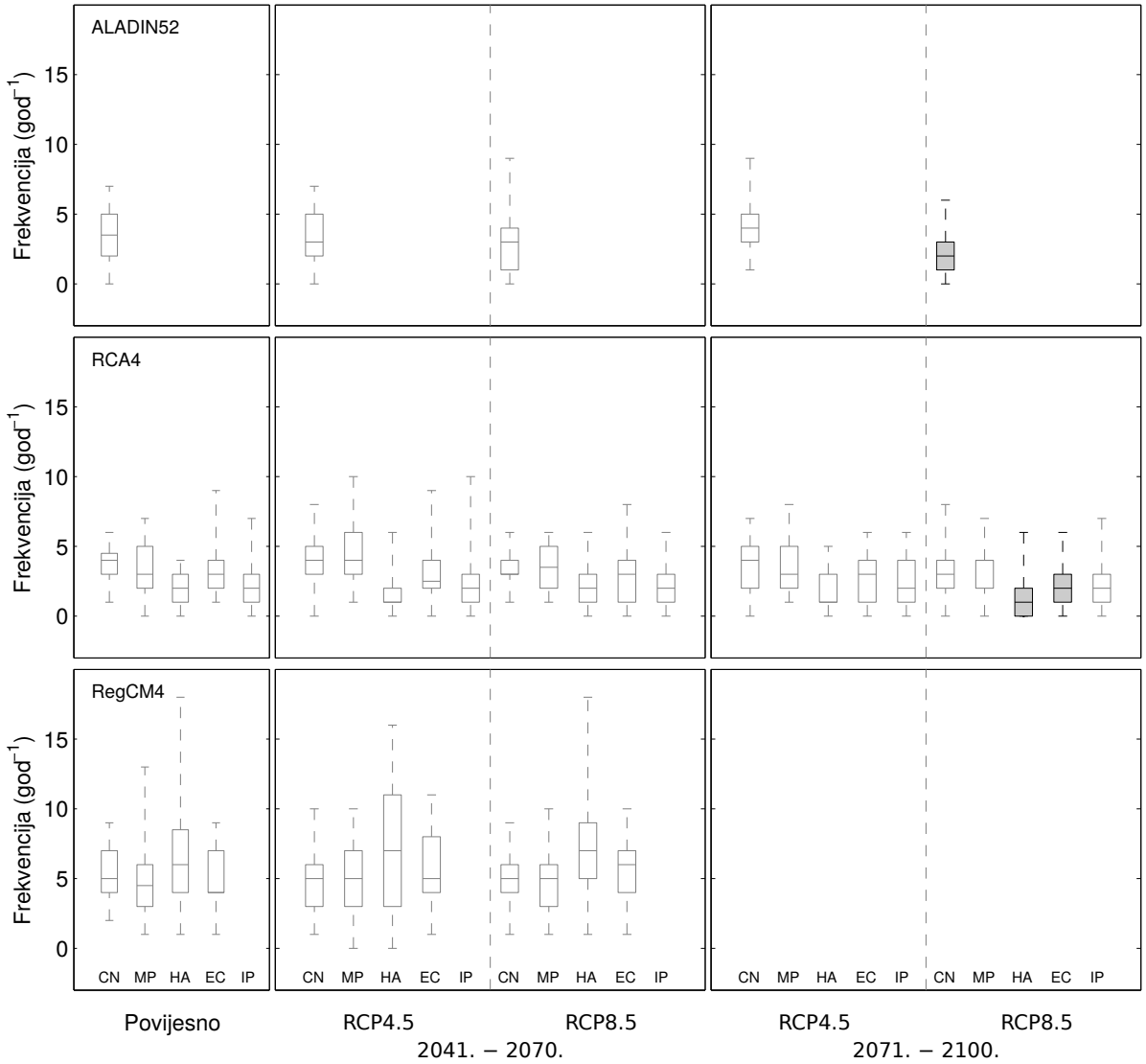
Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.13	0.20	0.13	0.30
RCA4	CNRM-CM5	0.16	0.21	0.10	0.32
	MPI-ESM-LR	0.13	0.08	0.14	0.22
	HadGEM2-ES	0.19	0.07	0.14	0.19
	EC-EARTH	0.08	0.21	0.13	0.30
	IPSL-CM5	0.18	0.07	0.18	0.15
RegCM4	CNRM-CM5	0.17	0.14		
	MPI-ESM-MR	0.17	0.10		
	HadGEM2-ES	0.32	0.07		
	EC-EARTH	0.14	0.21		



Slika 4.13: Godišnji hod broja vjetrovnih epizoda u simulacijama triju regionalnih klimatskih modela forsiranih s nekoliko globalnih modela (označeni različitim bojama) u sadašnjoj i budućoj klimi (ekstremni scenarij **RCP8.5**).

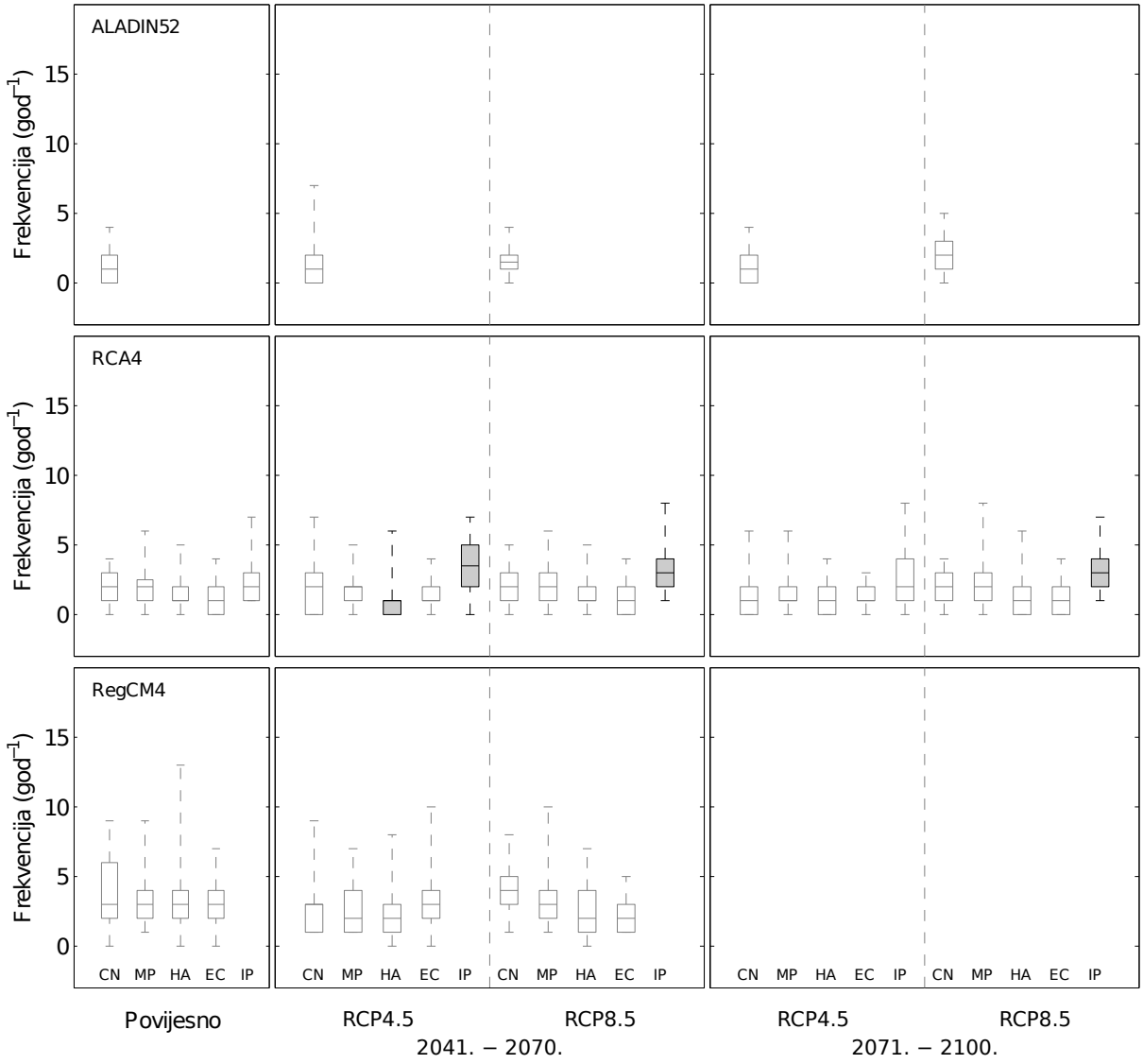
Tablica 4.7: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **frekvenciju** vjetrovnih epizoda **tipa E**.

Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.10	0.07	0.20	0.10
RCA4	CNRM-CM5	0.11	0.09	0.18	0.04
	MPI-ESM-LR	0.17	0.14	0.21	0.08
	HadGEM2-ES	0.25	0.09	0.02	0.15
	EC-EARTH	0.09	0.09	0.15	0.12
	IPSL-CM5	0.33	0.23	0.29	0.23
RegCM4	CNRM-CM5	0.27	0.20		
	MPI-ESM-MR	0.14	0.14		
	HadGEM2-ES	0.22	0.18		
	EC-EARTH	0.06	0.16		



Slika 4.14: Kao na slici 4.10, samo za epizode **tipa W**.

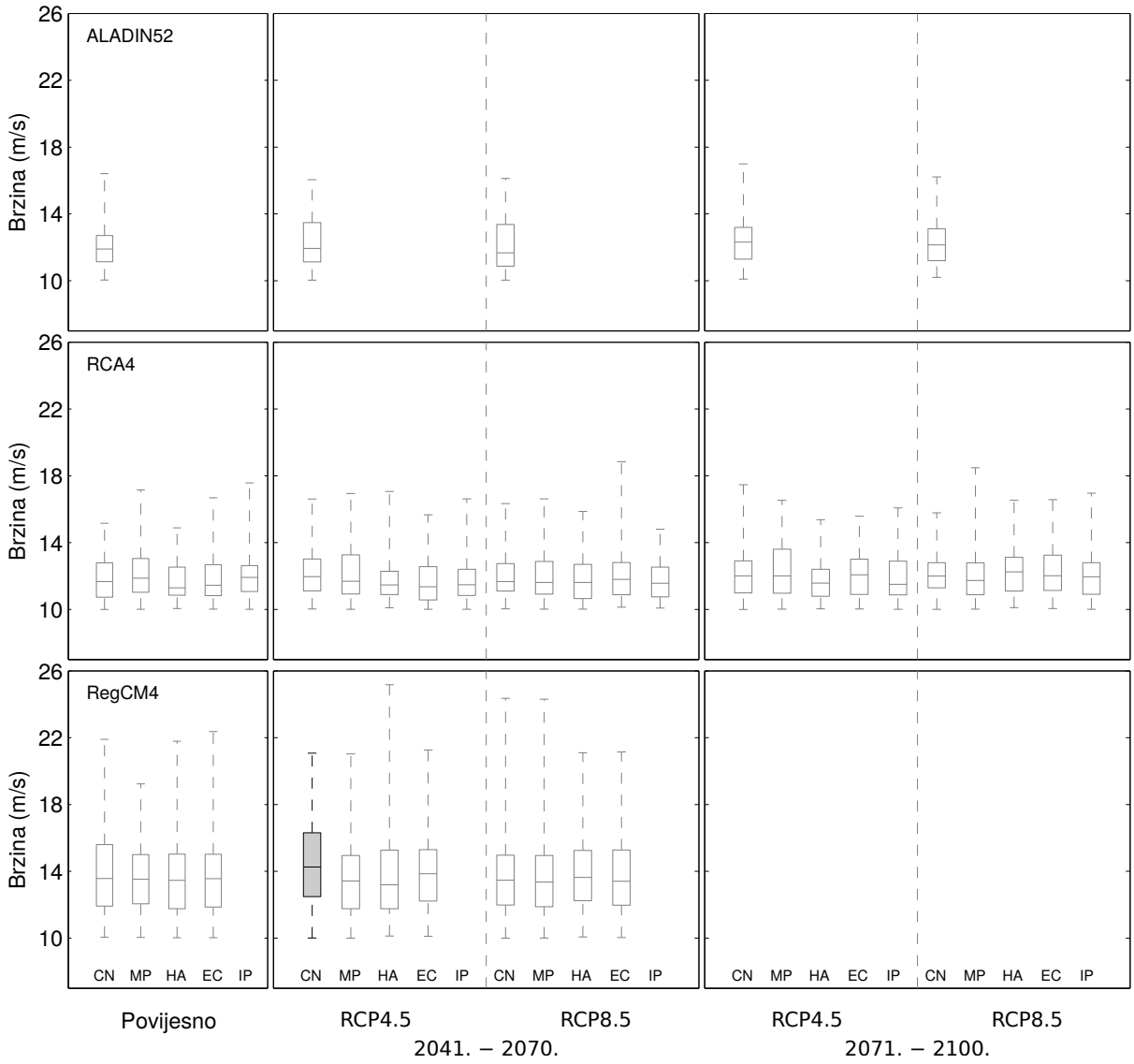
Promjena intenziteta pojedinih tipova prikazana je na slikama 4.16 i 4.17 i u tablicama C.5 i C.6. U sadašnjoj klimi tip W karakteriziraju velike brzine vjetra koje u slučaju RegCM4-a mogu premašiti 22 m/s. Vjetar za tip E je nešto slabiji s vrlo uskim rasponom brzina. Što se tiče buduće klime, ne postoje dokazi da bi se tipovi mogli intenzivirati ili oslabiti. Prema WMW testu, samo po jedana simulacija u W odnosno E skupu ukazuje da su razlike značajne. Pripadne vrijednosti PCC-a su niske i kreću se u rasponu od 0.06 do 0.23, što upućuje na vrlo malu vjerojatnost porasta/pada brzine bilo kojeg tipa vjetra.



Slika 4.15: Kao na slici 4.10, samo za epizode **tipa E**.

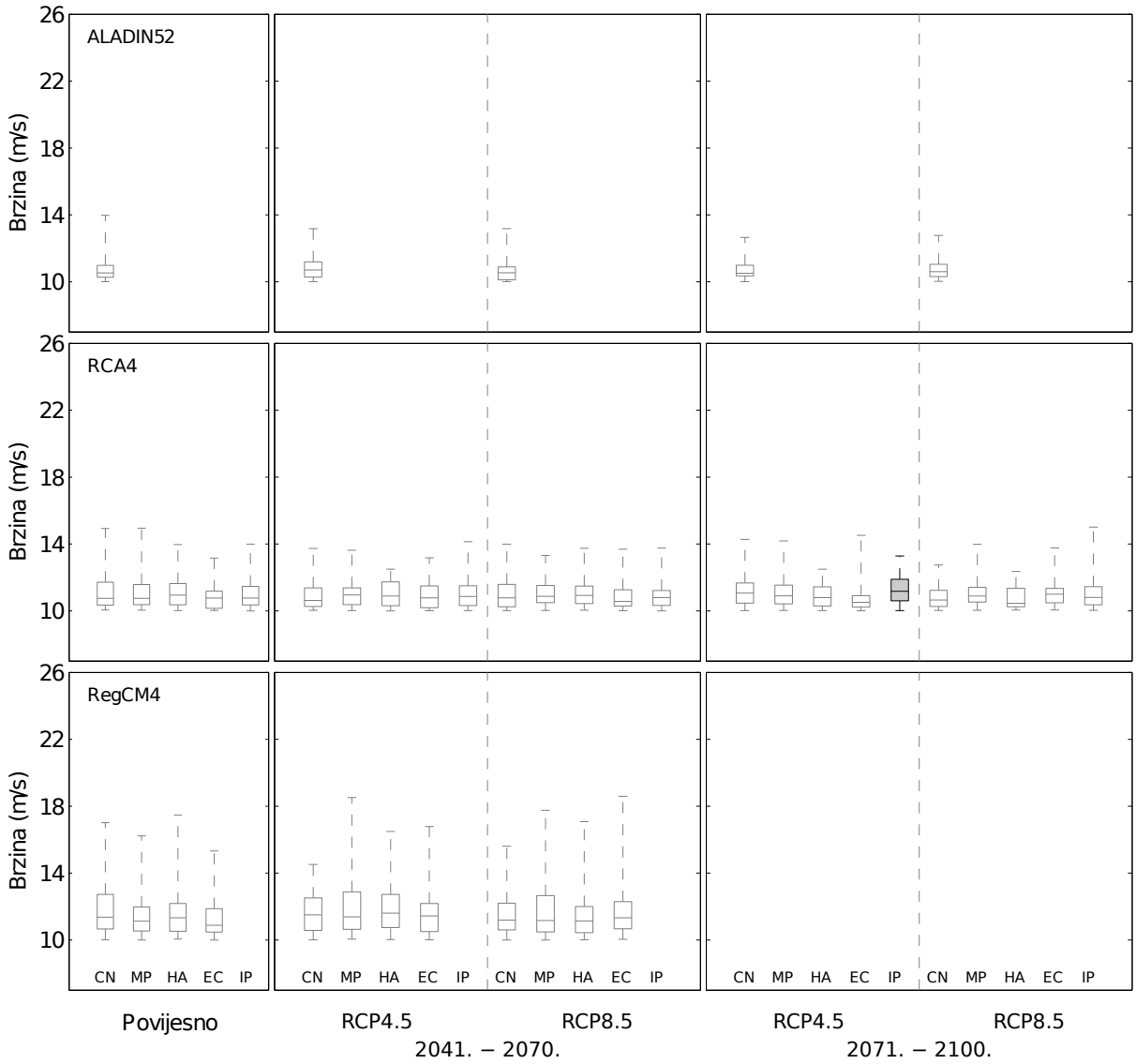
4.5 Diskusija

Analiza je pokazala da se osobine vjetra odgovornog za pobudu visokih olujnih uspora u Jadranu neće mijenjati u budućoj klimi. Frekvencija, intenzitet te prostorna struktura potencijalno opasnih epizoda ostat će isti kao u dosadašnjoj klimi. Simulacije pomoću tri regionalna klimatska modela, uz početne i rubne uvjete iz različitih globalnih modela, daju konzistentne rezultate. Dobiveni signal robustan je po svim kriterijima – ne ovisi o mogućem klimatskom scenariju, promatranom vremenskom intervalu, regionalnom ili globalnom modelu. Ovo je u skladu sa zaključcima dva prethodna rada sa sličnim istra-



Slika 4.16: Kao na slici 4.11, samo za epizode **tipa W**.

živanjima [18] i [19]. Međutim, spomenuti radovi baziraju se na malom broju kriterija pa zbog toga njihovi rezultati mogu biti pod velikim utjecajem eventualnih stršećih vrijednosti. Npr. u radu [19] koristi se jedna kombinacija meteorološko-ocanografskog modela (ECMWF-HYPSE) u uvjetima jednog scenarija (RCP4.5) s fokusom na klimatske promjene pred kraj 21. stoljeća. Ovakav pristup može biti zgodan za prikaz metodoloških ciljeva (npr. adekvatnost alata za modeliranje), ali s obzirom na dobro znani široki rasap klimatskih simulacija (npr. [70]) ovi rezultati imaju malu pouzdanost i ne mogu biti temelj za npr. izradu strategija prilagodbe na klimatske promjene. Za razliku od spomenutih studija, analiza predstavljena u ovom radu obuhvaća većinu mogućih kriterija pri



Slika 4.17: Kao na slici 4.11, samo za epizode **tipa E**.

ispitivanju klimatskih promjena vjetrovnih epizoda te su stoga njeni rezultati pouzdaniji.

Zašto prizemni vjetar kakav je odgovoran za poplavljivanje jadranske obale neće trpjeti nikakve promjene u narednim desetljećima, u kojima se očekuju vrlo intenzivne modifikacije klimatskih uvjeta u području Sredozemlja? Mnogobrojne studije (npr. [69], [71], [72]) pokazale su da će nad našim područjem doći do povišenja prizemnog tlaka zraka povezanog s pomicanjem atlantskih ciklonalnih sustava prema sjeveru. Ovo će na područje Sredozemlja, kao graničnog pojasa između klime središnje Europe i aridnih uvjeta sjeverne Afrike, imati velike posljedice. Očekuje se zagrijavanje zraka uz smanjenu količinu oborine, pogotovo u ljetnoj sezoni, što je u skladu s prevladavanjem stabilnih atmosferskih

Tablica 4.8: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **brzinu** vjetra vjetrovnih epizoda **tipa W**.

Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.13	0.15	0.10	0.12
RCA4	CNRM-CM5	0.07	0.21	0.11	0.16
	MPI-ESM-LR	0.14	0.08	0.20	0.13
	HadGEM2-ES	0.19	0.21	0.16	0.32
	EC-EARTH	0.14	0.11	0.12	0.14
	IPSL-CM5	0.23	0.11	0.18	0.07
RegCM4	CNRM-CM5	0.13	0.16		
	MPI-ESM-MR	0.11	0.14		
	HadGEM2-ES	0.11	0.12		
	EC-EARTH	0.09	0.13		

Tablica 4.9: Perkinsov pokazatelj klimatske promjene (PCC) za **brzinu** vjetra vjetrovnih epizoda **tipa E**.

Model		2041. - 2070.		2071. - 2100.	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	0.12	0.14	0.11	0.11
RCA4	CNRM-CM5	0.13	0.17	0.15	0.12
	MPI-ESM-LR	0.09	0.13	0.08	0.17
	HadGEM2-ES	0.17	0.09	0.13	0.25
	EC-EARTH	0.13	0.11	0.16	0.17
	IPSL-CM5	0.06	0.06	0.20	0.11
RegCM4	CNRM-CM5	0.10	0.12		
	MPI-ESM-MR	0.22	0.22		
	HadGEM2-ES	0.14	0.15		
	EC-EARTH	0.15	0.16		

uvjeta. Stoga smo očekivali da će se te promjene, koje sugeriraju povećanje anticiklonalne aktivnosti, na neki način odraziti na jadranske epizode vjetra koje su uzrokovane sredozemnim ciklonama. Očekivali smo smanjenje broja događaja a ne njihovu stagnaciju. Dio odgovora možda se nalazi u sezonskoj modulaciji signala klimatskih promjena. Naime, [69] navodi da očekivane promjene prizemnog tlaka zraka nad Sredozemljem pokazuju snažnu ovisnost o godišnjem dobu te su najizraženije u ljetnoj sezoni. Budući da se sredozemne ciklone koje uzrokuju poplavljivanje jadranske obale rađaju najčešće u kasnu jesen ili zimi, moguće je da onda nisu osjetljive na spomenute promjene jer su one u to

doba slabo izražene. Ovo bi naravno valjalo dodatno ispitati.

Ne smijemo zaboraviti da je poplavljivanje jadranske obale rezultat združenog učinka nekoliko procesa te da je ovdje ispitana promjena meteorološke pozadine samo jednog od njih – olujnog uspora. Kao što je na slici 4.5 pokazano, bitna komponenta jadranskih poplava je dugoperiodička varijabilnost razine čiji doprinos može iznositi više od 40 cm. Iako je olujni uspor dominantan proces u formiranju visokih vodostaja, dugoperiodička komponenta može imati važnu ulogu. Stoga bi valjalo ispitati osjetljivost planetarne komponente vodostaja na klimatske promjene kako bi se dobila potpunija slika meteoroloških uvjeta jadranskih poplava u budućoj klimi.

Jadranskoj obali očito ne prijete promjene meteoroloških uvjeta dominantno odgovornih za pobudu ekstremnih vodostaja. Međutim, u budućnosti ćemo se gotovo sigurno suočiti s češćim poplavljivanjem zbog porasta srednje razine mora. Također, predstavljeni tip analize potrebno je ponoviti u budućim istraživanjima na većim ansamblima nehidrostatičkih i/ili združenih regionalnih klimatskih simulacija, čiji se razvoj i dostupnost očekuje sljedećih godina.

Poglavlje 5

Zaključak

Empirijskom analizom pojedinačnih slučajeve te numeričkim simulacijama i statističkom analizom većeg skupa jadranskih olujnih uspora, identificirali smo razdiobe polja vjetra koje predstavljaju najveću opasnost za istočnu odnosno zapadnu obalu sjevernog Jadrana. Olujni uspori u Jadranu nastaju uslijed epizoda juga čije razdiobe na prvi pogled ne otkrivaju značajne razlike, ali su dinamički važne te induciraju bitno različit odziv vodostaja duž istočne i zapadne obale. Najučestaliji oblik juga (tip O) okarakteriziran je smjerom vjetra blago otklonjenim od glavne osi bazena prema istoku iznad većeg dijela morske površine, uz ponešto veće brzine uz istočnu obalu. Ovakva razdioba prisile u kombinaciji s nejednolikom dubinom mora, rezultira složenom strukturom morske površine, gdje razina raste ne samo prema zatvorenom kraju bazena nego se formira i poprečni nagib, s višim vodostajem (u prosjeku 16 cm) uz zapadnu obalu. Mnogo rjeđe javlja se jugo čije se djelovanje očituje u mnogo strmijem poprečnom nagibu prema zapadu (tip W) ili njegovim odsustvom pa čak i nagibom u suprotnom smjeru (tip E). Jači odziv uz zapadnu obalu (tip W) javlja se kada su iznad Jadrana prisutna dva tipa strujanja: istočnjak ili sjeveroistočnjak iznad sjevernojadranskog šelfa i uniformno jugo iznad ostatka bazena. S druge strane, snažniji odziv duž istočne obale (tip E) uzrokovan je južnim vjetrom s izraženom komponentom prema istočnoj obali, ali i što se u nekim slučajevima pokazalo presudnim, smicanjem komponente paralelne s obalom. Ova tri tipa polja vjetra odnosno olujnog uspora posljedica su položaja i intenziteta sredozemne ciklone te poremećaja u višim slojevima troposfere.

Dobiveni rezultati imaju direktan utjecaj na bolju detekciju potencijalno opasnih me-

teoroloških situacija. Stoga vjerujemo da će biti korisni u procjenama kvalitete meteoroloških prognoza korištenih u sustavima operativnih prognoza olujnih uspora, te da će pomoći u tumačenju manjkavosti tih sustava. Dinamička prognoza olujnih uspora u Jadranu trenutno ima dva osnovna problema: osjetljivost na početne uvjete te osjetljivost na pogreške u polju vjetra [43], [73]. Prvi problem se donekle rješava prikladnom asimilacijom mjerenih podataka dok se drugi može riješiti jedino meteorološkim modelom dovoljno dobrim da reproducira sve bitne karakteristike polja vjetra, pogotovo iznad najplićeg dijela bazena. Vjetar iznad Jadrana je prostorno varijabilan i kao takav izazov je za meteorološke modele čija se pogreška širi u oceanografski prognostički sustav. Nedavnom verifikacijom jedne od dinamičkih prognoza olujnih uspora u Jadranu, koja se provodi na ICPSM[1]-u u Veneciji, a koristi vjetar iz prognostičkog modela ECMWF, pokazano je da prognozirani vodostaj za vrijeme normalnih vremenskih prilika ima dobru kvalitetu, ali da ona opada u vrijeme ekstremnih uvjeta [74]. Bilo bi korisno testirati polja vjetra simulirana meteorološkim modelom ECMWF kako bi se provjerilo koliko dobro reproduciraju karakteristike polja presudne za poplavljivanje sjeverozapadne obale. Što se tiče istočne obale, postoje dva prognostička sustava za razinu mora [75] i [76], no u oba slučaja verifikacije prognoziranih vodostaja nisu šire dostupne. Oba sustava koriste polja vjetra iz modela WRF rezolucije 3 km odnosno 4 km, pa bi bilo zanimljivo ispitati kako model WRF reproducira smicanje juga jer je to jedan od ključnih parametara koji utječe na visinu olujnog uspora duž istočne jadranske obale, a time i na kvalitetu prognoziranog vodostaja.

Ispitivanjem utjecaja klimatskih promjena na pojave opasnih epizoda vjetra utvrdili smo da će njihova svojstva u budućoj klimi ostati slična sadašnjima. Naši rezultati pokazuju da se frekvencija, intenzitet i prostorna struktura polja jugoistočnog vjetra neće značajno promijeniti, bez obzira na klimatski scenarij (RCP4.5 i RCP8.5) ili promatrano razdoblje (sredina ili kraj 21. stoljeća). Valja imati na umu da je ovdje ispitan samo jedan aspekt jadranskih poplava, tj. meteorološka pozadina odgovorna za uspostavu olujnog uspora. Međutim, pitanje je kako će se u budućoj klimi ponašati ostali procesi koji očito doprinose poplavljivanju. Stoga je za stvaranje potpune slike atmosferskih uvjeta koji dovode do poplavljivanja jadranske obale u budućoj klimi, potrebno još ispitati kako će

[1]Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree

se klimatske promjene odraziti na planetarne valove i seše. Bez obzira na to, predstavljena metoda i njeni rezultati mogu poslužiti kao bitan dio slagalice pri izradi strategije prilagodbe na klimatske promjene.

Bibliografija

1. Tomasin, A. & Frassetto, R. *Marine Forecasting* (ur. Nihoul, J.) 427–437 (Elsevier, 1979).
2. Vilibić, I., Šepić, J., Pasarić, M. & Orlić, M. The Adriatic Sea: a long-standing laboratory for sea level studies. *Pure and Applied Geophysics* **174,** 3765–3811 (2017).
3. Trigo, I. F. & Davies, T. D. Meteorological conditions associated with sea surges in Venice: a 40 year climatology. *International Journal of Climatology* **22,** 787–803 (2002).
4. Robinson, A., Tomasin, A. & Artegiani, A. Flooding of Venice: phenomenology and prediction of the Adriatic storm surge. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **99,** 688–692 (1973).
5. Janeković, I. & Kuzmić, M. Numerical solution of the Adriatic Sea principal tidal constituents. *Annales Geophysicae* **23,** 3207–3218 (2005).
6. Raicich, F., Orlić, M., Vilibić, I. & Malačič, V. A case study of the Adriatic seiches (December 1997). *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C-Geophysics & Space Physics* **22,** 715–726 (1999).
7. Cerovečki, I., Orlić, M. & Hendershott, M. C. Adriatic seiche decay and energy loss to the Mediterranean. *Deep Sea Research Part I* **44,** 2007–2029 (1997).
8. Godin, G. & Trotti, L. Trieste water levels 1952–1971: A study of the tide, mean level, and seiche activity. *Miscellaneous Special Publication* **28** (1975).
9. Pasarić, M. & Orlić, M. Response of the Adriatic sea level to the planetary-scale atmospheric forcing. *Geophysical Monograph Series* **69,** 29–39 (1992).

10. Pasarić, M. & Orlić, M. Long-term meteorological preconditioning of the North Adriatic coastal floods. *Continental Shelf Research* **21,** 263–278 (2001).

11. Pasarić, M., Čupić, S., Domijan, N., Leder, N. & Orlić, M. Record-breaking sea levels in the Northern Adriatic on 1 December 2008. *Rapport du 39e Congres de la CIESM,* 157 (2010).

12. *Venice Municipality: Tide Monitoring and Forecast Centre* <`http://www.comune.venezia.it/archivio/25419`> (2015).

13. Međugorac, I., Pasarić, M. & Orlić, M. Severe flooding along the eastern Adriatic coast: the case of 1 December 2008. *Ocean Dynamics* **65,** 817–830 (2015).

14. Međugorac, I., Orlić, M., Janeković, I., Pasarić, Z. & Pasarić, M. Adriatic storm surges and related cross-basin sea-level slope. *Journal of Marine Systems* **181,** 79–90 (2018).

15. Colin, J., Déqué, M., Radu, R. & Somot, S. Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* **62,** 591–604 (2010).

16. Samuelsson, P. *i dr.* The Rossby Centre Regional Climate Model RCA3: model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* **63,** 4–23 (2011).

17. Giorgi, F. *i dr.* RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* **52,** 7–29 (2012).

18. Lionello, P., Galati, M. & Elvini, E. Extreme storm surge and wind wave climate scenario simulations at the Venetian littoral. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **40,** 86–92 (2012).

19. Mel, R., Sterl, A. & Lionello, P. High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **13,** 1135–1142 (2013).

20. Pugh, D. T. *Tides, Surges and Mean Sea-Level* (John Wiley & Sons Ltd., 1987).

21. Vilibić, I. The role of the fundamental seiche in the Adriatic coastal floods. *Continental Shelf Research* **26,** 206–216 (2006).

22. Bonato, N., Egiatti, G., Ferla, M. & Filippi, M. Tidal observations in the Venetian Lagoon. Update on sea level change from 1872 to 2000. *Book of Abstract, Final Workshop of COST Action* **40,** 97–105 (2001).

23. Mosetti, F. Problems on storm surges forecasting in the Northern Adriatic Sea. *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata* **3,** 263–297 (1985).

24. Bertotti, L., Bidlot, J. R., Buizza, R., Cavaleri, L. & Janousek, M. Deterministic and ensemble-based prediction of Adriatic Sea sirocco storms leading to 'acqua alta' in Venice. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137,** 1446–1466 (2011).

25. Finizio, C., Palmieri, S. & Riccucci, A. A numerical model of the Adriatic for the prediction of high tides at Venice. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **98,** 86–104 (1972).

26. Accerboni, E. & Manca, B. Storm surges forecasting in the Adriatic Sea by means of a two-dimensional hydrodynamical numerical model. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* **15,** 3–22 (1973).

27. Stravisi, F. Analysis of a storm surge in the Adriatic Sea by means of a two-dimensional linear model. *Atti Della Accademia Nazionale Dei Lincei. Rendiconti Della Classe Di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali* **54,** 243–260 (1973).

28. De Zolt, S., Lionello, P., Nuhu, A. & Tomasin, A. The disastrous storm of 4 November 1966 on Italy. *Natural Hazards and Earth System Science* **6,** 861–879 (2006).

29. Cavaleri, L. *i dr.* Predictability of extreme meteo-oceanographic events in the Adriatic Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136,** 400–413 (2010).

30. Otnes, R. K. & Enochson, L. *Applied Time Series Analysis* (Wiley, 1978).

31. Dee, D. P. *i dr.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137,** 553–597 (2011).

32. Uppala, S. M. *i dr.* The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **131,** 2961–3012 (2005).

33. Cavaleri, L. & Bertotti, L. In search of the correct wind and wave fields in a minor basin. *Monthly Weather Review* **125,** 1964–1975 (1997).

34. Cavaleri, L. & Bertotti, L. The improvement of modelled wind and wave fields with increasing resolution. *Ocean Engineering* **33,** 553–565 (2006).

35. Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences* **28,** 929–937 (2002).

36. Mosetti, F. Distribuzione delle maree nei mari italiani. *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata* **5,** 65–72 (1987).

37. *Tablice morskih mijena: Jadransko more – istočna obala* (ur. Cvetković, C.) (Hrvatski hidrografski institut, Split, 1991).

38. *Tablice morskih mijena: Jadransko more – istočna obala* (ur. Čupić, S.) (Hrvatski hidrografski institut, Split, 2012).

39. Kasumović, M. Dinamički utjecaj atmosfere na kolebanje razine Jadranskog mora. *Rasprave odjela za matematičke, fizičke i tehničke nauke JAZU,* 23–39 (1959).

40. Corsini, S. & Ferla, M. *Sea-Level Observing Activities in Italy* <`http://www.gloss-sealevel.org/sites/gloss/files/publications/documents/italy_gex2007.pdf`> (2007).

41. Malguzzi, P., Grossi, G., Buzzi, A., Ranzi, R. & Buizza, R. The 1966 "century" flood in Italy: a meteorological and hydrological revisitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **111,** D24106 (2006).

42. Murty, T. S. Storm Surges – Meteorological Ocean Tides. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, Canadian Department of Fisheries and Oceans* **212,** 897 pp (1984).

43. Lionello, P., Sanna, A., Elvini, E. & Mufato, R. A data assimilation procedure for operational prediction of storm surge in the northern Adriatic Sea. *Continental Shelf Research* **26,** 539–553 (2006).

44. Lamb, H. *Hydrodynamics* (Cambridge University Press, 1993).

45. Karabeg, M. & Orlić, M. The influence of air pressure on sea level in the North Adriatic – a frequency-domain approach. *Acta Adriatica* **23,** 21–27 (1982).

46. Orlić, M., Kuzmić, M. & Pasarić, Z. Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing. *Continental Shelf Research* **14,** 91–116 (1994).

47. Smith, S. D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *Journal of Physical Oceanography* **10,** 709–726 (1980).

48. Zhang, Y. & Baptista, A. M. SELFE: a semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling* **21,** 71–96 (2008).

49. Zhang, Y. *SCHISM theory manual* <`http://ccrm.vims.edu/schismweb/combined_theory_manual.pdf`> (2014).

50. Marcos, M., Tsimplis, M. N. & Shaw, A. G. Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **114,** C01007 (2009).

51. Schwab, D. J. & Rao, D. B. Barotropic oscillations of the Mediterranean and Adriatic Seas. *Tellus A* **35,** 417–427 (1983).

52. Lionello, P. Extreme storm surges in the Gulf of Venice: present and future climate. *Flooding and Environmental Challenges for Venice and Its Lagoon: State of Knowledge,* 59–69 (2005).

53. Međugorac, I., Pasarić, M., Pasarić, Z. & Orlić, M. Two recent storm-surge episodes in the Adriatic. *International Journal of Safety and Security Engineering* **6,** 589–596 (2016).

54. Cavaleri, L. & Bertotti, L. The characteristics of wind and wave fields modelled with different resolutions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **129,** 1647–1662 (2003).

55. Menendez, M. *i dr.* High-resolution sea wind hindcasts over the Mediterranean area. *Climate Dynamics* **42,** 1857–1872 (2014).

56. Dutour Sikirić, M., Janeković, I., Tomažić, I., Kuzmić, M. & Roland, A. Comparison of ALADIN and IFS model wind speeds over the Adriatic. *Acta Adriatica* **56,** 67–82 (2015).

57. Belušić, A. *i dr.* Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: insights from an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics* **50,** 4455–4480 (2018).

58. Jacob, D. *i dr.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* **14,** 563–578 (2014).

59. Kotlarski, S. *i dr.* Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development* **7,** 1297–1333 (2014).

60. Ruti, P. M. *i dr.* MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* **97,** 1187–1208 (2016).

61. Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93,** 485–498 (2012).

62. Moss, R. H. *i dr.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463,** 747–756 (2010).

63. Fisz, M. *Probability Theory and Mathematical Statistics* (John Wiley & Sons Ltd., 1980).

64. Perkins, S., Pitman, A., Holbrook, N. & McAneney, J. Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate* **20,** 4356–4376 (2007).

65. Orlić, M. & Pasarić, M. Sea-level changes and crustal movements recorded along the east Adriatic coast. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C-Geophysics & Space Physics* **23,** 351–364 (2000).

66. Pasarić, M., Pasarić, Z. & Orlić, M. Response of the Adriatic sea level to the air pressure and wind forcing at low frequencies (0.01–0.1 cpd). *Journal of Geophysical Research: Oceans* **105,** 11423–11439 (2000).

67. Tosi, L., Teatini, P. & Strozzi, T. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific Reports* **3,** 2710 (2013).

68. Leduc, M. & Laprise, R. Regional climate model sensitivity to domain size. *Climate Dynamics* **32,** 833–854 (2009).

69. Giorgi, F. & Lionello, P. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* **63,** 90–104 (2008).

70. Stocker, T. *i dr. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ur. Stocker, T.) (Cambridge University Press, 2014).

71. Gualdi, S. *i dr.* The CIRCE simulations: regional climate change projections with realistic representation of the Mediterranean Sea. *Bulletin of the American Meteorological Society* **94,** 65–81 (2013).

72. Adloff, F. *i dr.* Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Climate Dynamics* **45,** 2775–2802 (2015).

73. Bargagli, A. *i dr.* An integrated forecast system over the Mediterranean basin: extreme surge prediction in the northern Adriatic Sea. *Monthly Weather Review* **130,** 1317–1332 (2002).

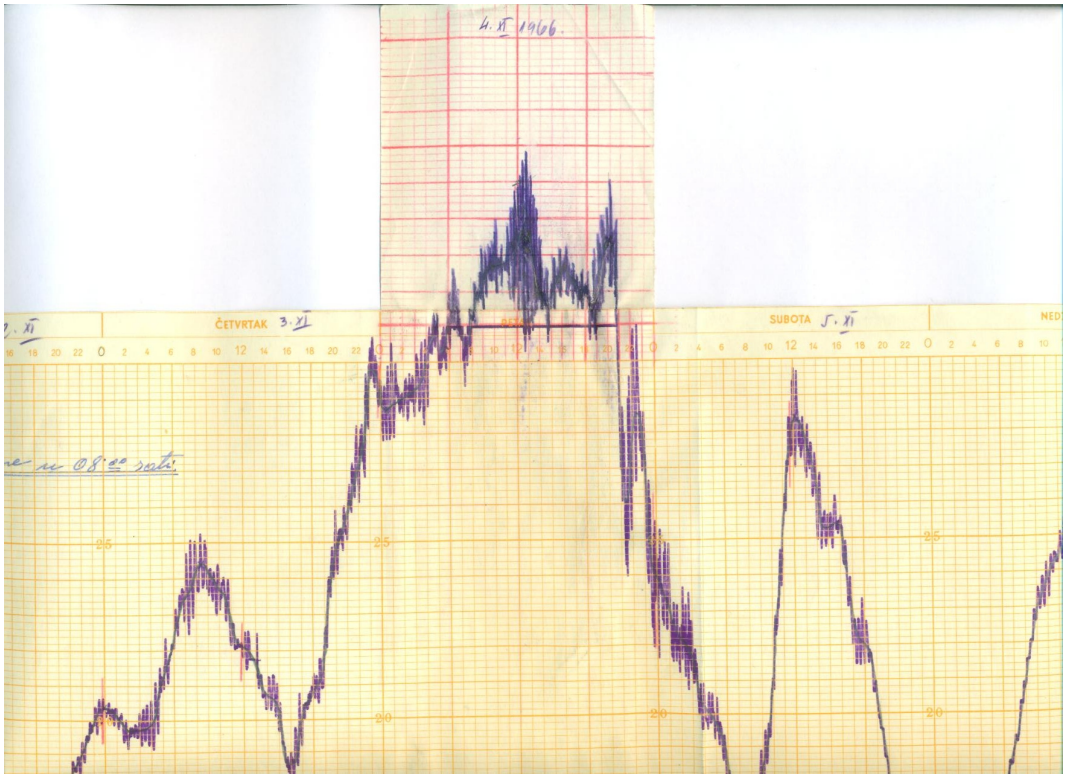
74. Zampato, L., Bajo, M., Canestrelli, P. & Umgiesser, G. Storm surge modelling in Venice: two years of operational results. *Journal of Operational Oceanography* **9,** s46–s57 (2016).

75. *Institut za oceanografiju i ribarstvo: ADRISC* <`http://faust.izor.hr/autodatapub/adrisc?jezik=eng`> (2018).

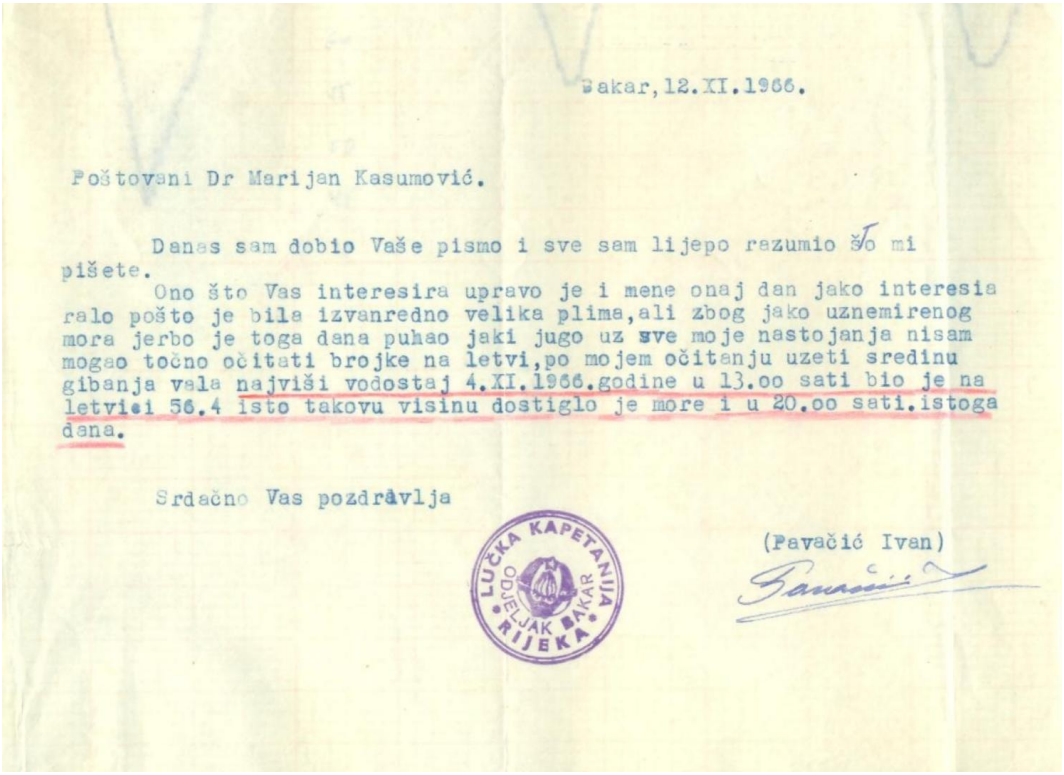
76. *GEKOM: BORA Adriatic Marine Forecast* <`http://bora.gekom.hr/karte.php?page=more#`> (2018).

Dodatak A

U ovom prilogu prikazane su dodatne slike za potrebe poglavlja 2.



Slika A.1: Dio bakarskog mareograma za vrijeme velike jadranske poplave 4. studenoga 1966.



Bakar, 12.XI.1966.

Poštovani Dr Marijan Kasumović.

Danas sam dobio Vaše pismo i sve sam lijepo razumio što mi pišete.

Ono što Vas interesira upravo je i mene onaj dan jako interesiralo pošto je bila izvanredno velika plima, ali zbog jako uznemirenog mora jerbo je toga dana puhao jaki jugo uz sve moje nastojanja nisam mogao točno očitati brojke na letvi, po mojem očitanju uzeti sredinu gibanja vala najviši vodostaj 4.XI.1966.godine u 13.oo sati bio je na letvisi 56.4 isto takovu visinu dostiglo je more i u 20.oo sati.istoga dana.

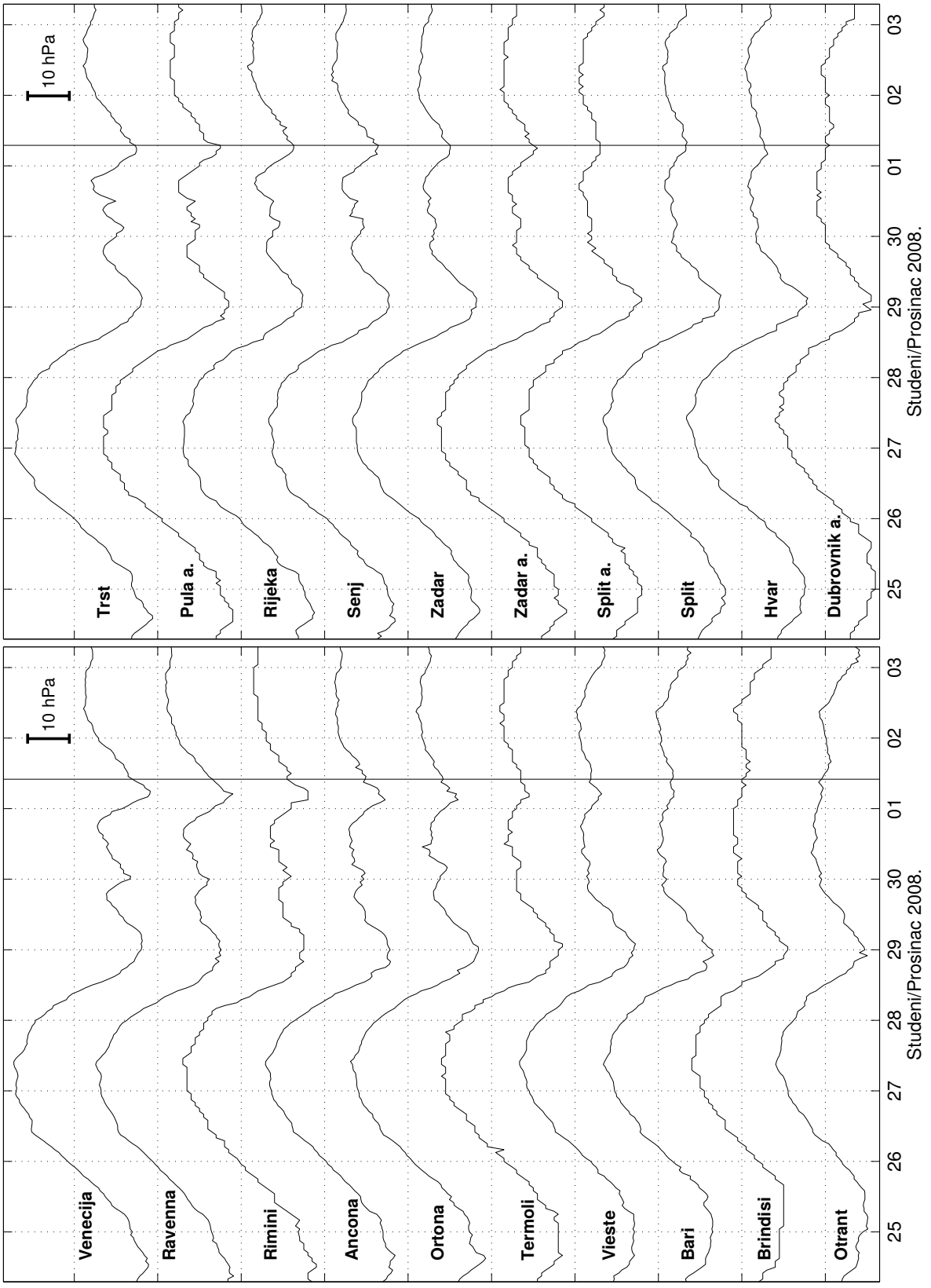
Srdačno Vas pozdravlja

LUČKA KAPETANIJA ODJELJAK BAKAR RIJEKA

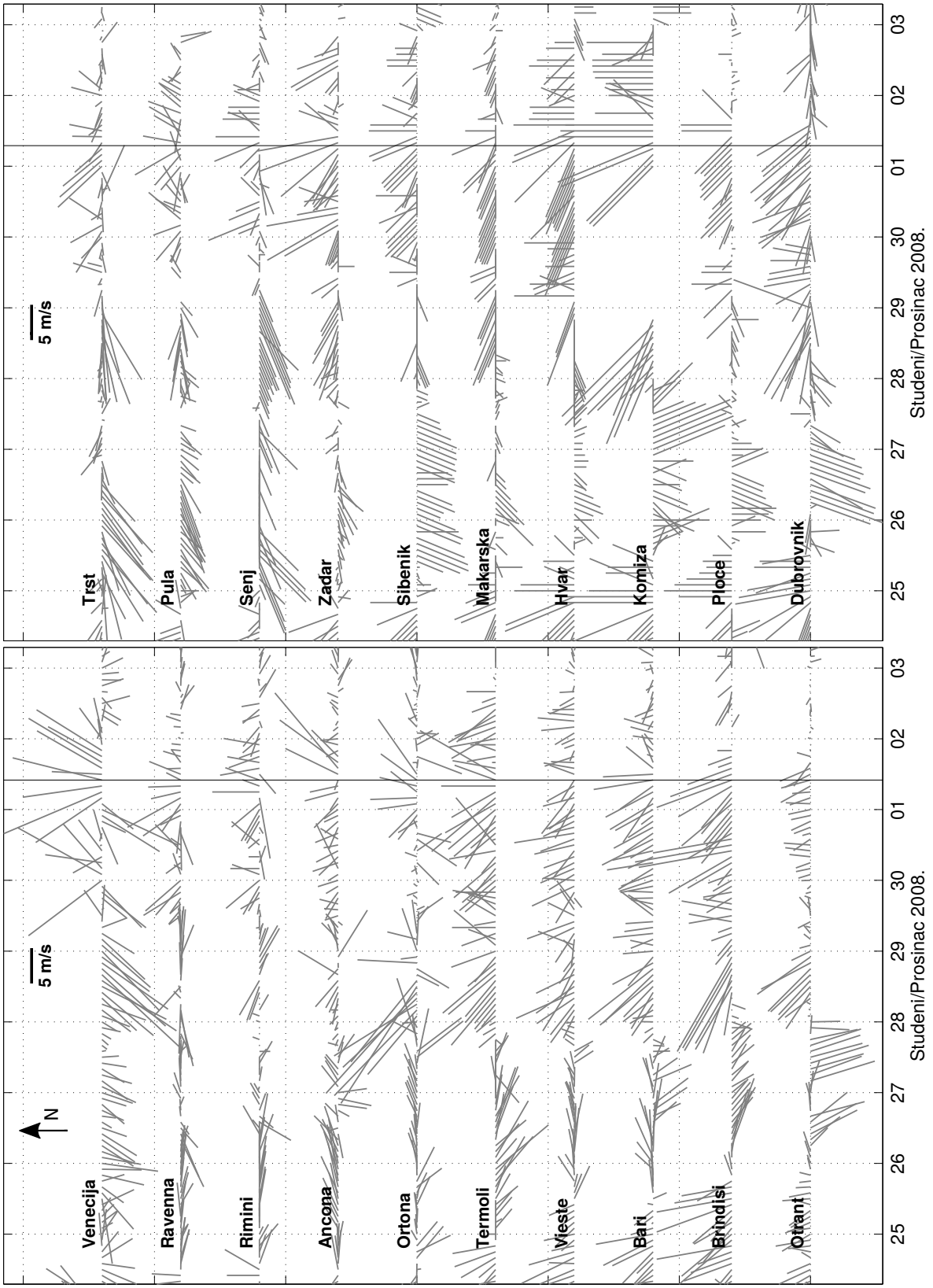
(Pavačić Ivan)

Pavačić

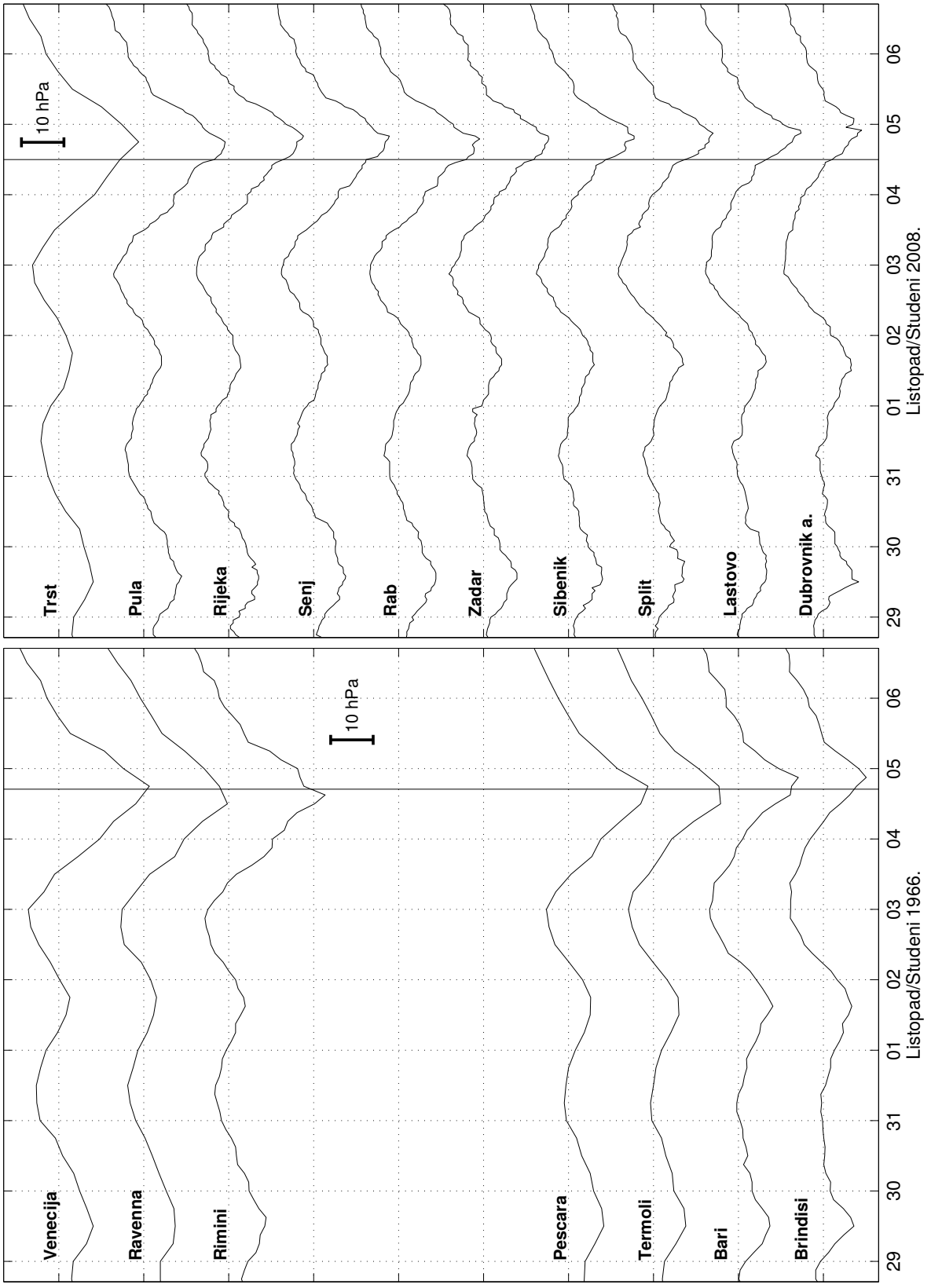
Slika A.2: Pismo Ivana Pavačića, motritelja na mareografskoj stanici Bakar, profesoru Marijanu Kasumoviću, voditelju postaje, nekoliko dana nakon poplave.



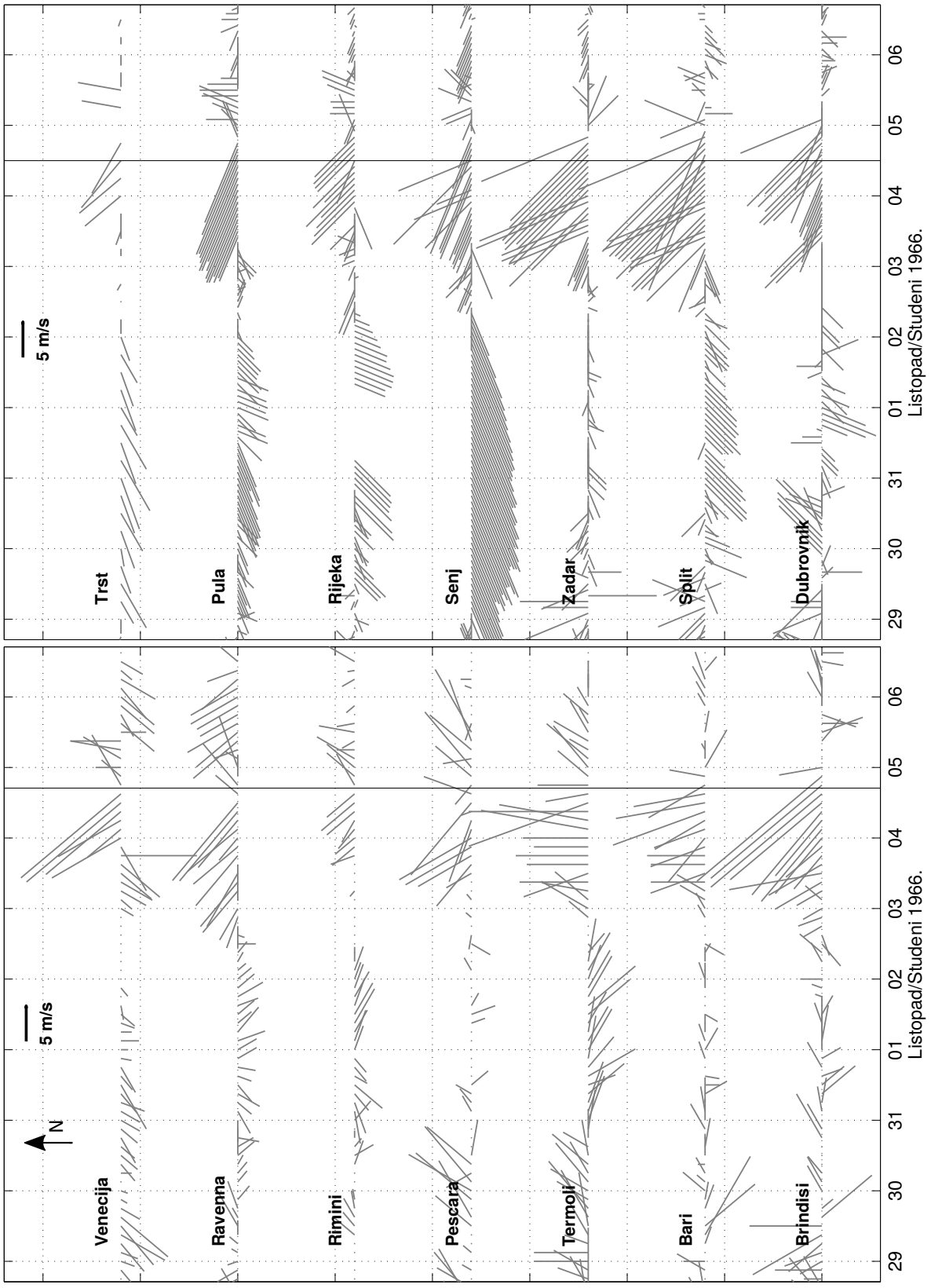
Slika A.3: Nizovi tlaka zraka mjereni na priobalnim meteorološkim postajama za poplavu iz 2008. Podaci su prikazani, s proizvoljnim posmakom, u odnosu na referentnu vrijednost od 1013 hPa. Radi jasnoće podaci su prikazani samo na odabranim postajama u razdoblju od nekoliko dana oko glavnog događaja. Vertikalne linije, ovdje i na sljedećim slikama, označavaju nastup maksimuma vodostaja u Bakru (*desno*) i Veneciji (*lijevo*).



Slika A.4: Nizovi vjetra mjereni na priobalnim meteorološkim postajama za poplavu iz 2008. Radi jasnoće prikazani su podaci samo na odabranim postajama u razdoblju od nekoliko dana oko glavnog događaja.



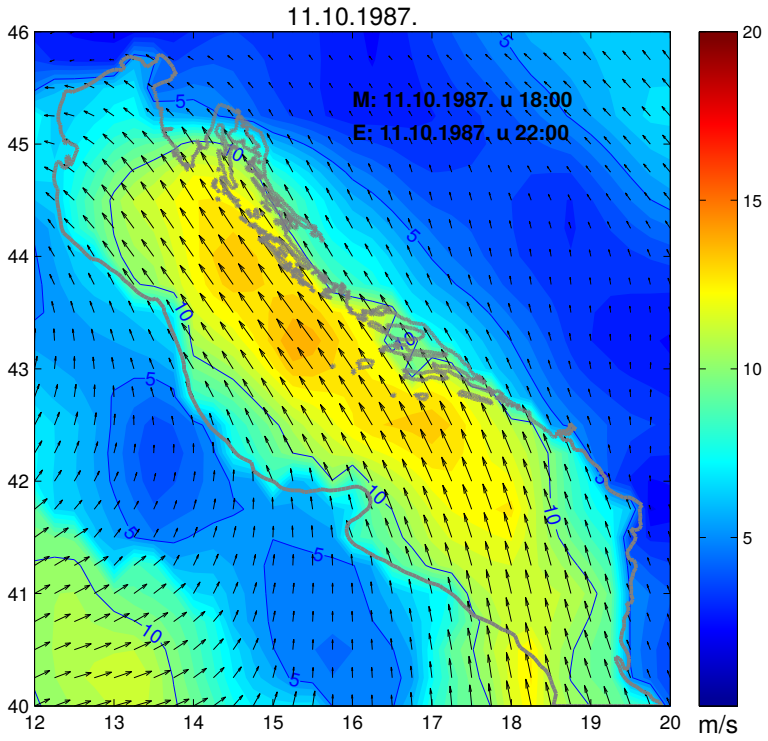
Slika A.5: Nizovi tlaka zraka, kao na slici A.3, samo za poplavu iz 1966.



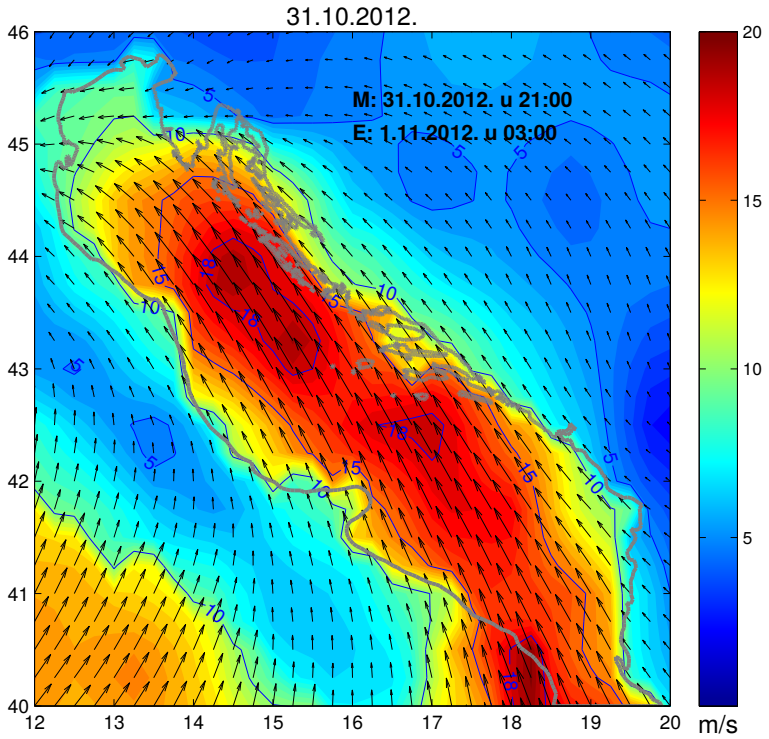
Slika A.6: Nizovi vjetra, kao na slici A.4, samo za poplavu iz 1966.

Dodatak B

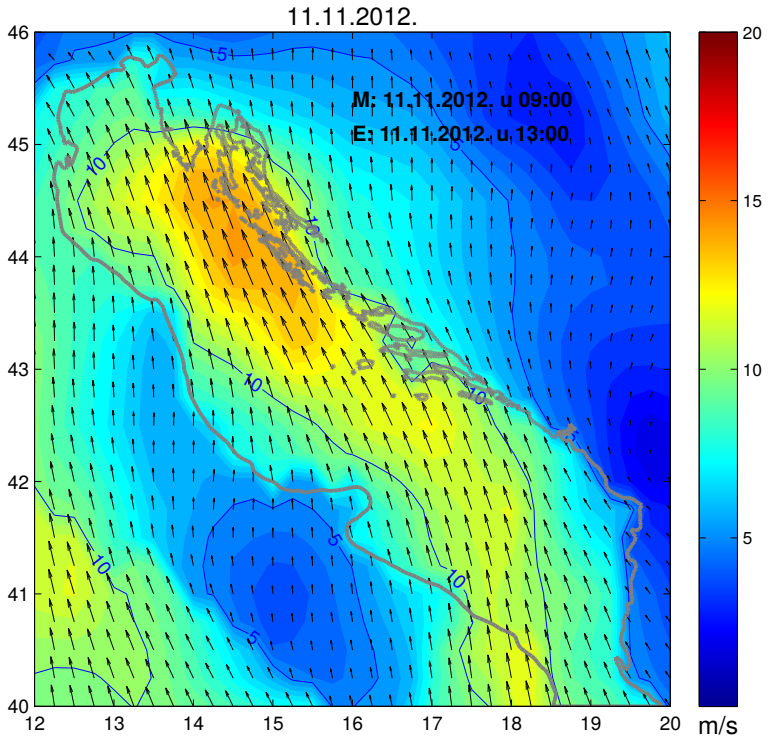
U ovom prilogu prikazane su dodatne slike za potrebe poglavlja 3.



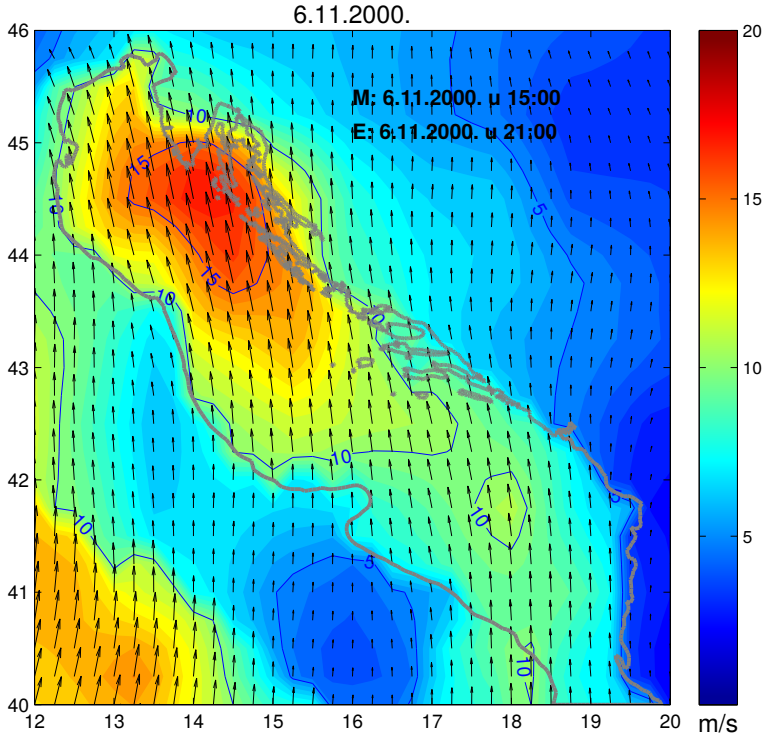
Slika B.1: Polje vjetra za epizodu **3**. Na slici je naznačen termin meteorološkog polja (M) i termin nastupa pripadnog maksimuma rezidualnog vodostaja (E).



Slika B.2: Isto kao na slici B.1, samo za epizodu **28**.



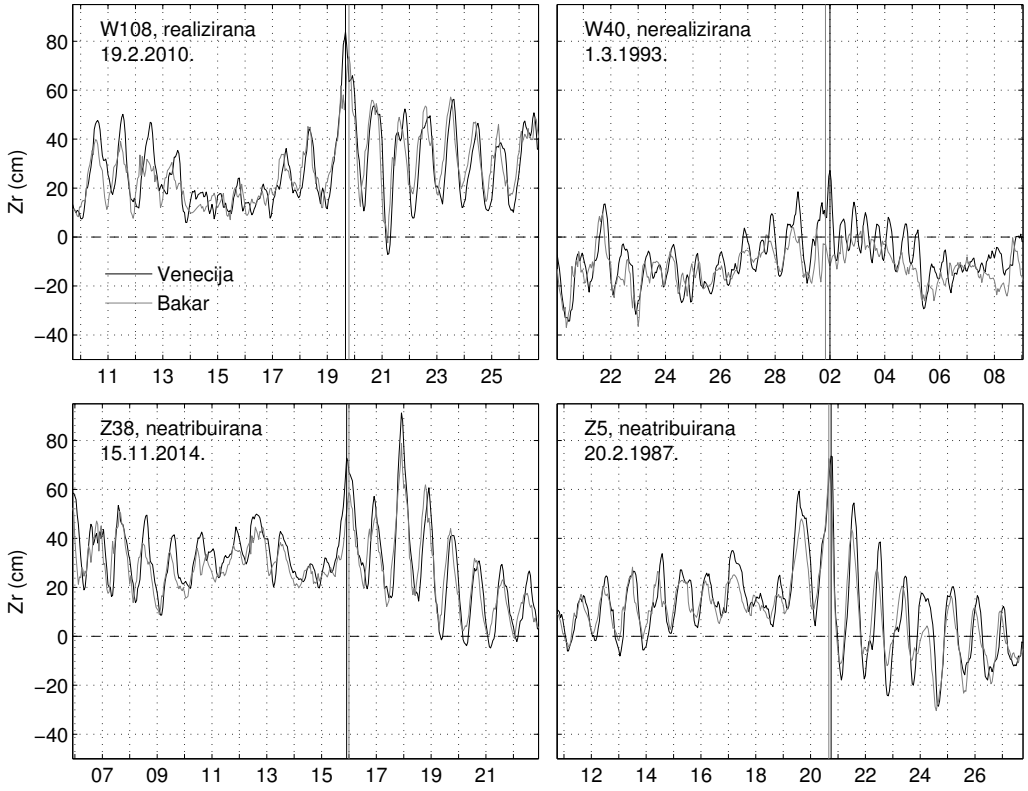
Slika B.3: Isto kao na slici B.1, samo za epizodu **30**. Ova epizoda odudara od ostalih u tipu W.



Slika B.4: Isto kao na slici B.1, samo za epizodu **15**. Ova epizoda odudara od ostalih u tipu W.

Dodatak C

U ovom prilogu prikazane su dodatne slike i tablice za potrebe poglavlja 4.



Slika C.1: Rezidualni vodostaj za dvije vjetrovne (W108 i W40) i dvije neatribuirane razinske epizode (Z38 i Z5). Lijevo su prikazani slučajevi s iznimno povišenom dugoperiodičkom komponentom, a desno oni pod utjecajem prethodno generiranog seša amplitude usporedive s glavnim maksimumom. Također, u slučaju epizode W40 dugoperiodička komponenta je bila jako negativna. Jesu li događaji u konačnici rezultirali visokim vodostajem ovisilo je o odnosu iznosa i relativnih faza svih doprinosa.

Tablica C.1: Medijani godišnjih **frekvencija** vjetrovnih epizoda u sadašnjoj te u budućoj klimi za dva scenarija dobiveni pomoću tri regionalna klimatska modela, uz rubne i početne uvjete iz odgovarajućih globalnih modela. Masnim brojevima označene su simulacije čije se distribucije značajno razlikuju od povijesnih (prema WMW testu).

Model		Povijesno (god^{-1})	2041. - 2070. (god^{-1})		2071. - 2100. (god^{-1})	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	9.50	10.00	10.50	10.00	8.00
RCA4	CNRM-CM5	10.50	10.50	10.50	11.00	9.50
	MPI-ESM-LR	11.00	11.00	11.00	8.00	10.00
	HadGEM2-ES	6.50	5.50	6.50	6.00	**4.50**
	EC-EARTH	7.00	8.00	8.00	7.00	7.00
	IPSL-CM5	9.00	11.00	10.00	11.50	11.00
RegCM4	CNRM-CM5	19.50	17.00	19.50		
	MPI-ESM-MR	19.50	17.00	16.50		
	HadGEM2-ES	19.00	22.00	21.00		
	EC-EARTH	17.50	18.50	18.00		

Tablica C.2: Isto kao u tablici C.1 ali za **brzine** vjetra.

Model		Povijesno (m/s)	2041. - 2070. (m/s)		2071. - 2100. (m/s)	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	11.25	11.32	11.14	**11.49**	11.13
RCA4	CNRM-CM5	11.34	11.38	11.25	11.52	11.40
	MPI-ESM-LR	11.48	11.47	11.37	11.48	11.36
	HadGEM2-ES	11.18	11.28	11.38	11.26	11.06
	EC-EARTH	11.18	11.20	11.28	11.24	11.19
	IPSL-CM5	11.19	11.15	11.15	**11.53**	11.20
RegCM4	CNRM-CM5	12.51	**12.80**	12.40		
	MPI-ESM-MR	12.29	**12.63**	12.48		
	HadGEM2-ES	12.66	12.40	12.50		
	EC-EARTH	12.21	**12.59**	12.56		

Tablica C.3: Medijani godišnjih **frekvencija** vjetrovnih epizoda **tipa W** u sadašnjoj te u budućoj klimi za dva scenarija dobiveni pomoću tri regionalna klimatska modela, uz rubne i početne uvjete iz odgovarajućih globalnih modela. Masnim brojevima označene su simulacije čije se distribucije značajno razlikuju od povijesnih (prema WMW testu).

Model		Povijesno (god^{-1})	2041. - 2070. (god^{-1})		2071. - 2100. (god^{-1})	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	3.50	3.00	3.00	4.00	**2.00**
RCA4	CNRM-CM5	4.00	4.00	3.00	4.00	3.00
	MPI-ESM-LR	3.00	4.00	3.50	3.00	4.00
	HadGEM2-ES	2.00	1.00	2.00	1.00	**1.00**
	EC-EARTH	3.00	2.50	3.00	3.00	**2.00**
	IPSL-CM5	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
RegCM4	CNRM-CM5	5.00	5.00	5.00		
	MPI-ESM-MR	4.50	5.00	5.00		
	HadGEM2-ES	6.00	7.00	7.00		
	EC-EARTH	4.00	5.00	6.00		

Tablica C.4: Isto kao u C.3, samo za **tip E**.

Model		Povijesno (god^{-1})	2041. - 2070. (god^{-1})		2071. - 2100. (god^{-1})	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	1.00	1.00	1.50	1.00	2.00
RCA4	CNRM-CM5	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00
	MPI-ESM-LR	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00
	HadGEM2-ES	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00
	EC-EARTH	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	IPSL-CM5	2.00	**3.50**	**3.00**	2.00	**3.00**
RegCM4	CNRM-CM5	3.00	3.00	4.00		
	MPI-ESM-MR	3.00	2.00	3.00		
	HadGEM2-ES	3.00	2.00	2.00		
	EC-EARTH	3.00	3.00	2.00		

Tablica C.5: Medijani **brzina** vjetrovnih epizoda **tipa W** u sadašnjoj te u budućoj klimi za dva scenarija dobiveni pomoću tri regionalna klimatska modela, uz rubne i početne uvjete iz odgovarajućih globalnih modela. Masnim brojevima označene su simulacije čije se distribucije značajno razlikuju od povijesnih (prema WMW testu).

Model		Povijesno (m/s)	2041. - 2070. (m/s)		2071. - 2100. (m/s)	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	11.90	11.93	11.67	12.31	12.15
RCA4	CNRM-CM5	11.67	11.97	11.67	12.01	12.00
	MPI-ESM-LR	11.87	11.69	11.62	12.01	11.73
	HadGEM2-ES	11.29	11.47	11.61	11.57	12.25
	EC-EARTH	11.44	11.36	11.80	12.07	12.02
	IPSL-CM5	11.92	11.48	11.57	11.51	11.95
RegCM4	CNRM-CM5	13.57	**14.26**	13.47		
	MPI-ESM-MR	13.52	13.42	13.36		
	HadGEM2-ES	13.46	13.19	13.64		
	EC-EARTH	13.56	13.85	13.41		

Tablica C.6: Isto kao u C.5, samo za **tip E**.

Model		Povijesno (m/s)	2041. - 2070. (m/s)		2071. - 2100. (m/s)	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
ALADIN52	CNRM-CM5	10.53	10.70	10.54	10.51	10.60
RCA4	CNRM-CM5	10.75	10.63	10.78	11.06	10.65
	MPI-ESM-LR	10.75	10.96	10.88	10.90	10.89
	HadGEM2-ES	10.94	10.89	10.92	10.80	10.46
	EC-EARTH	10.77	10.78	10.57	10.51	11.00
	IPSL-CM5	10.77	10.86	10.80	**11.17**	10.80
RegCM4	CNRM-CM5	11.36	11.50	11.19		
	MPI-ESM-MR	11.13	11.38	11.17		
	HadGEM2-ES	11.33	11.60	11.14		
	EC-EARTH	10.88	11.44	11.33		

Životopis

Iva Međugorac rođena je 8. srpnja 1982. godine. Srednju školu (opću gimnaziju) završila je 2001. u Žepču (Bosna i Hercegovina), nakon čega je upisala studij fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je u listopadu 2008. kao diplomirani inženjer fizike, usmjerenje geofizika. Sljedeće godine zaposlila se kao stručni suradnik na Geofizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu i upisala poslijediplomski doktorski studij fizike, smjer geofizika. Iva je asistentica na preddiplomskim studijima na kolegijima *Uvod u geofizičku dinamiku fluida* i *Dinamika atmosfere i mora*. Boravila je tri mjeseca u Liverpoolu na studijskom posjetu *Proudman Oceanographic Laboratory* (Velika Britanija, 2010.). Sudjelovala je u radionici *Costal Dynamics Modeling School* (CNRS, Agelonde, Francuska, 2011.) te na tečaju *Sea-Bird Europe Open House and Training* (SBE, Kempten, Njemačka, 2012.).

Sudjelovala je u organizaciji međunarodnog znanstvenog skupa *Geofizički izazovi 21. stoljeća* (2011.) u Zagrebu te u uređivanju knjige *Nulla dies sine observatione, 150 godina Geofizičkog zavoda u Zagrebu* (2011.).

Iva je glavna autorica na tri članka objavljena u časopisima s međunarodnom recenzijom te je sudjelovala na tri međunarodne konferencije na kojima je predstavila vlastita istraživanja u obliku usmenog izlaganja (MIPRO 2011, FRIAR 2016, MetMED6 & MI5 2017).

Popis radova

Izvorni znanstveni radovi u časopisima indeksiranim u bazi *Current Contents*

1. Međugorac, I., Pasarić, M. & Orlić, M. Severe flooding along the eastern Adriatic coast: the case of 1 December 2008. *Ocean Dynamics* **65,** 817–830 (2015).
2. Šepić, J., Međugorac, I., Janeković, I., Dunić, N. & Vilibić, I. Multi-meteotsunami event in the Adriatic Sea generated by atmospheric disturbances of 25-26 June 2014. *Pure and Applied Geophysics* **173,** 4117–4138 (2016).
3. Međugorac, I., Orlić, M., Janeković, I., Pasarić, M. & Pasarić, Z. Adriatic storm surges and related cross-basin sea-level slope. *Journal of Marine Systems* **181,** 79–90 (2018).

Znanstveni radovi u drugim časopisima

1. Međugorac, I., Pasarić, M., Pasarić, Z. & Orlić, M. Two recent storm-surge episodes in the Adriatic. *International Journal of Safety and Security Engineering* **6,** 589–596 (2016).

Sažeci u zbornicima skupova

1. Međugorac, I., Pasarić, M. & Orlić, M. *An analysis of the Adriatic storm surge of 1 December 2008* (MIPRO, 2011).

2. Pasarić, Z., Međugorac, I. & Orlić, M. *First CTD measurements with towed undulating vehicle in Croatian coastal waters* (CIESM, 2013).
3. Međugorac, I., Pasarić, M., Pasarić, Z. & Orlić, M. *Two recent storm-surge episodes in the Adriatic* (FRIAR, 2016).
4. Međugorac, I., Orlić, M., Janeković, I., Pasarić, Z. & Pasarić, M. *Intensive Adriatic storm-surge episodes and related across-basin sea-level slope* (MetMED 6 i MI 5, 2017).
5. Pasarić, Z., Međugorac, I., Supić, N., Djakovac, T. & Orlić, M. *Mesoscale variability observed in the Northern Adriatic in autumn 2016* (EGU, 2017).
6. Bajo, M., Međugorac, I., Ferrarin, C., Umgiesser, G. & Orlić, M. *A study of storm surges and seiches in the Adriatic Sea by means of observations and modelling* (EGU, 2018).