

# Koherentnost promjena razine mora na Blitvenici i u Splitu

---

**Dominović, Iva**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:965004>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Iva Dominović

Koherentnost promjena razine mora na  
Blitvenici i u Splitu

Diplomski rad

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Diplomski sveučilišni studij Fizika – Geofizika  
Smjer: Meteorologija i fizička oceanografija

**Iva Dominović**

Diplomski rad

# **Koherentnost promjena razine mora na Blitvenici i u Splitu**

Voditeljica diplomskog rada: dr. sc. Miroslava Pasarić

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_  
2. \_\_\_\_\_  
3. \_\_\_\_\_

Zagreb, 2020.

Zahvaljujem najprije svojim roditeljima Vanji i Miroslavu na svojoj potpori koju mi pružaju u životu, a koja mi je osobito značila tijekom studija. Također hvala bratu Toniju što je precrtao skice mareografa i mjernog postava u program AutoCAD i time pridonio estetici ovog rada. Dragoj Bjanki i dragom Bojanu hvala na pomoći u traženju zatipaka i moralnoj potpori tijekom završavanja rada. Mentorici dr. sc. Miroslavi Pasarić zahvaljujem na svom strpljenju i pomoći prilikom rada na ovom istraživanju te što je zanimljivim nastavnim vježbama dodatno potaknula moju ljubav prema oceanografiji.

Zahvaljujem Hrvatskom hidrografskom institutu koji je ustupio podatke o razini mora na postaji Split-luka. Rad je dijelom financiran sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u okviru projekta MAUD (IP-2018-01-9849).

## Sažetak

U ovom radu analizirana su mjerenja morske razine s postaje Split-luka i s otoka Blitvenice za razdoblje 7. lipnja – 25. listopada 2019. godine. Cilj analize bio je utvrditi jesu li tijekom tog razdoblja postojale razlike u denivelacijama morske razine između navedenih postaja kojima bi uzrok mogla biti pojava izranjanja kraj otoka Blitvenice. Analiza je vršena usporedno za dvije postaje. Najprije su razmatrani baroklini i barotropni doprinosi denivelaciji kod Blitvenice te je utvrđeno kako je baroklini doprinos 20 puta manji od barotropnog doprinosa. Minutni i 15-minutni nizovi denivelacija svodeni su na satne nizove korištenjem niskopropusnog filtra s točkom polovice snage na  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Nad tako dobivenim nizovima provedena je harmonijska analiza i sinteza nakon čega je rekonstruirani plimni signal oduzet od satnih vrijednosti denivelacija. U nastalom rezidualnom nizu trebalo je ukloniti 1. i 2. mod jadranskog seša koji u analizi izranjanja predstavljaju neželjeni šum. Zatim su razmatrane korelacije između rezidualnih nizova za postaje Split-luka i Blitvenica gdje je utvrđeno kako nema potrebe za uvođenjem vremenskog posmaka od +1 ili -1 sat pri uspoređivanju nizova. Uspoređivanjem vremenskih nizova iznosa brzine i rezidualnih nizova denivelacije utvrđeno je da su dva najdulja razdoblja u kojima je moglo doći do pojave izranjanja bila 13.6. – 6.7.2019. i 29.7. – 6.8.2019. godine. Tada je većinom puhao vjetar sjeverozapadnog smjera (etezije) s povremenim epizodama puhanja snažnog sjeveroistočnog vjetra (bure) te bi ukupni pad razine mora mogao biti rezultat superponiranih utjecaja ovih dvaju vjetrova. Stoga, u daljnjem istraživanju mehanizma izranjanja kod otoka Blitvenice trebalo bi dodatnu pažnju posvetiti razlučivanju epizoda puhanja sjeverozapadnog i sjeveroistočnog vjetra.

Ključne riječi: izranjanje, Blitvenica, denivelacija, baroklini doprinos, barotropni doprinos, plimni signal, etezije, bura

# Coherence of sea level variability at Blitvenica and Split

## Abstract

This thesis analyses sea level measurements from stations Split-port and the island of Blitvenica for the period from June 7<sup>th</sup> to October 25<sup>th</sup> 2019. The goal of the analysis was to detect whether any differences between the denivelation time series at the two stations occurred during that period that could be explained by upwelling near the island of Blitvenica. The analysis was done simultaneously for the two stations. Firstly, baroclinic and barotropic contributions to denivelation were observed and it was determined that baroclinic contribution is 20 times smaller than the barotropic contribution. One-minute and fifteen-minute denivelation time series were reduced to hourly sampled series using low-pass filter with half-power point at  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . After that, harmonic analysis and synthesis were applied and the reconstructed tidal signal was subtracted from the hourly denivelation time series. In the newly formed residual time series it was necessary to remove the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> mode of the Adriatic basin seiche that represented an unwanted noise. Afterwards, correlation coefficients between residual time series from Split-port and Blitvenica were calculated and it was concluded that there was no need to take +1 and -1 hour time shift into consideration during comparison of the two time series. By comparing time series of wind speeds and residual denivelation time series it was concluded that two longest periods of potential upwelling events took place from June 13<sup>th</sup> to July 6<sup>th</sup> and from July 29<sup>th</sup> to August 6<sup>th</sup> 2019. During these periods wind was blowing mostly from northwesterly direction (the Etesian winds) with occasional events of intense northeasterly wind (bora), which indicates that the total drop in denivelation may be a result of superimposed influences of these two winds. Thus, in further research there should be an extra effort taken to differ northwesterly wind impact from northeasterly wind impact on the upwelling mechanism near the island of Blitvenica.

Keywords: upwelling, Blitvenica, denivelation, baroclinic contribution, barotropic contribution, tidal signal, the Etesian, bora

# Sadržaj

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Uvod</b>                          | <b>1</b>  |
| <b>2. Teorijska pozadina</b>            | <b>5</b>  |
| 2.1. Oscilacije morske razine . . . . . | 5         |
| 2.2. Izranjanje . . . . .               | 8         |
| 2.3. Denivelacije . . . . .             | 12        |
| <b>3. Podatci i metode analize</b>      | <b>14</b> |
| 3.1. Programski jezici . . . . .        | 14        |
| 3.2. Podatci . . . . .                  | 15        |
| 3.3. Metode analize . . . . .           | 20        |
| <b>4. Rezultati i diskusija</b>         | <b>24</b> |
| 4.1. Rezultati . . . . .                | 24        |
| 4.2. Diskusija . . . . .                | 36        |
| <b>5. Zaključak</b>                     | <b>42</b> |
| <b>Dodatak</b>                          | <b>46</b> |
| <b>A Popis kratica</b>                  | <b>46</b> |

# 1. Uvod

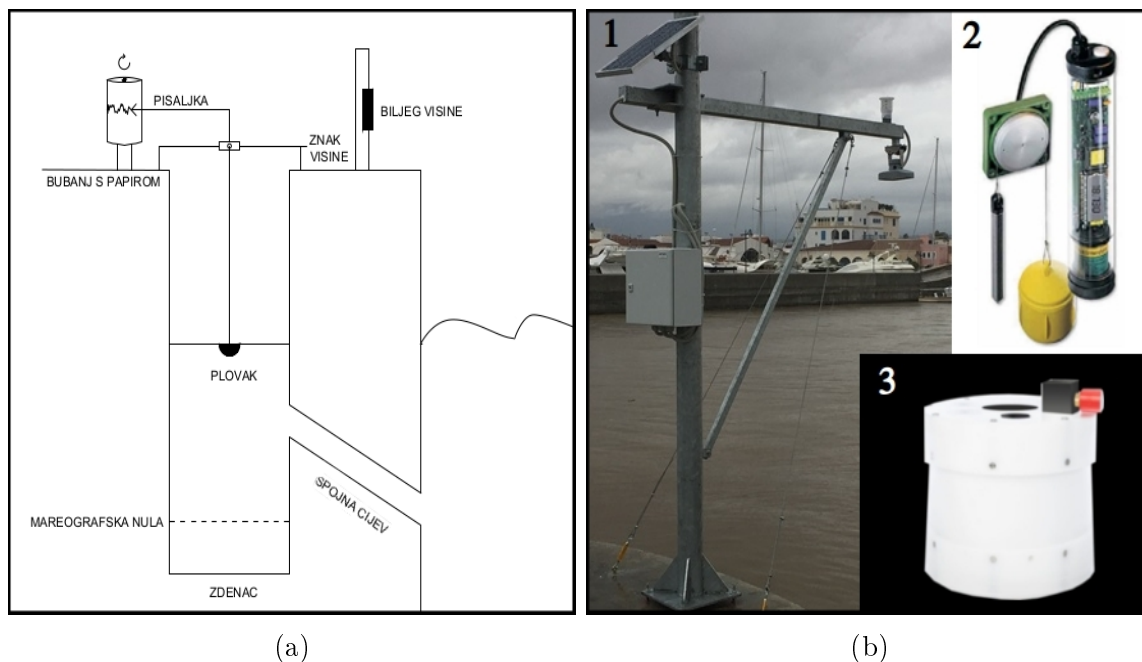
Razina vode u stajaćicama ili tekućicama podrazumijeva visinu stupca vode u nekom trenutku u odnosu na neku unaprijed određenu kopnenu točku. Od davnina je ljudima poznata važnost praćenja razine vode te su već stare civilizacije provodile opažanja riječnih i morskih razina radi organizacije navodnjavanja, plovidbe, ribarstva i drugih djelatnosti vezanih uz vode na Zemlji. Također su pažljivim astronomskim i meteorološkim motrenjima povezivali razinu vode s gibanjima Sunca i Mjeseca te stanjem atmosfere. Promjene morske razine ovise o vrsti pobude (vanjskoj sili) koja ih je uzrokovala, a takve pobude mogu biti raznolike. Ovisno o tome traje li još pobuda ili je završila, oscilacije morske razine dijelimo na prisilne i slobodne oscilacije. Stalno prisutna sila svakako je plimotvorna sila, zajednički naziv za djelovanje centrifugalne sile te interakciju gravitacijskih polja Zemlje, Sunca i Mjeseca. Za morsku plovidbu najbitnija sila jest sila trenja između vjetra (zraka koji se giba) i morske površine. Sile pobude ne dolaze samo izvan Zemlje i iz atmosfere, već i iz nje same – tsunami je oscilacija pobuđena potresom i primjer je slobodne oscilacije. Seši su pak slobodne oscilacije koje se javljaju u plićim morskim bazenima i većim jezerima, a označavaju stojne valove koji nastanu nakon prestanka pobude.

Vanjske pobude mogu se odvijati na vremenskoj skali od nekoliko minuta, poput valova uzrokovanih vjetrom, ili na duljim skalama usporedivima s jednim danom, nekoliko dana ili čak nekoliko godina, kao što je slučaj kod promjena u klimi nekog područja. Stoga, oscilacije morske razine dijele se na kratkoperiodičke i dugoperiodičke, pri čemu "kratko" i "dugo" ovisi o tome koji proces uzimamo kao referentan. U ovom su radu razmatrane promjene na skali od jednog sata do nekoliko dana te se daljnji tekst rada odnosi na takve promjene morske razine. Stoga, kratkoperiodičkima će biti smatrane oscilacije perioda do nekoliko sati, a dugoperiodičkima one perioda do nekoliko dana.

Početak prvih modernih mjerenja morske razine smatra se izum plovčanog mareografa (eng. *tide gauge*) 30-ih godina 19. stoljeća. Prvi mareografi su bili sasvim mehanički te su kontinuirano zapisivali promjene morske razine na papir namotan na bubanj, dok je za filtriranje kratkoperiodičkih oscilacija služila spojna cijev između mora i mareografskog zdenca (slika 1.1 a). Moderni mjerni uređaji (slika 1.1 b), kakve danas najčešće nalazimo na mjernim postajama, su elektromehanički te podatke uzorkuju konačnim intervalom  $\Delta t$  koje potom zapisuju u računalni format. Takvim uređajima nije potrebna cijev za filtriranje kratkoperiodičkih oscilacija jer se taj proces vrši algoritmima već ugrađenima u uređaj, stoga su sami uređaji kompaktniji i jednostavniji za održavanje od onih prvotnih. No, stariji mehanički uređaji daju kontinuirani zapis



neovisan o električnoj energiji te se iz tog razloga na nekima od najstarijih svjetskih postaja mjerenja vrše i mehaničkim i električnim uređajima.



Slika 1.1. Primjeri mareografa, uređaja za mjerenje morske razine.

- (a) Skica analognog plovčanog mareografa prema postavu H. R. Palmera iz 1831.  
 (b) Električni mareografi: 1) radarski, 2) plovčani i 3) tlačni (preuzeto i prilagođeno s mrežnih stranica Himiofost i Valeport te iz rada Vilibić i Orlić, 2005)<sup>1</sup>

Na području Republike Hrvatske nalazi se sedam stalnih postaja na kojima se mjeri morska razina. Na nekim od njih nalaze se i analogni plovčani mareografi (npr. Bakar, Split-Marjan), dok se na većini drugih postaja mjerenja zapisuju isključivo digitalno. Za potrebe ovog rada korišteni su podatci digitalnog plovčanog mareografa s postaje Split-luka, koje je na korištenje ustupio Hrvatski hidrografski institut, i podatci tlačnog mareografa postavljenog u blizini otoka Blitvenice u sklopu projekta *Middle Adriatic Upwelling and Downwelling* (dalje u tekstu: projekt *MAUD*). Cilj ovoga rada bio je ispitati javljaju li se kraj otoka Blitvenice (otvoreno more) promjene morske razine koje bi se mogle povezati s izranjanjem vodene mase (eng. *upwelling*). U tu svrhu trebalo je napraviti detaljnu analizu usporedno za podatke s otoka Blitvenice i podatke s najbliže kopnene postaje gdje ne očekujemo jako izranjanje. Stoga, za analizu je odabrana postaja Split-luka. Otok Blitvenica mali je otok udaljen približno 7 kilometara zračne udaljenosti od centra otoka Žirja u smjeru Italije te se na njemu nalazi samo svjetionik.

<sup>1</sup>Izvori za sliku 1.1 (b):

- 1) Radarski mareograf. *Mrežne stranice sustava HIMIOFOTS*. Dostupno na: <https://www.himiofots.gr/en/instruments/tide-gauge> [11. srpnja 2020.]
- 2) Digitalni plovčani mareograf. Vilibić, I., Orlić, M. (2005) A new approach to sea level observations in Croatia. *Geofizika*, 22, 21-57.
- 3) Tlačni mareograf. *Mrežne stranice tvrtke Valeport*. Dostupno na: <https://www.valeport.co.uk/products/midas-wtr-wave-and-tide-recorder/> [11. srpnja 2020.]

Analiza morske razine obično se radi s podacima o denivelaciji. Denivelacija je fizikalna veličina kojom se mjeri odstupanje morske razine u nekom trenutku od srednjaka morske razine (poželjno dugogodišnjeg) za tu prostornu točku. Za detaljnu analizu mareografskih zapisa potreban je dug, kontinuiran zapis pouzdanih mjerenja. Također, bitno je i dobro poznavanje spektralne analize čiju je upotrebu olakšao izum računala. Obzirom na navedene uvjete, prvi cjelokupni radovi koji opisuju kretanje razine Sredozemnog mora nastali su tijekom 60-ih godina prošlog stoljeća. Prema Cushman-Roisin *et al.* (2001), najveća amplituda pojedine plimne sastavnice iznosi 51 centimetar (maksimum poprima uz obale Tunisa), što je relativno malo u usporedbi sa sjevernim dijelom Atlantskog oceana gdje plimne oscilacije dosežu i do nekoliko metara (npr. 16,3 metara u zaljevu Fundy, Kanada, i 9,6 metara na ušću rijeke Severn, Velika Britanija). Osim plimnih oscilacija, na području sjevernog Jadrana zanimljive su promjene morske razine uzrokovane olujnim usporom (eng. *storm surge*) koje mogu uzrokovati znatne štete u priobalnom području. U pojedinim epizodama pojave olujnog uspora porast razine mora u odnosu na prognozirani vodostaj iznosio je čak 93,5 centimetra (podatak za Bakar prema Međugorac, 2018). Morska razina uz obalu također ovisi i o smjeru, brzini i trajanju puhanja vjetra. Za dužih razdoblja puhanja jugoistočnog vjetra (eng. *sirocco*, često nazivan i samo jugo ili jugo – široko) more biva nanoseno iz smjera puhanja prema kopnu što zna dovesti do poplava u gradovima uz obalu. Drugi zanimljiv vjetar je sjeveroistočni, tj. bura (eng. *bora*), koji puše s kopna okomito na istočnu obalu. Za razliku od juga, bura odnosi površinski sloj vode od obale u smjeru Italije. Ta se voda zamjenjuje hladnijom vodom iz dubljih slojeva što se naziva izranjanje. Zadnji vjetar, najviše razmatran u ovom radu, jest sjeverozapadni koji puše od svibnja do listopada duž jadranske obale od Venecije sve do spajanja Jadranskog s Jonskim morem. Takav vjetar još se naziva i etezije (eng. *Etesian* ili *meltemi winds*), a javlja se kao posljedica razlike centra visokog tlaka nad Azorima i centra niskog tlaka nad Azijom (Gačić *et al.*, 2001). Kada nekoliko dana za redom puše sjeverozapadni vjetar, može doći do pojave Ekmanovog transporta potpovršinskih slojeva vode u desno (Ekman, 1905), tj. prema otvorenom moru. Tada zbog očuvanja mase vodu koja otječe zamjenjuje voda iz dubljih slojeva te također dolazi do pojave izranjanja. Takva je voda bogata ostacima uginulih organizama s dna te kao takva bogat izvor hranjivih tvari zooplanktona, što područja izranjanja čini bogatima ribom. Kemijski i biološki procesi ključni za proizvodnju hrane vrlo su osjetljivi (npr. prema Kampfu i Chapmanu, 2016, mlađi određenih riba odgovara samo izranjanje uzrokovano vjetrovima brzine 7 do 8  $\text{ms}^{-1}$ ) te su izrazito podložni promjenama uvjeta u okolišu. Područja značajnog izranjanja zauzimaju 2% do 3% svjetskih mora, ali su obično bogata ribom te čine oko 90% ribolovnih područja u svijetu (Pond i Pickard, 1983). Najveća područja izranjanja nalaze se uz istočnu obalu Somalije i Arapskog poluotoka, zapadnu i južnu obalu Afrike, obalu Perua te zapadnu obalu Kanade i Sjedinjenih

Američkih Država. To su uglavnom područja oceana iznad kontinentalnog šelfa nad kojima pušu snažni i postojani vjetrovi, a izraženost sezonalnosti izranjanja ovisi o njihovoj varijabilnosti kroz godinu (Kampf i Chapman, 2016). Izranjanje do kojeg dolazi u Jadranskom moru nije toliko izraženo kao ono koje se javlja u navedenim područjima jer je za razliku od priobalnih dijelova oceana Jadran prilično plitak i uzak morski bazen omeđen s tri strane te nije izložen djelovanju stalnih vjetrova. Obzirom da se tu izranjanje odvija na manjim prostorno – vremenskim skalama, izranjanje nije jednostavno detektirati mjerenjima te je i dalje predmet mnogih istraživanja. Svrha ovoga istraživanja je bila provođenje opsežne analize morske razine kraj Blitvenice radi eventualnog pronalaženja razdoblja u kojima su postojali uvjeti za pojavu izranjanja, o kojem će dodatno biti govora u poglavlju *Teorijska pozadina*.

## 2. Teorijska pozadina

Sadržaj ovog poglavlja obuhvaća pojašnjenja analiziranih i ispitivanih procesa te popratne jednadžbe i skice koje pomažu njihovom tumačenju. Prvo potpoglavlje posvećeno je oscilacijama morske razine, njihovom odrazu na mareografski zapis i odzivu morske razine na vjetrovnu pobudu. Potom slijedi opis procesa izranjanja i njegovih značajki. Zadnje potpoglavlje posvećeno je načinu na koji su temeljem mjerenja tlaka za Blitvenicu računane denivelacije te objašnjenju barotropnog i baroklinog doprinosa.

### 2.1. Oscilacije morske razine

More nikada ne miruje; čak i kada tako izgleda (npr. za vrijeme tzv. *bonace*), morska razina se polako mijenja zbog plimotvorne sile, a ispod površine dublji slojevi osciliraju internim valovima ili se voda giba niz pojedine gradijente. Plimotvorna sila podrazumijeva skupno djelovanje gravitacijske sile (između Zemlje i Mjeseca te između Zemlje i Sunca) i centrifugalne sile (zbog rotacije Zemlje). Zajednički naziv za sve tako uzrokovane oscilacije jest plimne oscilacije. Spektar plimnih oscilacija je diskretan pa se njihov doprinos denivelaciji  $\zeta$  u ovisnosti o vremenu može prikazati kao superpozicija svih sastavnica

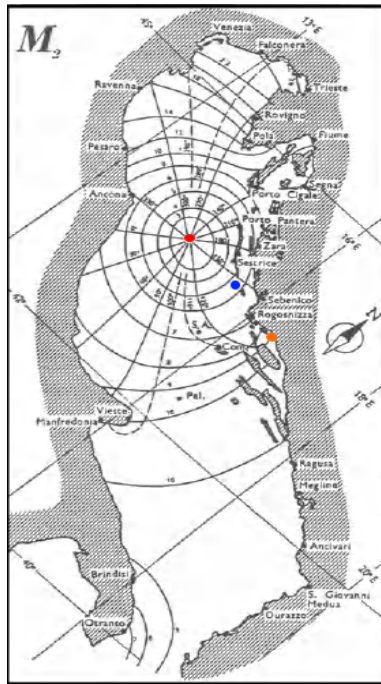
$$\zeta(t) = \sum_{i=0}^{i=N} H_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i - \kappa_i), \quad (2.1.)$$

gdje je  $\sigma_i$  kružna frekvencija (period  $T_i = \frac{2\pi}{\sigma_i}$ ),  $H_i$  i  $\kappa_i$  su amplituda i faza, a  $\alpha_i$  astronomska faza  $i$ -te sastavnice. Parametri  $\alpha$  i  $\sigma$  su astronomski parametri, dok se amplitude  $H$  i faze  $\kappa$  određuju iz mareografskih zapisa te su svojstvene mjernoj postaji. Prema udžbeniku Roberta Stewarta (2008), za kvalitetnu prognozu plimnog signala potreban je niz mjerenja dugačak barem 18,6 godina, dok je za preciznost određivanja člana najveće amplitude do  $10^{-3}$  i  $10^{-4}$  jedinica zapisa potrebno redom 39 i 400 razlučenih frekvencija (broj  $N$  u izrazu 2.1). No, u praksi se pokazalo dovoljnim odrediti signal onih sastavnica koje u njemu imaju najveći udio. Koliki udio koja sastavnica ima u ukupnom signalu određuje se uz pomoć spektra gustoće snage tog signala. Spektar gustoće snage je osnovni alat u analizi signala općenito te je kao takav neizostavni dio u razmatranju geofizičkih vremenskih nizova. Ono što spektar gustoće snage prikazuje jest raspodjela ukupne snage ulaznog signala po frekvencijama oscilacija koje čine signal. Izradi takvog prikaza prethodi primjena Fourierovog transformata kako bi se početni signal razložio na frekvencije-sastavnice. Nekada je ovakva analiza bila vrlo komplicirana i samim time ograničavajući faktor za istraživanja, no danas se obavlja računalno sa zanemarivim utroškom vremena i visokom preciznošću.

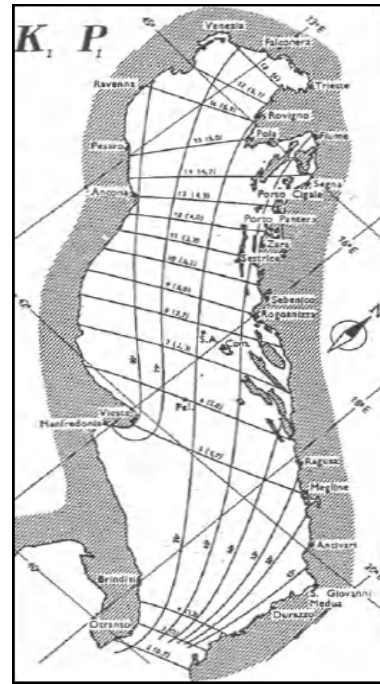
Prema Cushman-Roisin *et al.* (2001), prvu opsežnu analizu plimnih oscilacija za Jadransko more napravio je znanstvenik Silvio Polli (1960). On je izračunao amplitude glavnih plimnih sastavnica koje su prikazane u tablici 2.1. Također je za plimne sastavnice nacrtao karte s naznačenim linijama koje povezuju mjesta iste amplitude i mjesta iste faze. Primjeri karti za glavnu Mjesečevu sastavnicu (M2) te kombinaciju Mjesečeve dnevne (K1) i glavne Sunčeve dnevne (P1) sastavnice nalaze se na slici 2.1. Prema tablici 2.1 primjetno je kako sastavnica M2 ima najveću amplitudu, što ju čini najuočljivijom u analizi spektara gustoće snage. Ono što je još zanimljivo primijetiti na slici 2.1 (a) jest da se otok Blitvenica (*plavo*) nalazi bliže amfidromijskoj točki (*crveno*) nego postaja Split-luka (*narančasto*). Amfidromijska točka pojedine sastavnice jest točka u kojoj amplituda te sastavnica poprima vrijednost jednaku nuli, a prolaskom kroz nju faza se naglo mijenja. Stoga, za očekivati je kako će plimni signal biti slabije izražen u mjerenjima za otok Blitvenicu nego za postaju Split-luka.

Tablica 2.1. Podatci o periodima i amplitudama plimnih sastavnica za postaje na kojima su izmjereni maksimumi amplituda. Podatci preuzeti iz poglavlja Cushman-Roisin *et al.* (2001) prema Polli (1960).

| Plimna sastavnica        | Oznaka | Period [h] | Amplituda [cm] | Postaja                |
|--------------------------|--------|------------|----------------|------------------------|
| Glavna Mjesečeva         | M2     | 12,421     | 26,6           | Trst                   |
| Glavna Sunčeva           | S2     | 12,000     | 16,0           | Trst                   |
| Mjesečevo – Sunčeva      | K2     | 11,967     | 5,3            | Venecija-Lido          |
| Veća Mjesečeva eliptična | N2     | 12,658     | 4,7            | Falconara Marittima    |
| Mjesečeva dnevna         | K1     | 23,934     | 20,1           | Venecija-Piave Vecchia |
| Glavna Mjesečeva dnevna  | O1     | 25,819     | 6,4            | Trst                   |
| Glavna Sunčeva dnevna    | P1     | 24,066     | 6,2            | Trst                   |



(a)



(b)

Slika 2.1. Faze i amplitude za (a) sastavnicu  $M_2$  i (b) sastavnice  $K_1$  i  $P_1$ . Na slici (a) označene su amfidromijska točka (**crveno**), otok Blitvenica (**plavo**) i postaja Split-luka (**narančasto**). Preuzeto i prilagođeno iz Cushman-Roisin *et al.* (2001) prema Polli (1960).

U analizama morske razine koje se ne tiču plimnih oscilacija važno je takve oscilacije ukloniti iz ukupnog signala kako bi o željenoj pojavi mogli donositi ispravne zaključke. Naravno, da bi se signal mogao ukloniti, treba ga pažljivom analizom detektirati, potom rekonstruirati i zatim oduzeti takav rekonstruirani signal od prvotnog niza. Taj postupak je napravljen i u ovom istraživanju, a detaljnije je opisan u potpoglavlju 3.3 *Metode analize*.

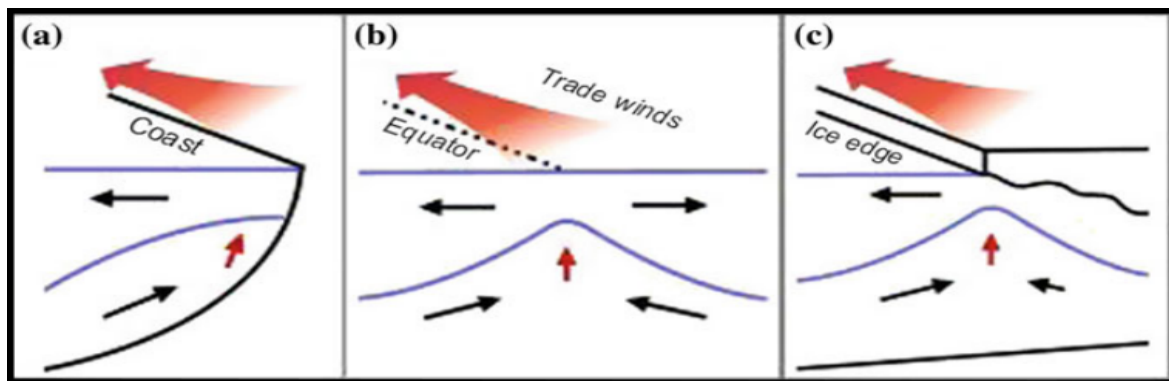
Uz plimne oscilacije, izgledu mareografskog zapisa doprinose i seši. Seši, često nazivani i šćige, su slobodne oscilacije morske razine do kojih dolazi nakon što prestane djelovanje vanjske pobude koja je vodu unutar bazena pomakla iz ravnotežnog položaja. Takve oscilacije su zapravo stojni valovi kojima se voda u bazenu nastoji vratiti u ravnotežni položaj i riješiti unesenog viška energije, stoga se taj proces često naziva i "istitavanje". Vanjska pobuda koja ih je uzrokovala može biti jak vjetar koji je duže vremena puhao u istom smjeru i u smjeru puhanja nanio veće količine vode, oborina koja je pala samo na jednome dijelu bazena i tu uzrokovala lokalni porast vodostaja, ili pak potres. Period takvih oscilacija ovisi o horizontalnim dimenzijama i obliku dna bazena. Svakako najistraživaniji seši u Jadranskom moru su oni u Bakarskom zaljevu. Period osnovnog moda bakarskog seša je 20 minuta, a u pojedinim situacijama amplituda osnovnog moda iznosila je i do 40 centimetara (npr. maksimum u 14:20

izmjeran 19. kolovoza 2006., prema Šepić *et al.*, 2008, kada se morska razina istitrala čak dva dana). U većim zaljevima javljaju se oscilacije duljih perioda pa tako osnovni mod Kaštelanskog zaljeva ima period približno 1 sat, a 1. i 2. mod Kvarnerskog zaljeva imaju periode 6 sati i 2 sata. Kako je i cijeli Jadran relativno plitki morski bazen, na mareografskim zapisima zamjetni su 1. i 2. mod jadranskog seša koji imaju periode 21 sat i 11 sati. Iako iznimno zanimljiva pojava, seši u sklopu ovog rada predstavljaju šum u analizi podataka. Stoga, potrebno ih je ukloniti iz rezidualnog niza. Za razliku od plimnih oscilacija koje su rekonstruirane harmonijskom sintezom i potom oduzete od originalnog niza, seši se obično uklanjaju niskopropusnim filtrima, kao što je i u ovom radu učinjeno 24-satnim kliznim srednjakom.

Zadnju grupu promjena morske razine koje su imale značajni udio u originalnom nizu podataka čine promjene uzrokovane direktnim utjecajem duljih atmosferskih procesa. Takvi procesi mogu trajati od nekoliko sati do nekoliko dana, a obično su uzrokovani sinoptičkim poremećajima. Jedan takav primjer je nailazak duboke ciklone koja u svom središtu ima izrazito nizak prizemni tlak. Radi izjednačavanja tlakova, morska razina se izdiže na mjestu središta, dok se radi očuvanja mase na drugim mjestima spušta. Stoga, ako središte prolazi dalje od obale, može izazvati niži vodostaj od očekivanog, dok s druge strane, prolaskom središta u blizini obale može uzrokovati poplavljanje obalnog područja. Drugi primjer je duže razdoblje puhanja jakog juga u sklopu Genovske ciklone ili područja niskoga tlaka koje se zimi javlja u zapadnom Sredozemlju. Jugo puše snažno i jednoliko što stvara povoljne uvjete za dugotrajniji odziv morske razine koja obično kasni za pobudom takve vrste nekoliko sati. Na sličnim vremenskim skalama na kojima se odvijaju navedeni procesi odvija se i proces izranjanja koji više dolazi do izražaja ako je vjetrovna pobuda dulje trajala. Iz tog razloga iz rezidualnog niza nije bilo moguće samo filtrirati sinoptičke poremećaje, već su za određivanje epizoda puhanja jakog sjeverozapadnog vjetra korišteni podatci o prostorno usrednjenom vjetru. Analiza je provedena kvantitativno razmatranjem koeficijentata korelacije između sjeverozapadnog vjetra i denivelacija morske razine, a kvalitativno razlučivanjem perioda puhanja jakog juga od sjeverozapadnog vjetra.

## **2.2. Izranjanje**

Izranjanje (eng. *upwelling*) je pojava izdizanja hladnije, gušće vode iz dubljih slojeva mora u slojeve bliže površini. Prema Kampfu i Chapmanu (2016), vjetrovno uzrokovano izranjanje može biti obalnog, ekvatorijalnog i rubno – ledenjačkog (eng. *ice – edge*) tipa. Na slici 2.2 nalazi se shematski prikaz svakog od tri tipa, a daljnji tekst odnosit će se na tip prikazan na slici 2.2 (a), tj. obalno izranjanje. Obalno izranjanje uzrokovano je

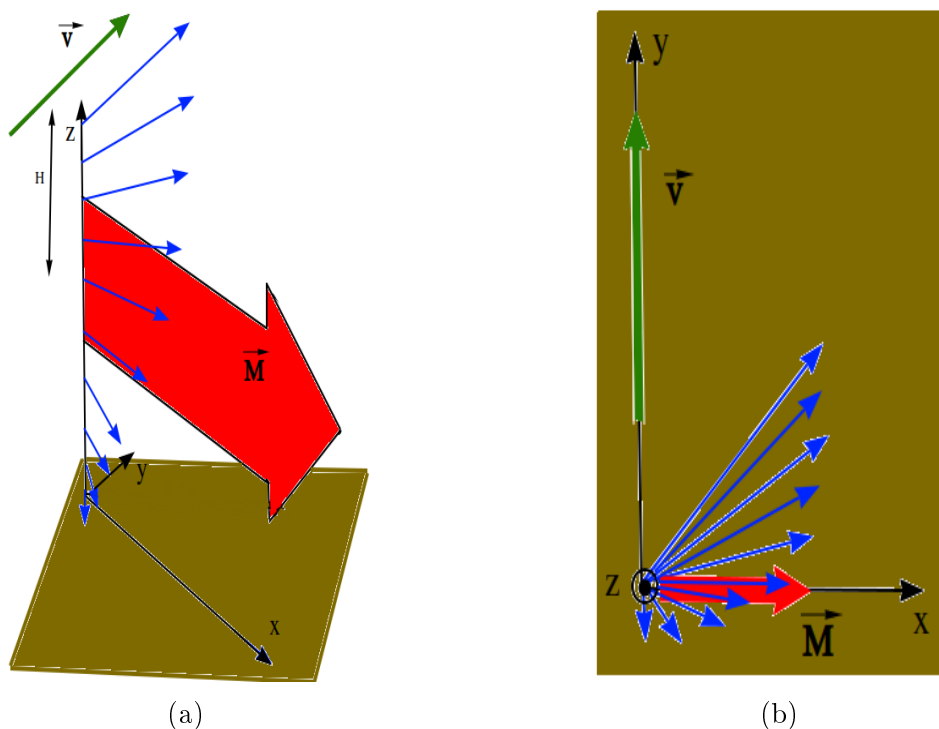


Slika 2.2. Tipovi vjetrovno uzrokovano izranjanja: (a) obalni (primjer za južnu polutku), (b) ekvatorijalni i (c) rubno – ledenjački. Preuzeto iz Kampf i Chapman (2016).

vjetrom koji puše uz istočnu obalu mora u smjeru ekvatora ili zapadnu obalu mora u smjeru polova. Pri takvom puhanju vjetra dolazi do Ekmanovog transporta vode iz površinskog sloja  $90^\circ$  u desno (lijevo) od smjera vjetra na sjevernoj (južnoj) polutci, što se radi očuvanja mase nadoknađuje vodom iz dubljih slojeva. Ključni čimbenik ovog procesa jest trenje (često u literaturi zvano napetost vjetra) na granici zrak-more do kojeg dolazi zbog relativnog gibanja ta dva fluida različitih svojstava. Kao posljedica toga, prvi dodirni sloj vode počinje se gibati. No, zbog visokog vertikalnog koeficijenta turbulentnog trenja sloj koji se kreće za sobom povuče i sloj ispod sebe koji se također počinje kretati i istovremeno za sobom vući sloj ispod sebe, što se nastavlja sve do dna ili sloja u kojem se kinetička energija sasvim disipira. Kada Zemlja ne bi rotirala, svo opisano gibanje bi se odvijalo u istoj ravnini. Obzirom da rotira i da se voda giba u ravnini Zemljine površine, na nju djeluje Coriolisova sila te se svaki sljedeći sloj zakreće malo više u desno (lijevo za južnu polutku) u odnosu na vektor brzine sloja iznad sebe (shematski prikaz na slici 2.3). Tako se transport mase pod pravim kutem u odnosu na smjer vjetra odvija od površine do dubine utjecaja trenja. Kada se lijevo (desno za južnu polutku) ne bi nalazilo kopno u blizini, vodu koja otječe nadomiještala bi druga voda i ne bi dolazilo do pojave izranjanja. No, kako vodu koja otječe ne može zamijeniti druga voda iz horizontalnih slojeva, spušta se morska razina, a zbog očuvanja mase pristiže voda iz dubljih slojeva i zamjenjuje oteklu vodu iz gornjeg sloja. Također se zbog postojanja nagiba površine javlja sila gradijenta tlaka prema obali zbog kojeg se uspostavlja geostrofička struja u smjeru vjetra (paralelno s obalom). Za dugog i postojanog puhanja vjetra usporedno s obalom, voda iz dubljih slojeva dopijeva sve do površine te se upravo ta pojava naziva izranjanjem. Prosječno vrijeme potrebno da se učinci izranjanja osjete na površini ovisi o dubini s koje voda izranja i o njevoj vertikalnoj komponenti brzine. Obzirom da se područja izranjanja mogu prepoznati po svojstvima vode koja odgovaraju slojevima iz kojih ona potječe, dubina se obično može procijeniti direktno iz mjerenja temeljem



vertikalnih profila temperature, saliniteta i nutrijenata (npr. udio nitrata). Voda koja izranja u pravilu ima nižu temperaturu, a veći salinitet, gustoću i udio nutrijenata od vode koja se inače nalazi u površinskom sloju, stoga se razmatraju dubine i nagibi izoterma, izohalina, izopikni ili linija istog udjela odabrane hranjive tvari. Vertikalnu brzinu teže je odrediti te se taj postupak obično vrši posredno na dva načina (Bowden, 1983). Prvi način podrazumijeva razmatranje promjene dubine neke određene izopikne u vremenu i izračun vertikalne brzine izdizanja izopikne. Ta brzina može poslužiti kao aproksimacija brzine izdizanja same vodene česti unutar stupca u kojem su mjerene



Slika 2.3. Shematski prikaz Ekmanova transporta: (a) kosa projekcija i (b) tlocrt.  $\vec{v}$  je vektor vjetra koji puše u smjeru  $y$ -osi (*tamno zelena* strelica) iznad površine mora,  $\vec{M}$  je transport mase u smjeru  $x$ -osi na dubini  $H$  (*crvena* strelica). *Plave* strelice označavaju smjer gibanja vode u ostalim slojevima. Za ovakvu orijentaciju koordinatnog sustava kopno se nalazi lijevo (desno) od  $y$ -osi na sjevernoj (južnoj) polutki.

dubine izopikni. Ovaj način se može smatrati prikladnim tek nakon uspostavljanja ravnotežnog stanja, dakle nakon što izranjanje već neko vrijeme traje. U suprotnom se dobije potcijenjeni iznos vertikalne brzine česti zbog toga što se voda izdizanjem zagrijava te izopikne ne putuju više istom brzinom kao čest, već sporije od nje. Drugi način podrazumijeva mjerenja horizontalnih komponenti brzine vode iz kojih se onda pomoću jednadžbe kontinuiteta računa vertikalna komponenta brzine. Točnost ovog načina ovisi o tome koje su pretpostavke korištene; što ih je manje, to je procjena točnija. Razmotrimo jednu teorijsku procjenu vertikalne brzine izranjanja  $w$  prema

modelu iz udžbenika Bowden (1983):

$$w = \frac{\tau}{\rho L f}, \quad (2.2.)$$

gdje je  $\tau$  napetost vjetra koji puše nad površinom,  $\rho$  prosječna gustoća razmatranog stupca vode,  $L$  udaljenost od obale, a  $f$  Coriolisov parametar. Ovaj izraz vrijedi za sljedeće pretpostavke modela: vjetar puše jednoliko i sasvim paralelno s obalom, nema promjena varijabli duž obale (2D model) i  $L$  je dovoljno velik da je utjecaj obale zanemariv. Prema ovom modelu za očekivati je veću brzinu izranjanja na nižim geografskim širinama (ali ne blizu ekvatora jer ondje model nije prikladan), bliže obali i pri većim brzinama vjetra, jer napetost vjetra raste s kvadratom brzine vjetra ( $\tau = C_d \rho_{zrak} \bar{v}_{vjetar}^2$ , gdje je  $C_d$  koeficijent trenja na granici dva fluida, a  $\bar{v}_{vjetar}$  brzina vjetra u odnosu na površinu mora). Za  $\tau=0,03 \text{ Nm}^{-2}$  (što odgovara brzini vjetra od  $5 \text{ ms}^{-1}$ , primjer iz podataka),  $\rho=1025 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $L=20 \text{ km}$  i  $f=1,03 \cdot 10^{-4}$  ( $\varphi=45^\circ$ ), vertikalna brzina  $w$  iznosi  $1,42 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ , tj. 1,23 metra po danu. Dakle, prema ovakvom modelu vjetar bi trebao puhati postojano barem 4,07 dana da bi voda s dubine 5 metara izronila na površinu. No, u radu su korištene prostorno usrednjene vrijednosti vjetra koje su dodatno filtrirane 24-satnim kliznim srednjakom te je moguće da je kod Blitvenice povremeno puhao i vjetar puno veće brzine od  $5 \text{ ms}^{-1}$ . Takav bi vjetar zbog kvadratne ovisnosti napetosti vjetra o brzini uzrokovao i za red veličine veće vertikalne brzine (npr. prema Orlić, 1987, karakteristična vrijednost napetosti vjetra za Jadran iznosi  $0,25 \text{ Nm}^{-2}$ ). Stoga, ove procjene mogu poslužiti tek kao smjernica na kojim vremenskim skalama bismo mogli očekivati pojavu izranjanja.

No, vjetrovno uzrokovano izranjanje se ne javlja samo za slučajeve puhanja vjetra paralelnog s obalom. Tomczak (1998) je podijelio područja obalnog izranjanja u tri zone: unutarnju, zonu srednjeg šefa i zonu nagiba šelfa. Treća zona postoji kod oceanskih obala i u njoj je izranjanje uvjetovano plimnim pumpanjem vode i oceanskim strujama. U drugoj zoni apsolutna vrijednost korelacije između izranjanja i vjetra najveća je za slučajeve puhanja vjetra paralelnog obali, kao što je razmatrano u prethodnom odlomku. No, u zoni uz samu obalu, nazvanoj unutarnja, izranjanje je najviše korelirano s vjetrom koji puše od obale prema otvorenom moru. Stoga, radi obuhvaćanja svih situacija kada je moguća pojava vjetrovno uzrokovano izranjanja, u rezultatima je razmatran i sjeveroistočni vjetar (bura) koji puše s kopna u smjeru mora, okomito na istočnu obalu jadranskog bazena.

Mjera za intenzitet obalnog izranjanja zove se obalni indeks izranjanja, a prema definiciji u radu Bakun (1973) također ovisi o brzini vjetra, koeficijentu trenja i gustoći zraka. Izračun indeksa izranjanja izlazi iz opsega ovoga rada pa o toj veličini neće više

biti govora, no zainteresirani o njenoj definiciji i primjeni na podatke mogu naći više u samom radu.

### 2.3. Denivelacije

Denivelacije su odstupanja morske razine od srednjaka morske razine za neko određeno razdoblje. Ako razmotrimo denivelacije vertikalnog stupca vode koji se proteže sve do dna, promjene denivelacije na površini tog stupca mogu biti uzrokovane

- dotokom mase u stupac iz nekog smjera, što se zove barotropni doprinos,

ili

- promjenama gustoće unutar samog vodenog stupca, što se zove baroklini doprinos.

Primjer barotropnog doprinosa je nailazak plime, dok je primjer baroklinog doprinosa zagrijavanje stupca vode uslijed kojeg dolazi do povećavanja volumena stupca. Općenito, pojam barotropnosti označava da su u fluidu izobare (linije duž kojih je jednak tlak) paralelne s izopiknama, dok baroklinost označava da se izotermne i izopikne nalaze pod nekih kutem u odnosu na izobare. U slučaju kada iz ukupnog tlaka koji stupac vodene mase vrši na mjerni instrument treba izračunati denivelacije, primjenjuje se sljedeći postupak. Najprije se tlak  $p$  izrazi pomoću izraza za hidrostatički tlak:

$$p(t) = \rho(t)gh(t), \quad (2.3.)$$

gdje su  $\rho(t)$  i  $h(t)$  redom gustoća vodenog stupca i visina vodenog stupca u nekom trenutku  $t$ , dok je  $g$  ubrzanje sile teže, konstanta za pripadnu točku u prostoru. Ukoliko na raspolaganju imamo duže razdoblje razmatranja, utoliko svaku od varijabli možemo rastaviti na srednjak varijable tijekom tog razdoblja i odstupanje od njega u trenutku  $t$ :

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.4.a)$$

$$\rho(t) = \bar{\rho} + \rho'(t) \quad (2.4.b)$$

$$h(t) = \bar{h} + h'(t). \quad (2.4.c)$$

Uvrštavanjem izraza 2.4 b i 2.4 c u jednadžbu 2.3 i raspisivanjem slijedi:

$$p(t) = g\bar{\rho}\bar{h} + g\bar{\rho}\zeta(t) + g\rho'(t)\bar{h} + g\rho'(t)\zeta(t), \quad (2.5.)$$

gdje su oznake kao i prije osim što je denivelacija  $h'(t)$  zamijenjena uobičajenom oznakom za tu veličinu,  $\zeta(t)$ . Član  $g\bar{\rho}\bar{h}$  predstavlja srednji tlak kojim stupac vode vrši

pritisak na podlogu, stoga je to zapravo  $\bar{p}$  iz izraza 2.4 a. Razmotrimo preostale članove jednadžbe 2.5. Ti članovi predstavljaju upravo odstupanje tlaka  $p'(t)$  što možemo zapisati u ovom obliku:

$$\begin{aligned} p'(t) &= g\bar{\rho}\zeta(t) + g\rho'(t)\bar{h} + g\rho'(t)\zeta(t) \\ &= g\bar{\rho}\zeta(t) + g\rho'(t)\bar{h} \left( 1 + \frac{\zeta(t)}{\bar{h}} \right). \end{aligned} \quad (2.6.)$$

Razmotrimo izraz u zagradi. Red veličine omjera  $\frac{\zeta(t)}{\bar{h}}$  ovisi o tome kako se odnose veličine  $\zeta(t)$  i  $\bar{h}$ . Uobičajene promjene morske razine događaju se na skali od nekoliko desetaka centimetara, dok je  $\bar{h}$  svojstven mjestu razmatranja. Ako je mjerni instrument postavljen na dubinu od nekoliko desetaka metara, ovaj omjer bit će reda veličine  $\frac{10^{-2}}{10^1}$ , tj.  $10^{-3}$ . Stoga, član  $g\rho'(t)\zeta(t)$  u jednadžbi 2.6 može se zanemariti jer je njegov doprinos  $p'(t)$  u odnosu na član  $g\rho'(t)\bar{h}$  samo nekoliko promila. Nova jednadžba tada glasi:

$$p'(t) = g\bar{\rho}\zeta(t) + g\rho'(t)\bar{h}. \quad (2.7.)$$

Ako iz jednadžbe 2.7 izrazimo  $\zeta(t)$ , a umjesto  $\bar{h}$  uvrstimo  $\frac{\bar{p}}{\bar{\rho}g}$ , dobije se:

$$\zeta(t) = \frac{1}{\bar{\rho}g} \left( p'(t) - \frac{\rho'(t)\bar{p}}{\bar{\rho}} \right). \quad (2.8.)$$

Da bi barotropni i baroklini doprinos bili očitiji, u jednadžbu 2.8 umjesto člana  $p'(t)$  uvrstimo  $p(t) - \bar{p}$  prema izrazu 2.4 a:

$$\zeta(t) = \underbrace{\frac{p(t) - \bar{p}}{\bar{\rho}g}}_{\text{barotropni doprinos}} - \underbrace{\frac{\rho'(t)\bar{p}}{\bar{\rho}^2g}}_{\text{baroklini doprinos}}. \quad (2.9.)$$

Iz izraza za denivelaciju 2.9 lijepo se vidi kako na promjenu morske razine utječu varijabilnosti tlaka zbog vanjskih utjecaja, a kako varijabilnosti zbog internih procesa u samom stupcu vode. Za kraj, razmotrimo koliki su očekivani odnosi ovih doprinosa za uobičajene redove veličina parametara jednadžbe 2.9 koje nalazimo u mjerenjima. Veličina  $\bar{p}$  za dubinu 10 metara ima vrijednost reda veličine  $10^5$  Pa, a  $\bar{\rho}$  za vodu  $10^3$   $\text{kgm}^{-3}$ . Uobičajene varijabilnosti gustoće  $\rho'$  su reda veličine  $10^0$   $\text{kgm}^{-3}$ . Neka je za potrebe ove procjene ubrzanje sile teže  $g$  zaokruženo na  $10$   $\text{ms}^{-2}$ . Uvrštavanjem navedenih vrijednosti dobije se da baroklini dio doprinosi s  $\sim 10^{-2}$  metara, što znači da za denivelaciju 10 cm barotropni dio doprinosi s  $\sim 10^{-1}$  metara, tj. barotropni doprinos je za red veličine veći od baroklinog. Denivelacije za Blitvenicu su računane po izrazu 2.9 te je tijekom rada potvrđen ovaj predviđeni omjer doprinosa, što će biti i prikazano u poglavlju *Rezultati i diskusija*.

## 3. Podatci i metode analize

U ovom poglavlju najprije su opisani programski jezici korišteni u radu te za što je svaki od jezika korišten. Zatim u drugom potpoglavlju slijedi opis podataka korištenih u radu. Treće i najopširnije potpoglavlje posvećeno je detaljnom objašnjenju postupka pripreme podataka i metodama kojima su podatci analizirani.

### 3.1. Programski jezici

Sav praktični rad napravljen u svrhu pisanja ove radnje obavljen je korištenjem računalnih programa. Većina tih programa napisana je upravo za potrebe rada u programskim jezicima MATLAB (verzija R2017a) i Python (verzije Python 3.6.8 i 3.6.9). Ostatak programskih paketa preuzet je s interneta. Iako su svi preuzeti paketi bili stavljeni na raspolaganje javnosti za izmjenu i doradu (eng. *open-source*), gdje god je bila dostupna stavljena je referenca u znak zahvalnosti autorima.

#### MATLAB

MATLAB obuhvaća programski jezik i pripadno grafičko sučelje te je namijenjen prvenstveno znanstvenicima i inženjerima. Sve matematičke funkcije i većina uobičajenih metoda obrade već su ugrađeni, a način računanja prilagođen je radu s vektorima i matricama. Učitavanje podataka te izrada i spremanje osnovnih grafova prilično su jednostavni i brzi. MATLAB vrhunac svojih performansa postiže pri radu s datotekama oblika *.mat* koje imaju način zapisa podataka prilagođen baš ovom programskom jeziku. Nažalost, format *.mat* nije čitljiv većini drugih programskih jezika. Također, pravo na korištenje MATLABA se plaća, a izvorni kodovi (eng. *source code*) ugrađenih funkcija nisu javno dostupni. Iz tog razloga sve se više korisnika okreće alternativnim jezicima (npr. GNU Octave, Python) pa i dostupna korisnička podrška opsegom sve više ide u korist takvim jezicima.

#### Python

Python je *open-source* objektno orijentirani programski jezik široke primjene. Za razliku od jezika MATLAB, ugrađene su samo najosnovnije funkcije, dok se sve ostale učitavaju iz posebnih biblioteka (eng. *library*) koje korisnik u kodu poziva po potrebi. Danas je dostupno preko 137,000 Python biblioteka za gotovo svaku od svakodnevnih potreba njegovih korisnika. Upravo pozivanje paketa funkcija po potrebi čini ga malo kompliciranijim pri pisanju koda, ali zato bržim pri izvršavanju. Također, postojanje specifičnih paketa i brzina izvršavanja omogućavaju korisniku visoku razinu kontrole nad izlazima programa. Grafička sučelja nisu nužna za korištenje, no postoje alati koji su napravljeni za tu svrhu (npr. *Spyder*, *Jupyter Notebook*) i koji olakšavaju

korištenje. Python svakom novom verzijom postaje sve popularniji upravo zbog svoje javne dostupnosti i mogućnosti da svatko od korisnika unaprijedi ili prilagodi svojim potrebama već postojeće pakete.

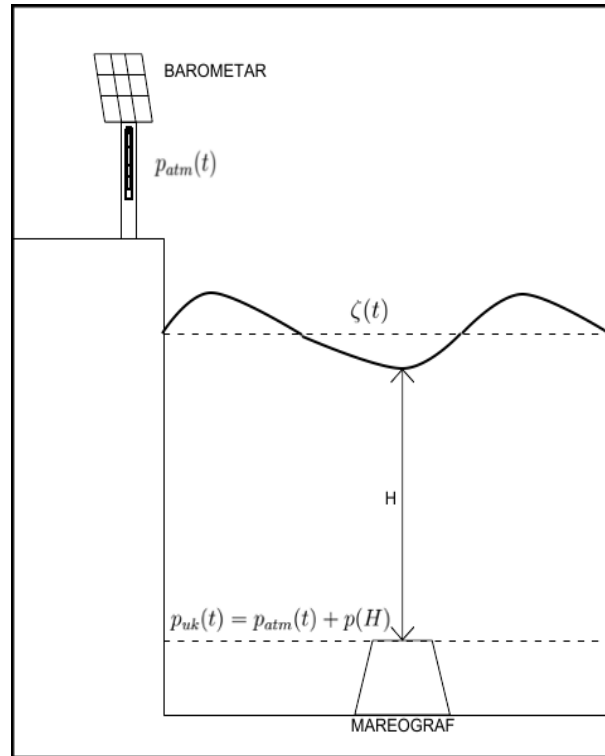
Na odabir koji od programskih jezika će biti korišten za koji dio rada utjecalo je sve navedeno u prethodnim odlomcima te mogućnost uklapanja dijelova programa već napisanih tijekom studija. Python je korišten za dijelove uređivanja podataka, upisa u datoteke, numeričkih izračuna (definiranje funkcija za 24-satni klizni srednjak, korelaciju, rotiranje komponenata vjetera, itd.) te izradu zahtjevnijih grafičkih prikaza. Korištene su biblioteke *Numpy* i *Matplotlib*. MATLAB je korišten za filtriranje niskopropusnim filtrom (eng. *low – pass filter*) kojeg je ustupila na korištenje dr. sc. Pasarić, izračun spektara gustoće snage te analizu i sintezu plimnih oscilacija paketom *T\_TIDE* (Pawlowicz *et al.*, 2002).

### **3.2. Podatci**

Osnovni podatci za analizu bili su zapisi tlaka stupca vode i atmosferskog tlaka izmjerenih kraj otoka Blitvenice ( $42,6251^\circ$  s.g.š.,  $15,5751^\circ$  i.g.d.) te zapisi morske razine s postaje Split-luka. Za ispitivanje kako je s tim podacima povezan smjer i iznos brzine vjetera korišteni su satni podatci o vjetru iz ERA5 reanalize Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (eng. kratica *ECMWF*).

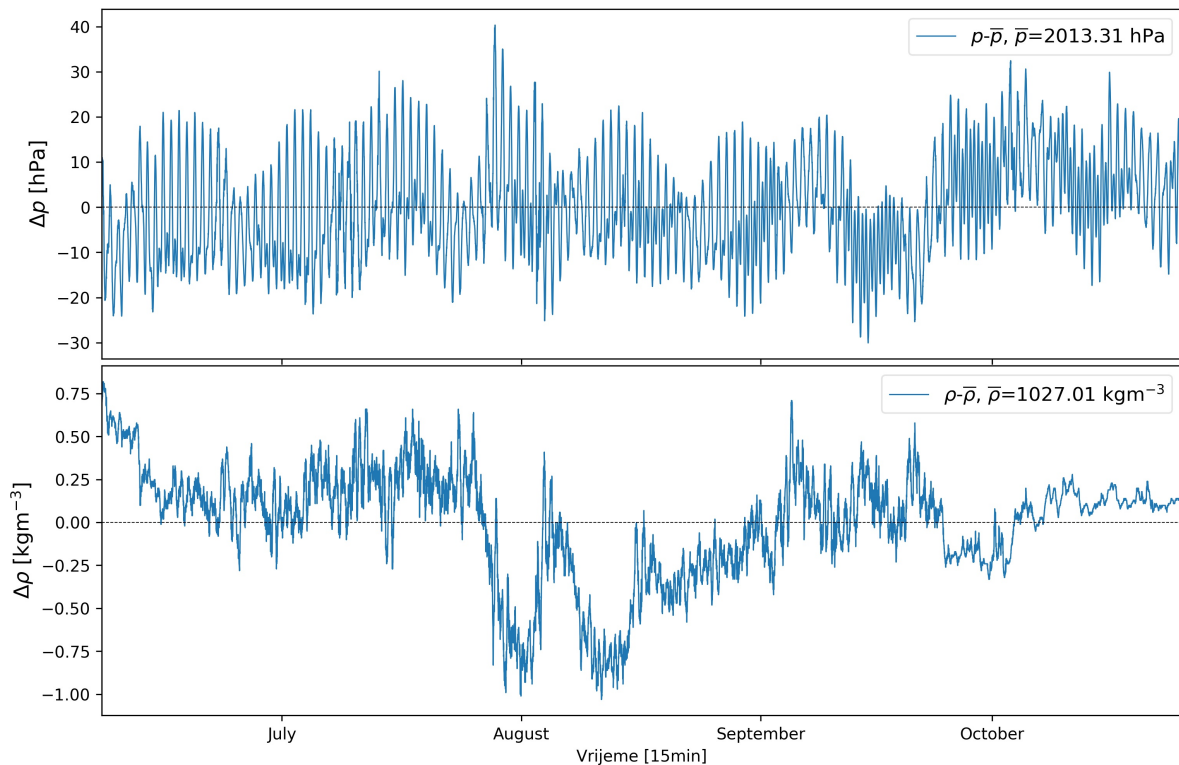
#### **Podatci s otoka Blitvenice**

U sklopu projekta *MAUD* tijekom razdoblja 7. lipnja – 25. listopada 2019. kraj otoka Blitvenice bio je postavljen tlačni mareograf na dubinu od približno 20 metara. Uređaj je mjerio ukupni tlak koji vrše atmosfera i morska voda na dubini na kojoj je bio postavljen (približno 20 metara). Tlak je uzorkovan svakih 15 minuta te je već sami interval uzorkovanja bio svojevrsan filter za oscilacije perioda manjeg od 30 minuta (prema teoremu o uzorkovanju). U sklopu projekta postavljen je i barometar koji je mjerio prizemni atmosferski tlak u obližnjoj točki na otoku (slika 3.1).



Slika 3.1. Skica mjernog postava.  $\zeta$  je denivelacija mora računata po jednadžbi 2.9,  $p(H)$  je tlak koji stupac morske vode visine  $H$  vrši na mjerni uređaj,  $p_{atm}$  je prizemni atmosferski tlak u obližnjoj točki, a  $p_{uk}$  je tlak koji je mjerio mareograf.

Tijekom navedenog razdoblja također je mjerena i temperatura stupca morske vode. Iz tih su podataka, uz konstantni salinitet 38,6 ‰, prema jednadžbi stanja izračunate gustoće koje su potom usrednjene po vertikalnom stupcu vode iznad mareografa. Za potrebe rada korišten je vremenski niz srednje gustoće u sloju do 20 metara dubine. Tlak stupca morske vode bio je mjereno u jedinicama centimetara  $H_2O$ . Ta jedinica označava tlak koji stupac destilirane vode visine 1 centimetar vrši na podlogu pri temperaturi 4 °C i standardnoj gravitacijskoj konstanti  $9,80665 \text{ ms}^{-2}$ . Stoga, radi pretvorbe dobivenih zapisa u tlak izražen u Pa, svi podatci množeni su koeficijentom 98,0665. Zadnji korak pripreme podataka prije izračuna denivelacija morske razine  $\zeta$  bio je oduzimanje atmosferskog tlaka izmjenjenog na obližnjoj kopnenoj točki od ukupnog tlaka na dnu mora. Ovako pripremljeni podatci tlaka i gustoće (slika 3.2) bili su ulaz za program definiran prema jednadžbi 2.8 pomoću kojeg su izračunate denivelacije  $\zeta$ . Sva daljnja analiza za Blitvenicu rađena je s tako pripremljenim podacima o denivelaciji.



Slika 3.2. Odstupanja tlaka (*gore*) od srednje vrijednosti tlaka  $\bar{p}$  kojeg je stupac morske vode vršio na uređaj i odstupanja gustoće (*dolje*) od srednje vrijednosti gustoće stupca morske vode  $\bar{\rho}$  (prema jednadžbi 2.8).

### Podatci s postaje Split-luka

Podatke digitalnog plovčanog mareografa s postaje Split-luka ustupio je Hrvatski hidrografski institut. Zapisi su bili minutni zapisi morske razine u metrima te ih nije trebalo posebno pripremati za analizu. Jedina dva postupka pripreme su bila svodenje na isti format zapisa (datum, razina) i oduzimanje srednjaka cijelog razdoblja razmatranja (7. lipnja – 25. listopada 2019.) kako bi razmatrana veličina bila denivelacija  $\zeta$ , kao i za podatke s Blitvenice.

### Satni nizovi razine mora

Nakon opisane pripreme podataka, slijedio je još jedan korak prije same analize. Naime, podatci s Blitvenice uzorkovani su u 15-minutnim intervalima, a podatci iz Splita u minutnim intervalima, stoga su oba niza svedena na satne podatke. Takav pristup ima dvostruki pozitivni učinak za analizu: izrada programa jednostavnija je za nizove iste duljine te je istovremeno odstranjen dio kratkoperiodičkih oscilacija koje nisu od interesa za istraživanje. Ovaj dio pripreme napravljen je na dva načina.

Prvi način sastojao se od izračuna srednjaka podataka za interval od polovice svakog prethodnog sata do polovice trenutnog sata, nakon čega je taj srednjak pridružen

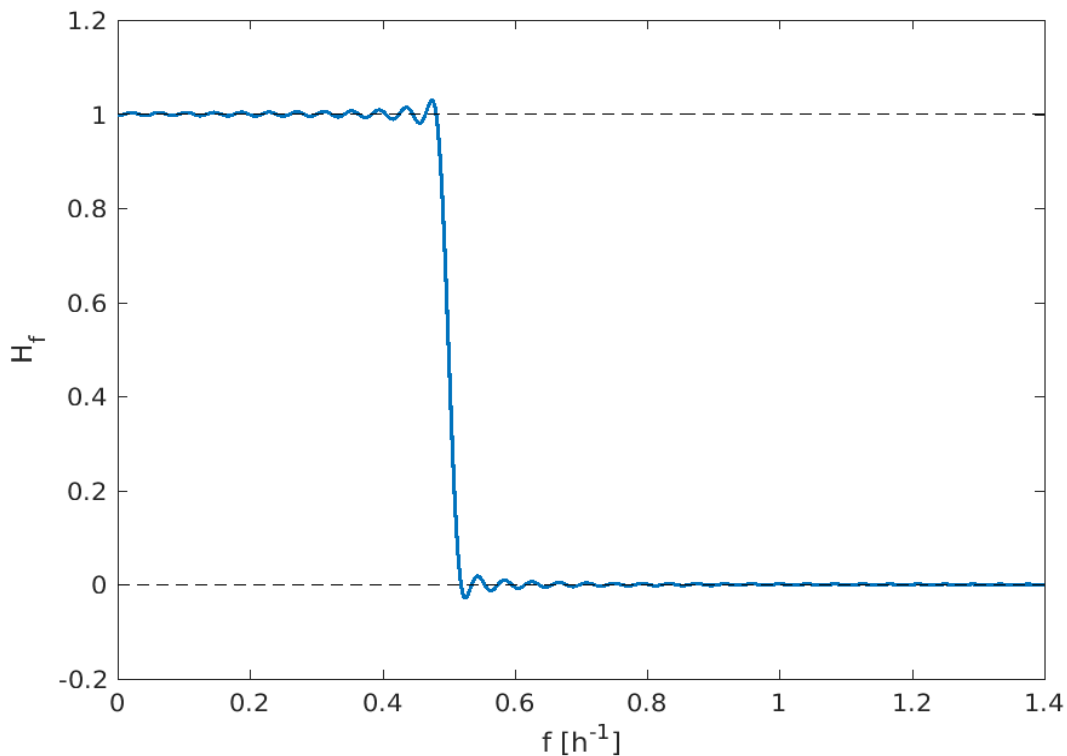


sredini intervala (tj. punom satu). To znači da je svaki satni podatak za Blitvenicu rezultat usrednjavanja 4 podatka, a za Split-luka 60 podataka. Algoritam izračuna za kod u Pythonu glasi

$$\zeta[i] = \frac{1}{n} \sum_{j=i-\frac{n}{2}}^{j=i+\frac{n}{2}} \zeta[j], \quad (3.1.)$$

gdje je  $i$  redni broj sata, a  $n$  broj uzorkovanih podataka u jednom satu ( $n = 4$  za Blitvenicu te  $n = 60$  za Split-luka). Za izračun vrijednosti u svakom satu potrebno je napraviti npr. *for* petlju te mijenjati vrijednosti  $i$  od 0 do broja sati u nizu.

Drugi način činilo je filtriranje niskopropusnim filtrom s točkom polovice snage na  $0,5 \text{ h}^{-1}$  (eng. *half-power point*) čija je prijenosna funkcija prikazana na slici 3.3. Takav filtar propušta signal perioda većeg od 2 sata, dok oscilacije kraćih perioda guši. Nakon filtriranja zapisan je svaki 4. podatak za Blitvenicu i svaki 60. podatak za postaju Split-luka kako bi se dobile satne vrijednosti.



Slika 3.3. Karakteristika filtra korištenog za dobivanje satnih nizova iz izvornih podataka.

Kao što je i inače slučaj s realnim niskopropusnim filtrima, niti jedan ne odsijeca frekvencije savršeno, tj. ne postiže da signal viši od frekvencije odsijecanja prolazi sa 100% amplitude, dok signal nižih frekvencija biva sasvim uklonjen (poput *box-car* filtra). No, ovaj filtar je i dalje vrlo kvalitetan s propusnosti 3% i manje za signale nižih frekvencija te je upravo ovaj način odabran za stvaranje satnih podataka.

## Podatci o vjetru

Podatci o vjetru preuzeti su sa službenih stranica *ECMWF* reanalize ERA5 na kojima se nalaze javno dostupni podatci o mnoštvu meteoroloških parametara za razdoblje od 1979. godine do unazad pet dana. ERA5 reanaliza daje satne vrijednosti podataka na mreži točaka horizontalno udaljenih 30 kilometara za 137 vertikalnih razina, sve do visine 80 kilometara. Kako bi se dobio vjetar koji je reprezentativan za promatrano područje, napravljen je prostorni srednjak vjetra s najniže razine za svaki termin. Otok Blitvenica i postaja Split-luka udaljeni su približno 69 kilometara, stoga je za izračun prostornog srednjaka vjetra na tom području korišteno 6 obližnjih točaka mreže. Podatak o vjetru se zapravo sastoji od dva zasebna podatka: brzina vjetra prema istoku te brzina vjetra prema sjeveru (komponente  $u$  i  $v$ ). Međutim, zbog smjera pružanja bazena, prirodno je vjetar rastaviti na komponentu paralelnu s obalom i komponentu okomitu na obalu. Stoga, komponente  $u$  i  $v$  zarotirane su za  $45^\circ$  u smjeru kazaljke na satu:

$$\begin{aligned}u' &= u\cos(-45^\circ) + v\sin(-45^\circ) \\v' &= -u\sin(-45^\circ) + v\cos(-45^\circ),\end{aligned}\tag{3.2.}$$

gdje su  $u'$  i  $v'$  komponente u novom sustavu (slika 3.4). Ovakav položaj koordinatnih osi omogućuje lakše razlučivanje sjeverozapadnog vjetra koji se u takvom sustavu očituje kao pozitivna vrijednost komponente  $u'$ , dok se sjeveroistočni vjetar očituje kao negativna vrijednost komponente  $v'$ . Nove zarotirane komponente vjetra filtrirane



Slika 3.4. Prikaz koordinatnih sustava prije (*crveno*) i poslije (*zeleno*) rotacije osi. Na slici su označeni otok Blitvenica (*plavo*) i postaja Split-luka (*narančasto*), međusobne udaljenosti približno 69 kilometara. (izvor pozadinske mape: *Google maps*)

su 24-satnim kliznim srednjakom kako bi u analizi rezultata bilo lakše uočiti duža razdoblja puhanja postojanog vjetra. Filtriranje 24-satnim kliznim srednjakom napravljeno je sljedećim algoritmom u jeziku Python:

$$\omega[i] = \frac{1}{24} \sum_{j=i-12}^{j=i+12} \omega[j], \quad (3.3.)$$

gdje je  $\omega$  komponenta vjetra  $u'$  ili  $v'$ , a  $i$  redni broj sata. Potrebno je napraviti petlju po svim satima kao kod algoritma 3.1. Tako filtrirani podatci o vjetru korišteni su pri izračunu korelacija s vremenskim nizovima denivelacija.

### 3.3. Metode analize

Za analizu podataka korišteno je više metoda, svaka po potrebi za određeni dio rada. Kod analize i sinteze plimnih oscilacija korišten je programski paket *T\_TIDE* (Pawlowicz *et al.*, 2002). Najčešće korišteni alat u analizi bio je izračun spektara gustoće snage, za provjeru kvalitete filtara i sintetiziranih nizova. Za numeričku usporedbu vremenskih nizova denivelacija za postaje Blitvenica i Split-luka te nizova denivelacija i nizova komponenti vjetra računat je koeficijent korelacije.

#### Programski paket *T\_TIDE*

Ovaj programski paket (Pawlowicz *et al.*, 2002) napisan u jeziku MATLAB razvijan je i unaprijeđivan tijekom zadnja dva desetljeća. Napisan je po uzoru na FORTRAN program za analizu plimnih oscilacija (Foreman, 1977) kako bi prvotni kod bio pojednostavljen i njegovo korištenje omogućeno u jeziku MATLAB. Sam paket sadrži 10 potprograma i 3 datoteke za MATLAB sa svim potrebnim podatcima za izvršavanje. To je vrlo moćan alat jer ne samo da detektira do 39 plimnih sastavnica u ulaznom nizu, već omogućava i sintezu ukupnog plimnog signala temeljem izračunatih amplituda i faza tih sastavnica. Jedina stvar na koju autori upozoravaju je oprez pri unosu vremenskog niza. Ako je vremenski niz dulji od jedne godine, a kraći od 18,6 godina, što je temeljni period superpozicije svih sastavnica razlučivih programom, vremenski niz potrebno je rastaviti na više godišnjih nizova. Iako duži vremenski niz podataka osigurava preciznije određivanje plimnih sastavnica, duljina vremenskog niza podataka od 4 mjeseca olakšala je primjenu programa tijekom rada. Ovaj dio rada bio je važan kako bi se dobio rezidualni niz oduzimanjem rekonstruiranog plimnog signala od ukupnog niza. U skladu s najznačajnijim plimnim sastavnicama prikazanim u tablici 2.1, za analizu i rekonstrukciju signala odabrane su sastavnice M2, S2, N2, K2, K1, O1 i P1. Ovim postupkom uklonjen je plimni signal iz podataka te je daljnja analiza rađena s rezidualnim nizom.

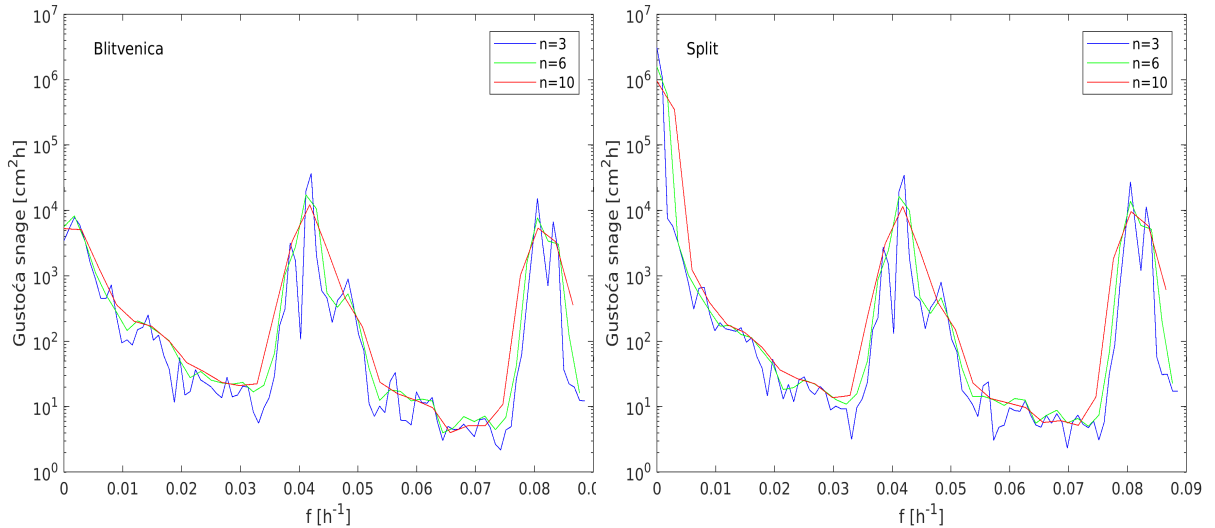
## Spektri gustoće snage

Kao što je već spomenuto u poglavlju *Teorijska pozadina*, glavni matematički alat pri analizi morske razine svakako je spektar gustoće snage. One frekvencije za koje dobiveni spektar poprima lokalne maksimume čine najjači signal u razmatranom vremenskom nizu, tj. oscilacije odgovarajućih perioda imaju najveće amplitude. Usporedbom spektara gustoće snage za filtrirani i nefiltrirani niz vrlo se lako vidi kako filtar djeluje na niz podataka. Upravo temeljem usporedbe spektara gustoće snage satnih nizova dobivenih usrednjavanjem podataka i onih dobivenih niskopropusnim filtriranjem odabran je potonji način. Za uočavanje oscilacija morske razine uzrokovanih duljim epizodama puhanja vjetra približno istog smjera (npr. od nekoliko sati do dva ili tri dana) bilo je ključno ukloniti oscilacije kraćih perioda. Niskopropusni filtar bolje je uklanjao takav signal iz ukupnog niza te je zato odabran, tj. daljnja analiza rađena je sa satnim podatcima denivelacija dobivenih upravo na taj način.

Osim za odabir načina izračuna satnih nizova, spektri gustoće snage izračunati su i za plimni, rekonstruirani i rezidualni signal dobiven paketom *T\_TIDE*. To je napravljeno radi usporedbe koliki udio u signalu imaju plimne oscilacije, a koliki preostale oscilacije rezidualnog niza te koliko je kvalitetna sama rekonstrukcija plimnog signala. Tek nakon izrade spektra gustoće snage bilo je sigurno da u rezidualnom nizu nema značajnih plimnih oscilacija i da je takav niz dovoljno dobar za daljnju analizu.

Zadnji dio rada koji je uključivao izradu spektara gustoće snage bio je provjera koliko učinkovito 24-satni klizni srednjak filtrira 1. i 2. mod jadranskog seša. Obzirom da su to također oscilacije dužih perioda (redom: 21 i 11 sati), one su činile smetnju pri detekciji eventualnih epizoda izranjanja te ih je bilo poželjno ukloniti. Za usporedbu vremenskih nizova vjetra i denivelacija korišten je niz denivelacija filtriran upravo 24-satnim kliznim srednjakom.

Svi spektri gustoće snage računati su funkcijom *pwelch* u programskom jeziku MATLAB. Osnovni argument te funkcije je, osim samog niza, duljina kliznog segmenta koji se uzima za izračun spektra snage. Konačni spektar gustoće snage cijelog niza dobije se usrednjavanjem spektara svih segmenata. Na slici 3.5 prikazano je za primjer kako spektar gustoće snage ovisi o tri različite vrijednosti  $n$ , pri čemu je  $n$  broj segmenata.



Slika 3.5. Ovisnost spektra gustoće snage o broju segmenata  $n$  za postaje Blitvenica (*lijevo*) i Split-luka (*desno*).

Za veći broj segmenata lokalni maksimumi spektra gustoće snage su previše usrednjeni te je manja preciznost pri određivanju pripadnih frekvencija, dok spektar za premali broj segmenata nema zadovoljavajuću statističku pouzdanost (slika 3.5). Stoga, za grafičke prikaze i provjeru rezultata odabran je  $n = 6$  kao najprikladniji.

## Korelacija

Kovarijanca (oznaka:  $Cov$ ) je statistička mjera koja govori kako promjena vrijednosti varijabli jednog niza utječe na promjenu vrijednosti varijabli drugog niza. Koeficijent korelacije je naziv za kovarijancu dvaju nizova (npr. nizovi podataka  $A$  i  $B$ ) normiranu njihovim standardnim devijacijama  $\sigma(A)$  i  $\sigma(B)$

$$r_{AB} = \frac{Cov(A, B)}{\sigma(A)\sigma(B)}. \quad (3.4.)$$

Ovako definiran koeficijent korelacije  $r_{AB}$  poprima vrijednosti iz skupa  $[-1, 1]$ , a naziva se još i *Pearsonov koeficijent korelacije*. Negativna vrijednost koeficijenta korelacije označava situaciju kada pad vrijednosti jednog niza podrazumijeva porast vrijednosti u drugom nizu (ili obrnuto). Pozitivna vrijednost koeficijenta korelacije podrazumijeva da porast jednog niza podrazumijeva porast drugog niza (isto vrijedi i za pad oba niza). Koeficijent korelacije blizak nuli znači da sklonosti varijabli istovremenom rastu ili padu nisu značajno povezane. Ukoliko nas zanima kako su promjene vrijednosti jednog diskretnog niza u trenutku  $t$  povezane s promjenama vrijednosti drugog diskretnog niza u trenutku  $t+k$ , tada možemo razmatrati koeficijent korelacije ovako definiran

(prema Thomson i Emery, 2014)

$$r'_{AB}(k) = \frac{1}{\sigma(A)\sigma(B)} \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (B[i] - \bar{B})(A[i+k] - \bar{A})}{N-k}, \quad (3.5.)$$

gdje su  $\bar{A}$  i  $\bar{B}$  srednjaci nizova  $A$  i  $B$ ,  $N$  je ukupna duljina niza,  $k$  vremenski posmak od interesa, a ostale oznake kao i u jednadžbi 3.4.

U ovom istraživanju koeficijent korelacije računat je kao mjera koreliranosti denivelacija za postaje Split-luka i Blitvenica te vjetra i denivelacije za svaku postaju zasebno. Korelacija denivelacija je računata klizno (nad podintervalima duljine 3 i 7 dana) kako bi se dobio vremenski niz korelacija. Na primjer, za podinterval 7 dana, prvu točku na grafu korelacija čini koeficijent korelacije gledan za nizove od prvog do osmog dana. Ta vrijednost pridružena je sredini podintervala, tj. polovici trećeg dana. Iduća točka dobivena je pomicanjem intervala razmatranja za jedan sat unaprijed te se tako dobiven koeficijent korelacije pridružuje sljedećem satu. Algoritam za izračun vremenskog niza korelacija dvaju nizova bio je sljedeći:

$$korelacije[i] = r(A[i - \frac{m}{2} : i + \frac{m}{2}], B[i - \frac{m}{2} : i + \frac{m}{2}]), \quad (3.6.)$$

gdje je  $m$  duljina razmatranog podintervala u satima (u radu 3 i 7 dana), a  $i$  redni broj u petlji koji ide od  $\frac{m}{2}$  do  $N - \frac{m}{2}$ , za  $N$  je ukupna duljina niza u satima. Pri implementaciji treba paziti kako programski jezik indeksira elemente (u primjeru iz izraza 3.6 indeksiranje ide od 0). Izračun vremenskog posmaka  $k$  između vremenskog niza komponenti vjetra i denivelacije bio je definiran kao u jednadžbi 3.5, a svrha mu je bila uočavanje razlika u posmacima između Blitvenice i postaje Split-luka, tj. ispitivanje dolazi li do kašnjenja u odzivu morske razine za ta dva mjerna područja.

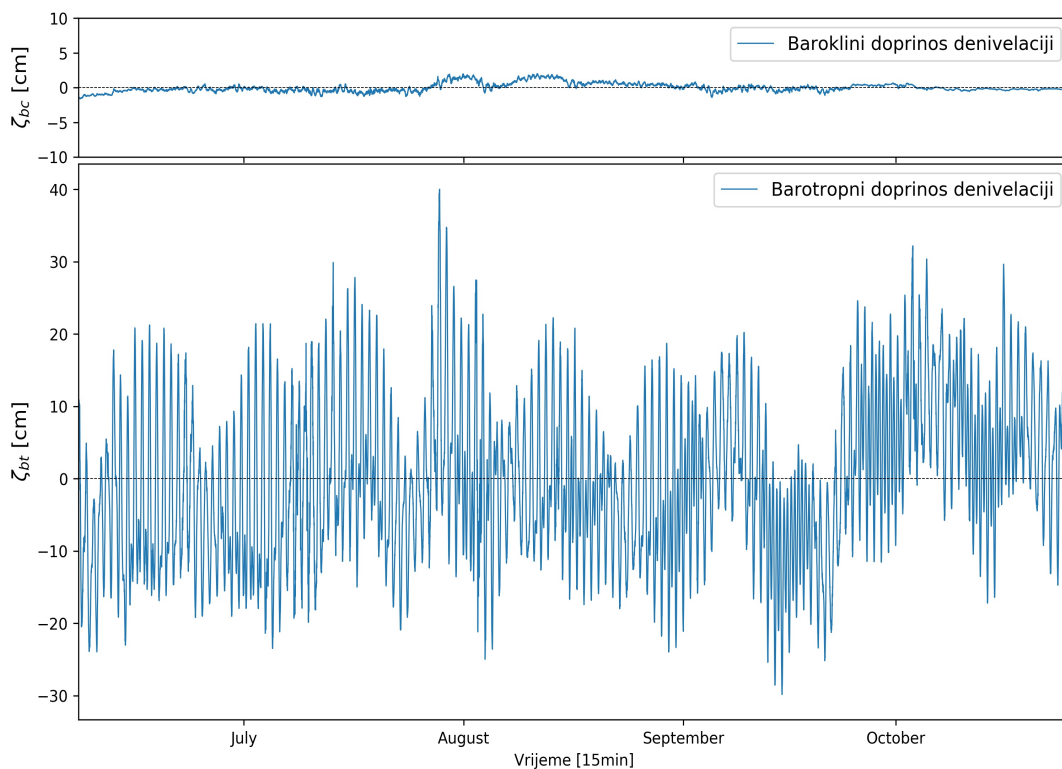
## 4. Rezultati i diskusija

Naredno poglavlje obuhvaća grafičke prikaze i komentare svih rezultata rada na koje se u drugom potpoglavlju nadovezuje diskusija rezultata te prijedlog daljnjeg istraživanja na temu izranjanja kod otoka Blitvenice.

Glavno ograničenje razdoblja za koje su vršene analize bili su podaci s Blitvenice. Morska razina na postaji Split-luka mjeri se kontinuirano te nije bila ograničavajući čimbenik, dok su mjerenja tlačnog mareografa i obližnjeg barometra bila dostupna za razdoblje od 7. lipnja u 16:00 (*CET*) do 25. listopada u 13:00 (*CET*). Stoga, rezultati i zaključci koji slijede temelje se na analizi za razdoblje dostupnih mjerenja za Blitvenicu. Također treba napomenuti kako se razdoblje razmatranja skraćivalo tijekom analize kao posljedica primjene različitih metoda, što će biti napomenuto kod rezultata pojedine metode.

### 4.1. Rezultati

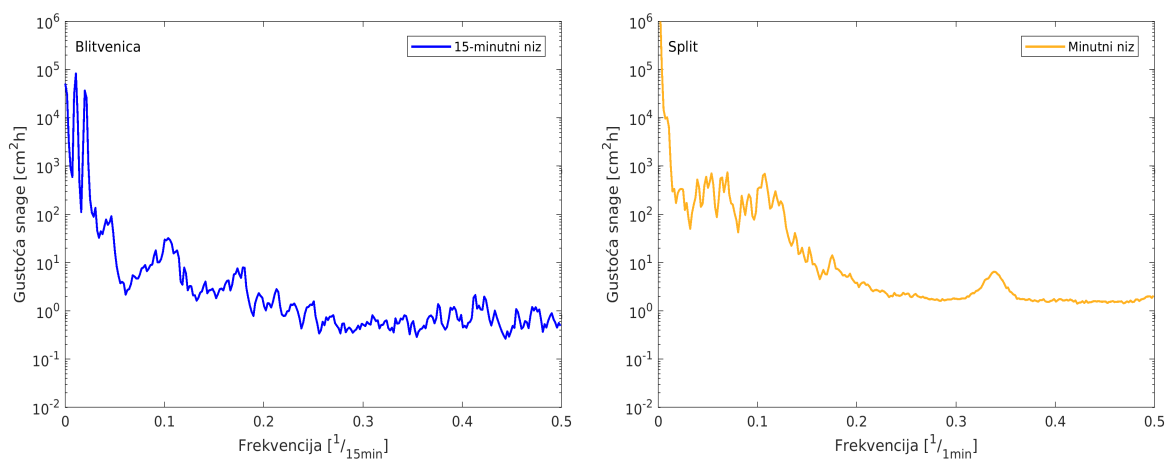
Prvi rezultat nakon izračuna denivelacija za Blitvenicu iz podataka o tlaku bila je provjera valjanosti primijenjenog modela iz jednadžbe 2.9. To je napravljeno razmatranjem vremenskih nizova barotropnih i baroklinih doprinosa, što je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1. Rastav niza denivelacija na barotropni i baroklini doprinos za podatke s Blitvenice. Doprinosi računati prema jednadžbi 2.9.

Već je na prvi pogled jasno kako je baroklini doprinos znatno manji od barotropnog. Najveća amplituda baroklinog doprinosa je 3,6 centimetara, dok za barotropni ona iznosi 69,9 centimetara. To nije iznenađujuće jer baroklini doprinos potječe od širenja i skupljanja stupca vode u vertikalnom smjeru, što je puno slabije izražen proces nego plimne oscilacije, koje spadaju u barotropni doprinos i lijepo se vide kao dnevni maksimumi i minimumi. Također je primjetno da je amplituda modulirana zbog polumjesečnih plimnih konstituenata. Maksimalna denivelacija iznosi 40 centimetara što znači da najveći omjer denivelacije  $\zeta(t)$  i dubine  $\bar{h}$  iznosi 0,02.

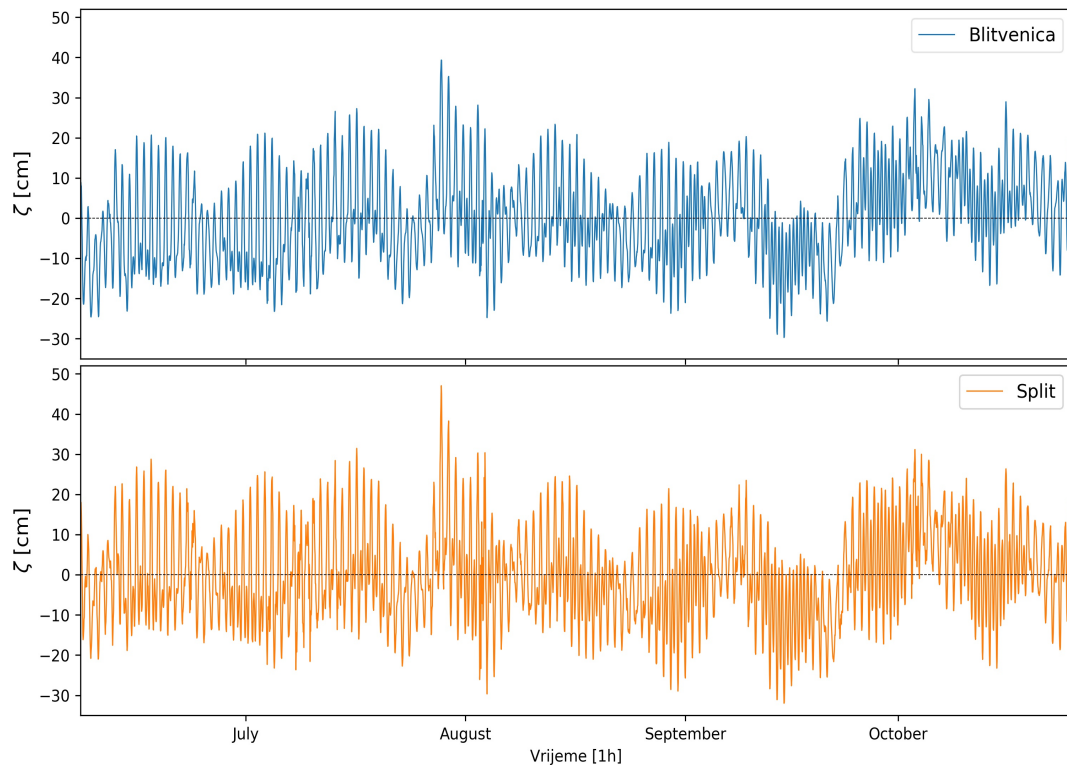
Nakon razmatranja različitih doprinosa denivelaciji na Blitvenici, slijedilo je svođenje 15-minutnih nizova i minutnih nizova na satne vrijednosti. Razmotrimo najprije spektre gustoće snaga originalnih nizova prikazane na slici 4.2. Najmanji razlučivi period u nizu



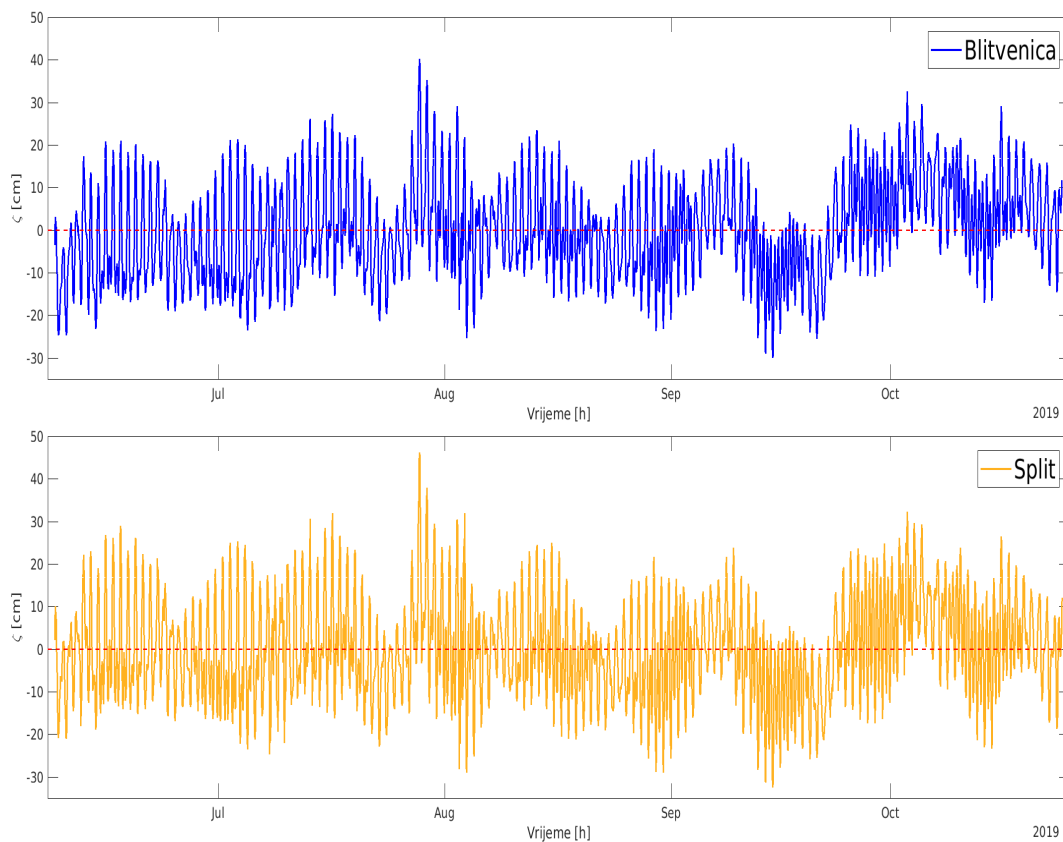
Slika 4.2. Spektri gustoća snage originalnih nizova denivelacije za postaje Blitvenica (*lijevo*) i Split-luka (*desno*).

za Blitvenicu je 30 minuta, dok je za Split-luka to 2 minute, što je posljedica teorema o uzorkovanju. Stoga, u spektru gustoće snage za Blitvenicu već je filtriran dio kratkoperiodičkih oscilacija te su razlučive plimne oscilacije na lijevom kraju grafa. U spektru gustoće snage za Split-luka ne vide se zasebno plimne sastavnice, već je njihova snaga grupirana oko 0+ na  $x$ -osi, ali se zato lijepo vide slobodne oscilacije, tj. seši Kaštelanskog zaljeva (1. mod perioda 1 sat prema Zore, 1955, u poglavlju Orlić, 2001) i splitske luke (1. mod perioda 7,1 minuta prema Vilibić i Mihanović, 2002) te preostalih modova koji su kraćih perioda od osnovnih. Obzirom da je to sve predstavljalo nepoželjni signal pri razmatranju učinaka duljih razdoblja puhanja vjetrova i da je podatke trebalo svesti na isti interval uzorkovanja, primijenjene su dvije metode navedene u prethodnom poglavlju. Na slici 4.3 nalaze se satni nizovi dobiveni računanjem satnih srednjaka, a na slici 4.4. nizovi dobiveni niskopropusnim filtriranjem.



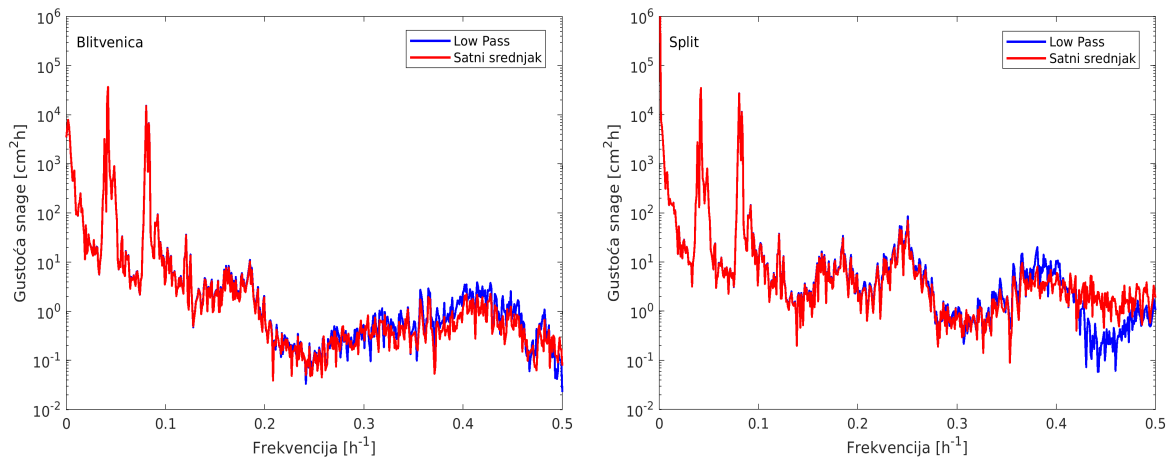


Slika 4.3. Satni nizovi denivelacija dobiveni metodom računanja satnih srednjaka za postaje Blitvenica (*gore*) i Split-luka (*dolje*).



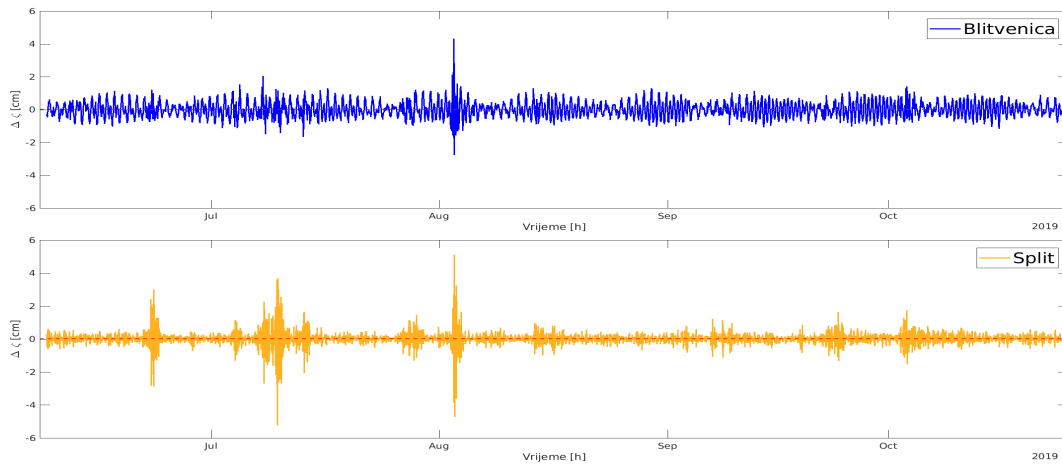
Slika 4.4. Satni nizovi denivelacija napravljeni metodom filtriranja niskopropusnim filtrom za postaje Blitvenica (*gore*) i Split-luka (*dolje*).

Uočimo najprije sličnosti u satnim vremenskim nizovima denivelacija za Split-luka i Blitvenicu. U oba niza dominantan je plimni signal. U splitskoj luci je plimni signal jači nego na Blitvenici, što se vidi i iz spektra gustoće snage na slici 3.5. Dugoperiodička komponenta signala na prvi je pogled vrlo slična i u Splitu i kod Blitvenice. Ako pažljivo osmotrimo satne nizove za istu postaju dobivene na različite načine, nije moguće uočiti velike razlike u metodama. Obzirom da je cilj bio odabrati onu metodu koja bolje uklanja oscilacije kratkih perioda, napravljena je usporedba spektara gustoće snage dviju metoda. Rezultat ovog koraka nalazi se na slici 4.5.



Slika 4.5. Spektri gustoće snage za nizove dobivene metodom satnih srednjaka i niskopropusnim filtriranjem za postaje Blitvenica (*lijevo*) i Split-luka (*desno*).

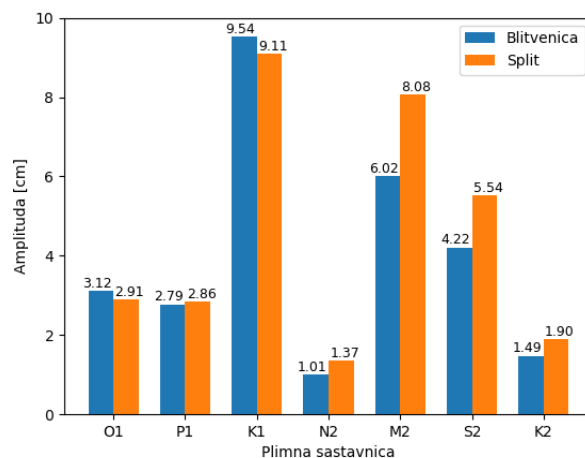
Spektralna dekompozicija dala je rješenje koju metodu odabrati za daljnje korištenje i to temeljem spektra za Split-luka. Ako pobliže pogledamo desni dio grafa, raspon frekvencija od  $0,4$  do  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , uočavamo da su oscilacije odgovarajućih perioda (2 do 2,5 sati) bolje filtrirane niskopropusnim filtrom jer je kod njega na tim frekvencijama raspodijeljeno manje snage nego za satni srednjak. Spektri za Blitvenicu dobiveni ovim dvjema metodama ne razlikuju se znatno, a razlog tomu je 15-minutno uzorkovanje tlačnog mareografa koje je već samo po sebi filter. Prije prelaska na idući rezultat, razmotrimo još razliku nizova dobivenih satnim srednjacima i niskopropusnim filtriranjem, što se nalazi na slici 4.6. Ono što na prvu dolazi do izražaja je da kod Blitvenice signal prolazi prilično pravilno s vidljivim plimnim oscilacijama, dok je na postaji Split-luka izraženo samo nekoliko intenzivnih kratkoperiodičkih događaja. Razlog ovakvog razilaženja signala kod Blitvenice je u postojanju pomaka koji se nije mogao izbjeći pri pridruživanju vrijednosti tijekom metode satnih srednjaka. Srednjak je računat za svaka 4 podatka što je značilo da je taj srednjak trebalo pridružiti sredini intervala; ili drugom ili trećem podatku. Za bilo koji od ta dva odabira postoji pomak od 7,5 minuta u odnosu na stvarnu sredinu intervala koji do izražaja dolazi tek kod oduzimanja nizova satnih podataka. Međutim, razlike između nizova su reda veličine jednog centimetra, što je u okviru točnosti mjernog instrumenta. Kod nizova za Split-luka pomak ne dolazi



Slika 4.6. Razlika niza dobivenog metodom satnih srednjaka i niskopropusno filtriranog niza za postaje Blitvenica (*gore*) i Split-luka (*dolje*).

do izražaja jer su podatci uzorkovani svaku minutu, stoga je i najveći mogući pomak u odnosu na stvarnu sredinu intervala samo 0,5 minuta. Također, razlike koje se uočavaju na postaji Split-luka potječu od seša splitske luke koji su dobro uklonjeni filtriranjem, ali ipak djelomično ostaju u signalu dobivenom satnim srednjakom. Jedina mana korištenog niskopropusnog filtra jest gubitak podataka jednak polovici duljine korištenog filtra (u ovom slučaju 23 satna podatka) s oba kraja niza. Obzirom na duljinu niza od 4 mjeseca to nije bilo znatno te je daljnja analiza rađena sa satnim podacima za razdoblje 8. lipnja 15:00 (*CET*) – 24. listopada u 14:00 (*CET*).

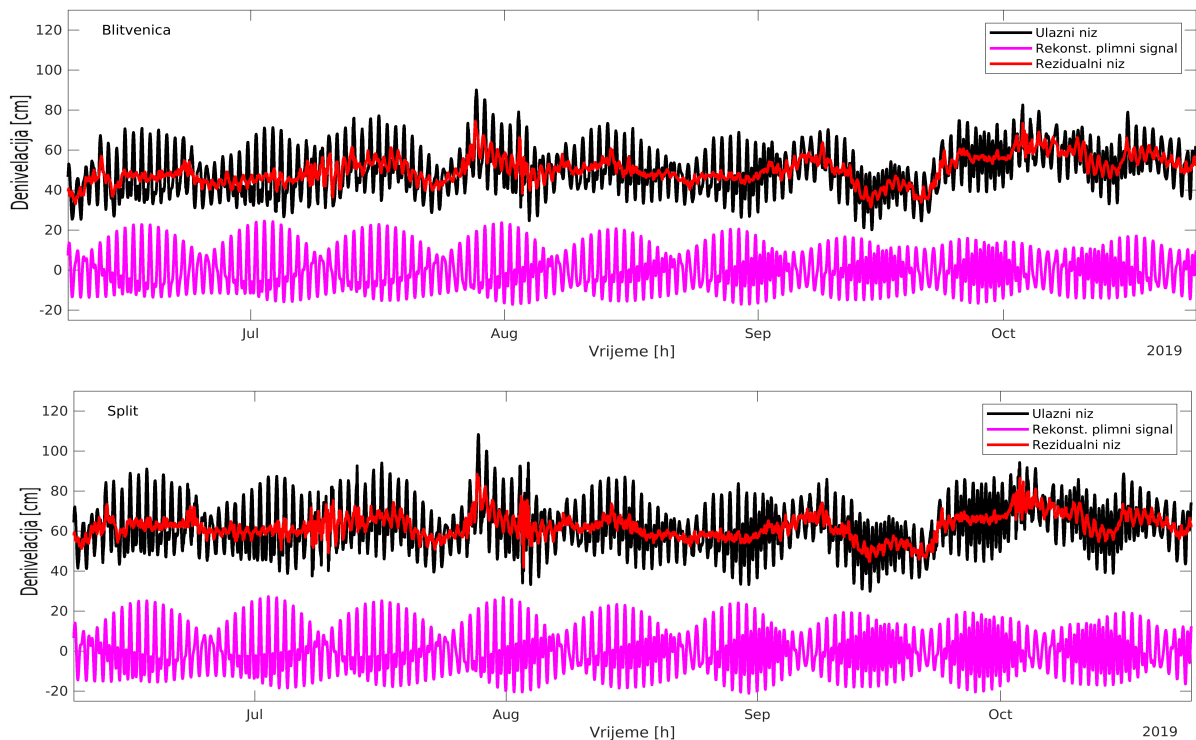
Idući korak u analizi bile su harmonijska analiza i sinteza. Iz satnih vrijednosti dobivenih niskopropusnim filtriranjem paketom  $T\_TIDE$  izdvojene su plimne sastavnice O1, P1, K1, N2, M2, S2 i K2 te su izračunate njihove amplitude i faze. Na slici 4.7 nalazi se grafički prikaz odnosa amplitude za navedene plimne sastavnice u splitskoj



Slika 4.7. Amplitude plimnih sastavnica dobivene iz niskopropusno filtriranog satnog niza pomoću paketa  $T\_TIDE$ .

luci i kod otoka Blitvenice. Detaljnija usporedba podataka iz 2019. sa slike 4.7 i podataka iz 1960. iz tablice 2.1 bit će ostavljena za potpoglavlje *Diskusija*. Za sada samo primijetimo kako je pretpostavka o utjecaju blizine amfidromijske točke za sastavnicu M2 iz potpoglavlja 2.1 bila točna te je uistinu amplituda te sastavnice manja kod otoka Blitvenice nego u splitskoj luci.

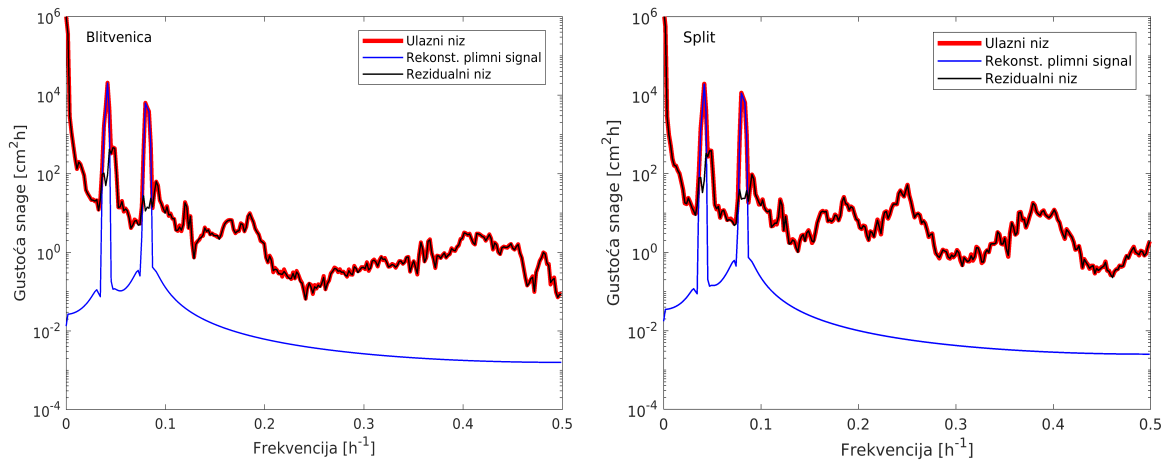
Temeljem informacija o amplitudama i fazama te astronomskim konstantama o kojima je bilo govora ranije, paket *T\_TIDE* također radi i sintezu plimnog signala. Stoga, izračunati su i rekonstruirani plimni signali za Split-luka i Blitvenicu koji su potom oduzeti od niskopropusno filtriranih satnih nizova. Sva tri niza prikazana su na slici 4.8. Do sredine rujna plimni signal za obje prostorne točke izgleda vrlo slično, dok poslije toga plimni signal kod Blitvenice počinje imati manju amplitudu od onoga u splitskoj luci.



Slika 4.8. Ulazni, rekonstruirani plimni i rezidualni vremenski niz za postaje Blitvenica (*gore*) i Split-luka (*dolje*). Rekonstruirani plimni signal izračunat paketom *T\_TIDE*.

Ukupni plimni signal je superpozicija svih sedam zadanih komponenti, stoga manja amplituda M2 sastavnice za Blitvenicu ne dolazi uvijek jednako do izražaja. Više se ističe u signalu kada se dogodi destruktivna ili konstruktivna interferencija nekih od preostalih komponenti, a manje kada je situacija negdje između ta dva slučaja. Obzirom da je pojava izranjanja teško uočljiva upravo zbog malog iznosa spuštanja morske razine, važno je ukloniti plimne oscilacije koje imaju veliki udio u signalu. Za provjeru koliko dobro su one uklonjene oduzimanjem rekonstruiranog niza, razmotren

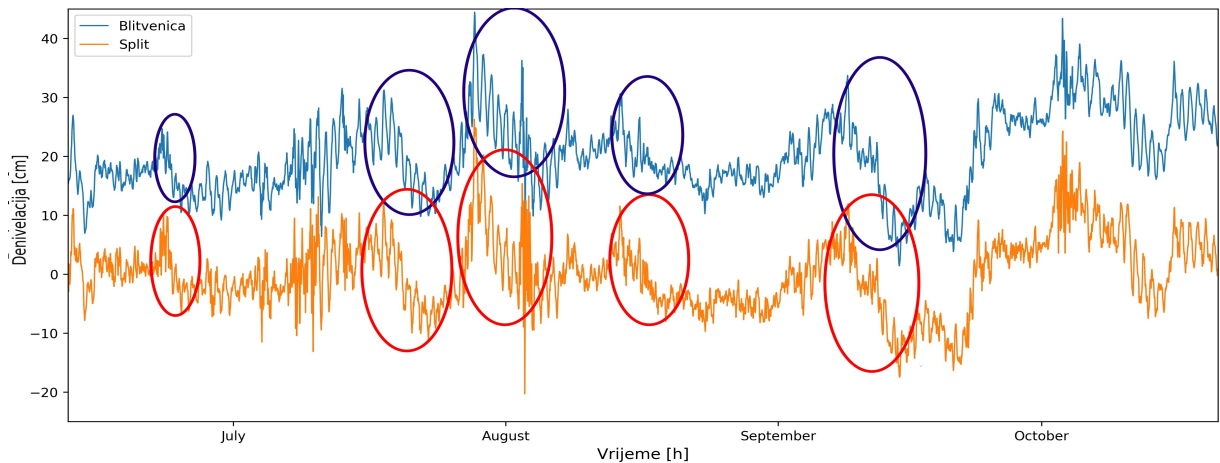
je spektar gustoće snage ulaznog, rekonstruiranog i rezidualnog satnog plimnog signala (slika 4.9).



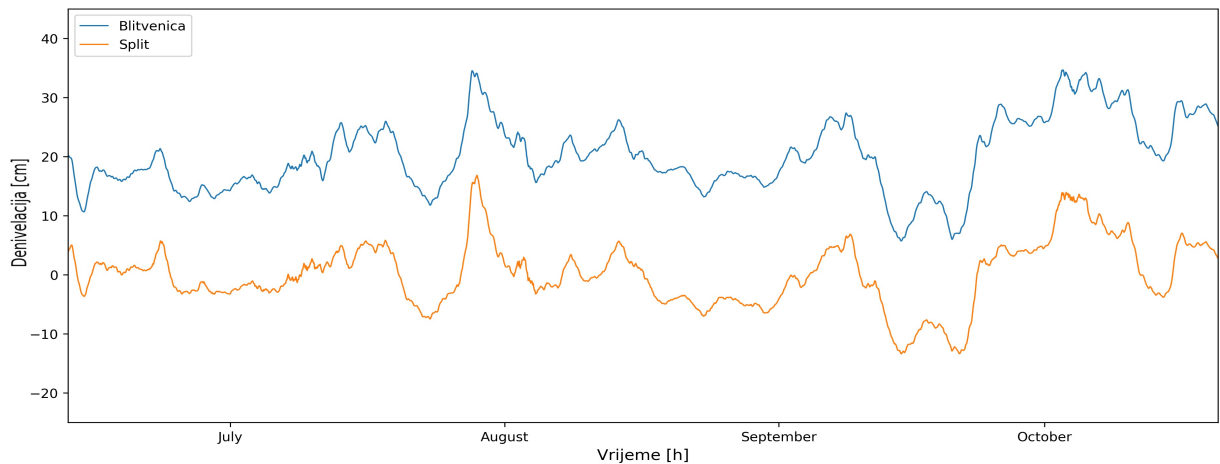
Slika 4.9. Spektri gustoće snage ulaznog, rekonstruiranog plimnog i rezidualnog signala za postaje Blitvenica (*lijevo*) i Split-luka (*desno*). Rekonstruirani plimni signal izračunat paketom  $T\_TIDE$ .

Iz spektara na slici 4.9 vidimo da su sastavnice s najvećom amplitudom, K1 i M2, jako dobro uklonjene jer u spektru rezidualnog niza više nema njima pripadnih lokalnih maksimuma. Ostale komponente, također dnevne i poludnevne, nisu zasebno razlučive u signalu zbog manjih amplituda i malih razlika u periodima u odnosu na K1 i M2. Iz spektra su uklonjene kao dio doprinosa maksimumima sastavnica K1 i M2. Daljnji rad napravljen je korištenjem rezidualnih nizova, tj. nizova iz kojih je uklonjen osnovni plimni signal.

Prije razmatranja kako su povezane promjene denivelacija sa smjerom i trajanjem puhanja vjetrova, trebalo je provjeriti jesu li iz rezidualnog niza doista uklonjene sve kratkoperiodičke oscilacije koje predstavlja ju smetnja. Na slici 4.10 prikazani su rezidualni nizovi nastali kao rezultat prethodnog koraka. Višednevno puhanje juga ili nailazak ciklone mogu uzrokovati visoki vodostaj na sjeverozapadnom dijelu Jadranskog bazena što za posljedicu ima pojavu 1. i 2. moda jadranskog seša (istitrvanja amplitude 5 do 10 centimetara označena elipsama na slici 4.10). To su oscilacije perioda 21 i 11 sati te ih također treba ukloniti iz signala. U tu svrhu na cijeli je rezidualni niz primijenjen 24-satni klizni srednjak, što je ponovno skratilo broj satnih podataka. Naime, zbog prirode računanja 24-satnog kliznog srednjaka, niz je skraćen za po 12 (satnih) podataka s početka i s kraja niza. Stoga, novo razdoblje razmatranja postalo je 9. lipnja 03:00 (*CET*) – 24. listopada 02:00 (*CET*). No, ako razmotrimo rezidualni niz nakon primjene 24-satnog kliznog srednjaka na slici 4.11, vidimo da je njegova primjena opravdana jer je uklonjena većina nepoželjnog kratkoperiodičkog signala.



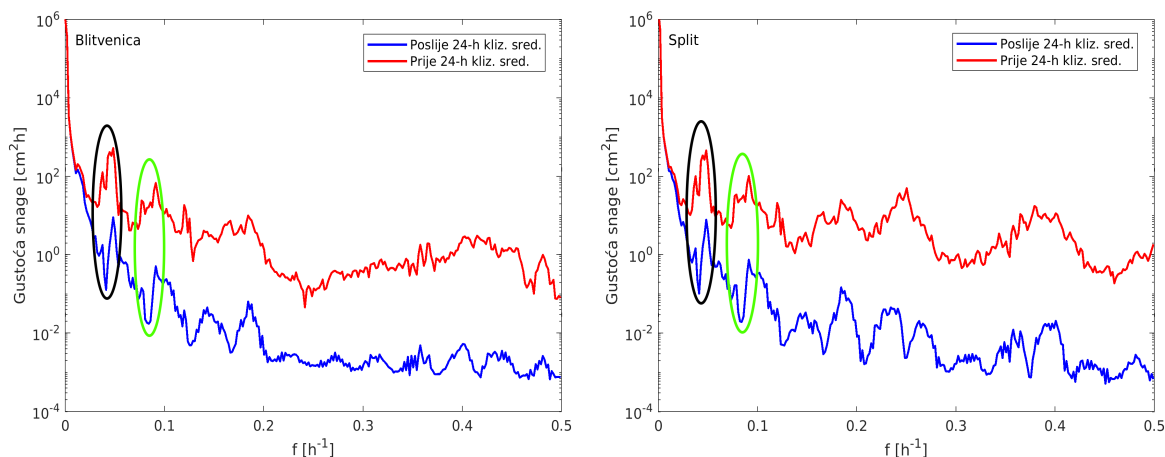
Slika 4.10. Rezidualni nizovi. Niz za Blitvenicu pomaknut je za 20 centimetara u smjeru  $+y$ -osi radi preglednosti. *Ljubičastim* i *crvenim* elipsama označena su razdoblja poslije visokih vodostaja.



Slika 4.11. Rezidualni nizovi nakon primjene 24-satnog kliznog srednjaka. Niz za Blitvenicu pomaknut je za 20 centimetara u smjeru  $+y$ -osi radi preglednosti.

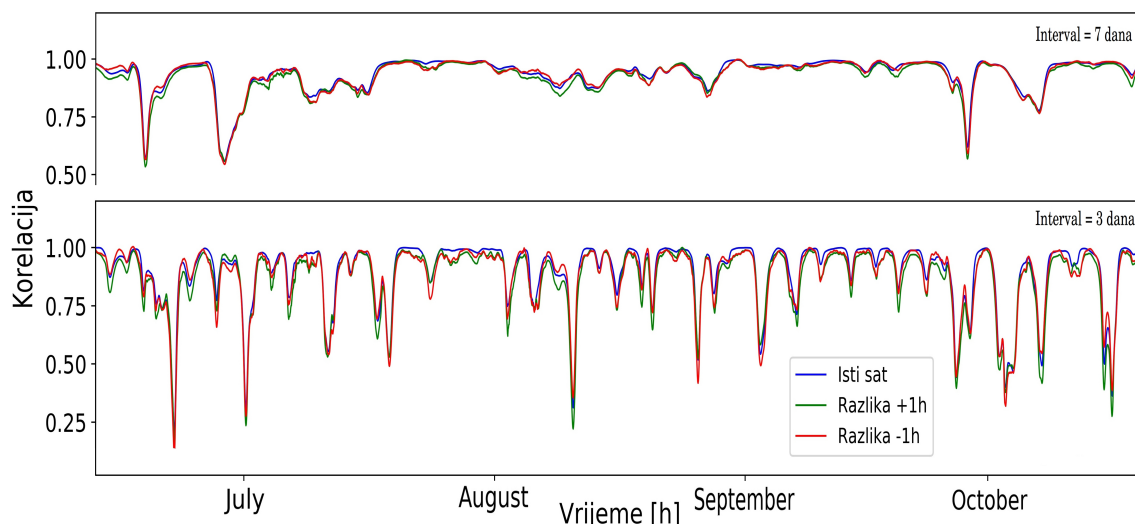
Više se ne nazire 1. mod jadranskog seša za postaju Split-luka, dok kod niza za Blitvenicu prolazi s amplitudom manjom od 1 centimetar, što je dovoljno dobro u svrhu razmatranja pojave izranjanja. No, 2. mod jadranskog seša u potpunosti je uklonjen, a to je bilo i za očekivati zbog manjeg perioda i manje amplitude u odnosu na 1. mod. Radi poptune analize i potvrde primjerenosti korištenja 24-satnog kliznog srednjaka, razmotrimo još sliku 4.12 gdje je prikazana usporedba spektara gustoće snage za niz sa slike 4.10 i niz sa slike 4.11. Usporedbom spektara gustoće snage možemo zaključiti kako su seši uistinu dobro filtrirani u novonastalom nizu te da je primjenom 24-satnog kliznog srednjaka dodatno smanjen šum koji su stvarale ostale prisutne oscilacije manjih perioda. Ovaj korak bio je zadnji iz dijela pripreme niza denivelacija za daljnu međusobnu usporedbu i usporedbu s podacima o vjetru. Stoga, prije prelaska na idući rezultat, ponovimo još jednom koje su sve metode dosad primijenjene na podatke. Najprije su iz 15-minutnih zapisa tlaka na dnu (približno 20 metara dubine) i srednjih

gustoća u vertikalnom stupcu izračunate denivelacije kod otoka Blitvenice. Zatim su 15-minutni i minutni zapisi denivelacija kod Blitvenice i u splitskoj luci niskopropusnim filtriranjem svedeni na satne nizove podataka. Potom je uslijedilo uklanjanje plimnog signala i stvaranje rezidualnog niza podataka. Zadnji korak pripreme bio je uklanjanje preostalih kratkoperiodičkih oscilacija u rezidualnom nizu primjenom 24-satnog kliznog srednjaka te je s tako dobivenim podacima vršena daljnja analiza.



Slika 4.12. Spektri gustoće snage rezidualnih nizova prije i poslije primjene 24-satnog kliznog srednjaka za postaje Blitvenica (*lijevo*) i Split-luka (*desno*). *Crnom* elipsom označen je 1. mod jadranskog seša, a *zelenom* 2. mod.

Prije početka usporedbe denivelacija dviju postaja s komponentama vjetera, trebalo je provjeriti jesu li signali između postaja vremenski usklađeni. Naime, obzirom da se Blitvenica nalazi 70-ak kilometara sjeverozapadno od postaje Split-luka, postojala je mogućnost da odziv morske razine kod jedne prostorne točke kasni ili rani u odnosu na odziv kod druge prostorne točke, i to zbog toga što isti atmosferski poremećaj koji utječe na obje možda dolazi do jedne točke ranije nego do druge. Stoga, napravljen je vremenski niz korelacija između dva niza denivelacija za vremenski posmak od  $-1$  i  $+1$  sat za Blitvenicu u odnosu na postaju Split-luka. Ti su rezultati uspoređeni s onima za posmak jednak 0 sati kao referentnim vrijednostima. Također su razmatrane različite duljine podintervala izračuna korelacija, 3 i 7 dana. Ovi su rezultati prikazani na slici 4.13. Ako promotrimo korelacije za podintervale 3 i 7 dana, primjetno je kako su one redom pozitivne, što navodi na zaključak da procesi koji se odvijaju na duljim vremenskim skalama uzrokuju isti predznak promjena denivelacije kod Blitvenice i kod Splita. Slaganje je veće za procese trajanja do 7 dana, a malo manje za one koji traju do tri dana. Obzirom da su kod podataka za vjetar razmatrana ona razdoblja kada je nekoliko dana puhao vjetar približno istog smjera, za usporedbu su korištene upravo korelacije računane klizno preko navedene dvije duljine podintervala.



Slika 4.13. Korelacija rezidualnih nizova tijekom razdoblja 9. lipnja – 24. listopada 2019. za posmake -1, 0 i +1 sat za postaju Split-luka u odnosu na postaju Blitvenica.

U tablici 4.1 nalaze se udjeli slučajeva u kojima je korelacija za različite podintervale bila viša za posmake -1 i +1 sat u odnosu na posmak 0 za cijelo razmatrano razdoblje. Zanimljivo je primijetiti kako je za veći podinterval i udio slučajeva za posmak -1 sat veći, dok je za posmak +1 sat manji. To ima smisla jer sinoptički atmosferski

Tablica 4.1. Udjeli slučajeva u kojima su apsolutni iznosi korelacija za posmake -1 i +1 sat (Blitvenica u odnosu na Split-luka) bili veći od onih za posmak jednak 0.

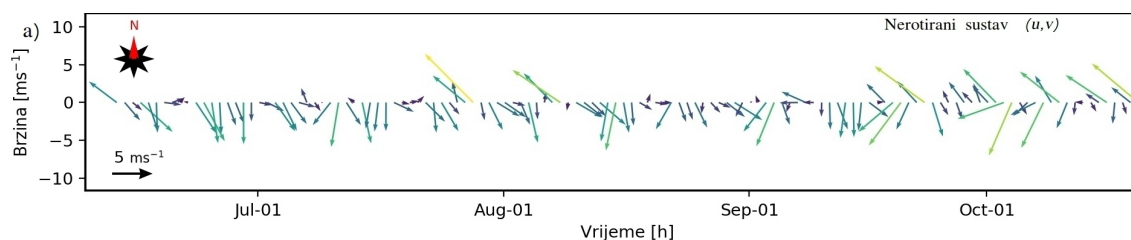
| Duljina podintervala | Posmak -1 sat | Posmak +1 sat |
|----------------------|---------------|---------------|
| 3 dana               | 22,1 %        | 7,6 %         |
| 7 dana               | 35,9 %        | 8,1 %         |

poremećaji za područje Jadrana obično dolaze sa zapada, a na morsku razinu djeluju do nekoliko dana. Iako je čak u trećini slučajeva korelacija za sedmodnevni podinterval izračuna veća kada u obzir uzmemo da se učinci na Blitvenici vide sat vremena ranije nego u Splitu (posmak -1 sat), to je još uvijek znatno manje od 56%, koliki je udio slučajeva kada je korelacija veća uz pretpostavku istovremenih događaja (posmak 0). Stoga, pri uspoređivanju denivelacija na Blitvenici i u splitskoj luci s vjetrom, pretpostavljeno je da je međusobni posmak denivelacija jednak nuli.

Zadnji dio rezultata obuhvaćao je povezivanje promjena denivelacija sa smjerovima i iznosima brzina vjetra radi utvrđivanja situacija u kojima je dolazilo do izranjanja. Na slici 4.14 nalazi se vektorski prikaz svakog 24. vektora vjetra dobivenog filtriranjem 24-satnim kliznim srednjakom. Već na prvi pogled primjetno je kako je tijekom ljeta većinom puhao sjeverozapadni vjetar (etezije) s nekoliko epizoda puhanja sjeveroistočnog vjetra (bura). Jak jugoistočni vjetar (jugo – široko) javio se dvaput tijekom ljeta,

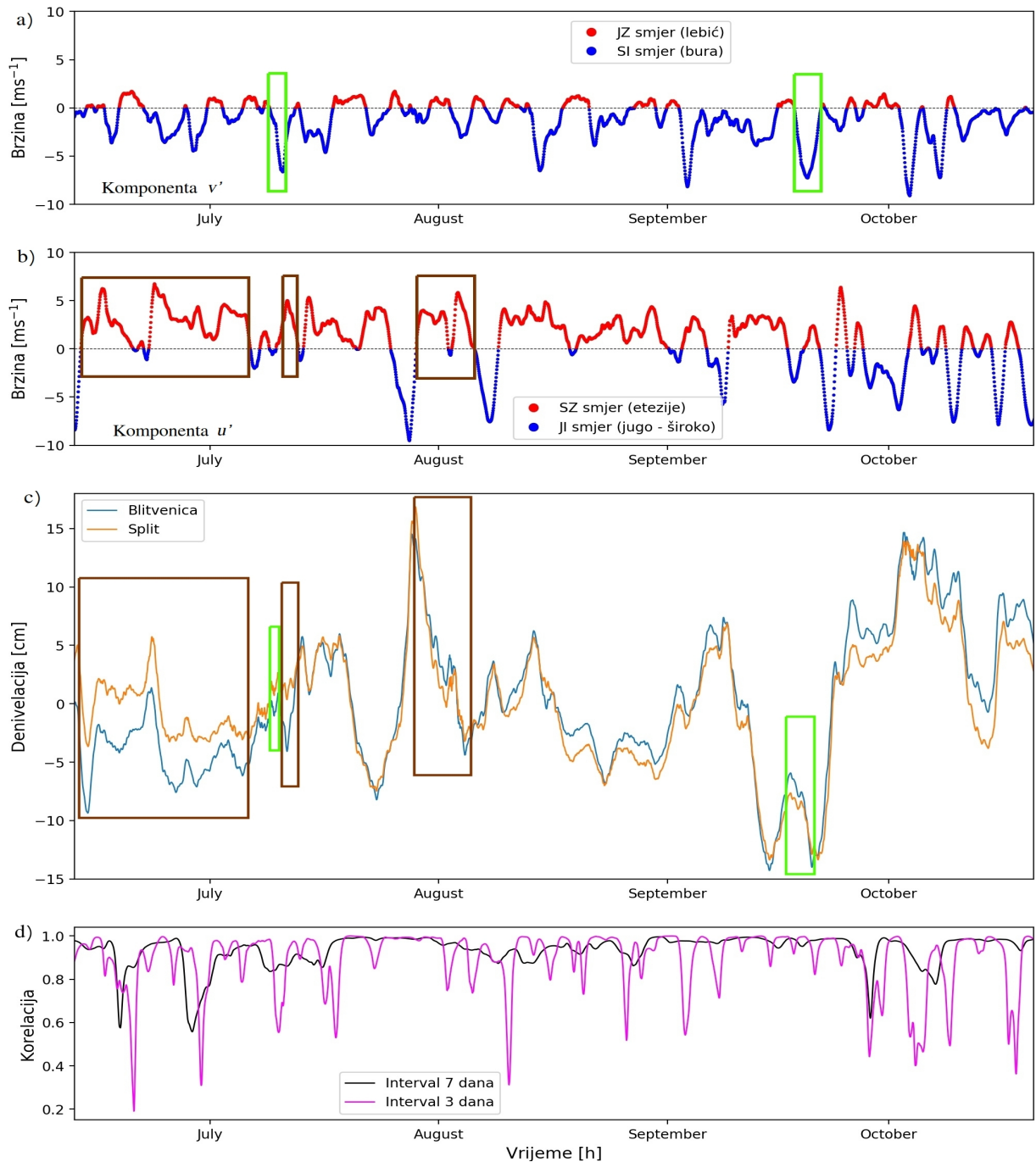


krajem sedmog i početkom osmog mjeseca, dok početkom jeseni počinje puhati sve češće.



Slika 4.14. Vektori prostorno usrednjenog vjetra za razdoblje 9. lipnja – 24. listopada 2019.

Razmotrimo sliku 4.15 koja je ujedno i glavni rezultat cijelog istraživanja. Komponente vjetra u rotiranom sustavu nalaze se na grafovima (a) i (b). Na grafu (a) sjeveroistočni se vjetar očituje u negativnoj vrijednosti brzine, a jugozapadni vjetar u pozitivnoj vrijednosti, dok se na grafu (b) sjeverozapadni vjetar očituje u pozitivnoj vrijednosti brzine, a jugoistočni vjetar u negativnoj vrijednosti. Na slici (c) prikazani su rezidualni nizovi denivelacija za postaje Split-luka i Blitvenica na kojima su posebno naznačena razdoblja jakog i postojanog puhanja vjetrova koji uzrokuju izranjanje: **smeđom** bojom označena su razdoblja puhanja sjeverozapadnog vjetra, a **zelenom** razdoblja puhanja sjeveroistočnog vjetra. Primijetimo kako se tijekom cijelog razdoblja sjeveroistočni vjetar javljao rjeđe i puhao u kraćim intervalima, ali zato većim brzinama. Također je zanimljivo za označena razdoblja razmotriti korelacije računate preko pod-intervalu 3 i 7 dana, gdje niže vrijednosti korelacije dodatno ističu razlike u denivelacijama između dviju postaja. Neka od razdoblja snižene korelacije poklapaju se s razdobljima puhanja sjeverozapadnog vjetra. Detaljnije razmatranje ovih rezultata nalazi se u narednom potpoglavlju.



Slika 4.15.

- (a) Iznosi brzina u rotiranom sustavu ( $u', v'$ ), komponenta  $v'$
- (b) Iznosi brzina u rotiranom sustavu ( $u', v'$ ), komponenta  $u'$
- (c) Rezidualni nizovi denivelacija
- (d) Korelacija između rezidualnih nizova denivelacija za postaje Split-luka i Blitvenica.

## 4.2. Diskusija

Prvi rezultat iznesen u prethodnom poglavlju bio je odnos baroklinog i barotropnog doprinosa denivealciji. Ako se prisjetimo dimenzionalne analize s kraja drugog poglavlja, uviđamo da baroklini doprinos uistinu doprinosi s približno  $10^{-2}$  metara, a barotropni s približno  $10^{-1}$  metara. Za proces izranjanja zasigurno je ključan barotropni udio jer se tijekom njega odvija transport mase, glavni mehanizam kojim se voda izmjenjuje. U barotropnom doprinosu odmah su uočljive dugoperiodičke oscilacije. Ako usporedimo rekonstruirani plimni signal sa slike 4.8 i barotropni doprinos sa slike 4.1, uvidjet ćemo kako je signal sličan oblikom, a maksimalna amplituda približno 20 centimetara. U baroklinom doprinosu je zanimljivo uočiti veću varijabilnost tijekom ljeta te maksimume početkom i sredinom kolovoza. Jadran ima klimu umjerenih širina te se maksimum zagrijavanja postiže u mjesecu srpnju. Međutim, zbog tromosti mora, maksimum temperature mora javlja se tek mjesec dana kasnije. Također je ljeti more stratificirano što rezultira većim zagrijavanjem površinskog sloja stupca vode te posljedično njegovim rastezanjem, dakle porastom denivelacije. U jesen počinje češće puhati sjeveroistočni vjetar (vidljivo na slici 4.14) koji pospješuje hlađenje mora, a kako je i zagrijavanje sve slabijeg intenziteta, baroklini doprinos postaje sve manji. Kada bismo imali mjerenja tijekom cijele godine, možemo pretpostaviti kako bi se u baroklinom doprinosu nazirao godišnji hod s pozitivnim doprinosom denivelaciji tijekom ljetnih mjeseci i negativnim doprinosom tijekom zimskih mjeseci.

Kod odabira metode za stvaranje satnog niza denivelacija bio je odabran nisko-propusni filter zbog toga što je u nizu dobivenom na taj način bilo do 1,6% manje snage pridijeljeno oscilacijama perioda manjih od 10 sati. Glavni razlog tomu je detaljnije definiranje težina filtra, dok su one kod satnog srednjaka jednake (za podatke s Blitvenice  $\frac{1}{4}$ , a za podatke iz splitske luke  $\frac{1}{60}$ ). No, u nekom istraživanju gdje bi razmatrali samo Blitvenicu i filter satni srednjak bio bi dovoljno dobar zbog toga što su podatci na Blitvenici uzorkovani u 15-minutnim razmacima, stoga je velik udio kratkoperiodičkih oscilacija uklonjen već samim intervalom uzorkovanja. Također se Blitvenica nalazi na otvorenom moru, a ne u zaljevu poput postaje Split-luka, stoga bismo čak i s kraćim intervalom uzorkovanja mogli očekivati manje snage na kraćim periodima nego što je to kod postaje Split-luka gdje se javljaju zaljevski seši.

Sljedeći rezultati bili su analiza i sinteza plimnog signala pomoću paketa  $T\_TIDE$ . Najprije usporedimo amplitude plimnih sastavnica na slici 4.7 s onima iz poglavlja Cushman-Roisin *et al.* (2001) prikazanih u tablici 2.1, gdje se nalaze maksimumi svake od plimnih sastavnica i postaje gdje su izmjereni. Većina sastavnica poprima maksimume u sjeverozapadnom dijelu bazena, gdje je i jadranski bazen plići (Venecija,

Trst). Jedino sastavnica N2 maksimum poprima u blizini mjesta Falconara Marittima, koje je nešto južnije, kraj luke Ancona. Dnevne sastavnice P1, O1 i K1 kod Splita i Blitvenice imaju amplitudu dvostruko manju od izmjerenih maksimuma iz tablice 2.1, dok poludnevne sastavnice N2, K2, S2 i M2 čak do 3 i 4 puta manju amplitudu. Razlog tomu je njihov položaj u odnosu na linije koje spajaju prostorne točke iste amplitude. Prema slici 2.1 (a) vidimo da su i Split-luka i Blitvenica bliži amfidromijskoj točki sastavnice M2 nego što su to Trst i Venecija, pri čemu je Blitvenica samoj točki bliža nego Split-luka. To se očituje i u rekonstruiranim amplitudama na slici 4.7: M2 sastavnica kod Blitvenice ima za 2 centimetra (25%) manju amplitudu u odnosu na Split-luka. Na slici 2.1 (b) nalazi se karta za sastavnice K1 i P1 koje imaju vrlo sličnu prostornu raspodjelu amplituda i faza pa se često prikazuju zajedno. Primijetimo kako ovdje izolinije amplituda nisu zatvorenog tipa kao kod sastavnice M2, već se protežu poprečno duž jadranskog bazena od jugozapada prema sjeveroistoku, s porastom prema sjeverozapadnom dijelu bazena. Uistinu, prema slici 4.7 amplitude za Split-luka i Blitvenicu su znatno manje nego one kod Trsta i Venecije, a također kod Blitvenice, koja se nalazi sjeverozapadno od Split-lukaa, sastavnice K1 i P1 imaju veće amplitude nego kod Split-lukaa. Pogledajmo još podatke u tablici 4.2 u kojoj se nalaze podatci o amplitudama sastavnica M2, S2, K1 i O1 za postaje Split i Šibenik iz Cushman-Roisin *et al.* (2001). Ti nam podatci mogu poslužiti

Tablica 4.2. Amplitude za 4 plimne sastavnice s postaja Split-luka i Šibenik. Podatci preuzeti iz Cushman-Roisin *et al.* (2001) prema Polli (1960).

|            | Amplituda [cm] |     |     |     |
|------------|----------------|-----|-----|-----|
| Postaja    | M2             | S2  | K1  | O1  |
| Split-luka | 7,6            | 5,4 | 9,5 | 3,2 |
| Šibenik    | 6,3            | 4,4 | 9,3 | 3,0 |

za usporedbu s amplitudama dobivenima u ovom radu (slika 4.7) te kao mjera kvalitete sinteze plimnog signala. Za postaju Split-luka primijetimo kako se amplitude za sastavnice M2, S2, K1 i O1 poprilično slažu, s najvećim odstupanjem 9% za sastavnicu O1. Rekonstruirani niz dnevne sastavnice za mali iznos potcjenjuje, a poludnevne precjenjuje. Usporedbu amplituda za otok Blitvicu napraviti ćemo s postajom Šibenik, koja je najbliža dostupna postaja iz podataka. Odstupanja su još manja nego za postaju Split-luka (najveće odstupanje 4,5% za sastavnicu M2). Iz ovih podataka izgleda kako sintetizirani signal potcjenjuje poludnevne komponente, a precjenjuje dnevne, tj. obrnuto od postaje Split-luka. No, relevantan bi trebao biti odnos rekonstruiranog signala i podataka iz tablice 4.2 za postaju Split-luka. Naime, čak i relativno mala udaljenost Šibenika i Blitvenice od približno 27 kilometara zračne udaljenosti može značiti da se dvije postaje ne nalaze u zonama iste amplitude za pojedinu sastavnicu

(npr. slika 2.1 a), što ih čini neprimjerenima za kvantitativnu ocjenu kvalitete sinteze.

Nakon rekonstrukcije plimnog signala izračunat je rezidualni niz oduzimanjem plimnog signala od izvornog niza denivelacija. Nakon tog koraka napravljena je provjera kakav je signal preostao u takvom nizu pomoću spektra gustoće snaga, što je prikazano na slici 4.9. U spektru rezidualnog niza vidljiva su dva manja lokalna maksimuma: prvi desno od velikog maksimuma dnevnog plimnog signala ( $T \sim 21$  h), a drugi desno od velikog maksimuma poludnevnog plimnog signala ( $T \sim 11$  h). Za provjeru radi li se doista o 1. i 2. modu seša jadranskog bazena razmotren je vremenski niz rezidualnih denivelacija (slika 4.10). Tu se lijepo vidi kako se nakon visokih vodostaja javljaju oscilacije, tj. istitravanje morske razine, kojima se ona dovodi u ravnotežu nakon prestanka vanjske pobude. Pobuda koja uzrokuje najjače seše jest jugoistočni vjetar. Osvrnimo se nakratko na slike 4.15 (b) i (c). Na slici (b) prikazana je  $u'$  komponenta vjetra čiju pozitivnu vrijednost tumačimo kao sjeverozapadni vjetar, a negativnu kao jugoistočni. Od sredine dana 25. srpnja pa sve do kraja 28. srpnja puhao je izrazito jak jugoistočni vjetar. Na slici (c) vidimo da se to očitovalo kao izrazit porast morske razine i u splitskoj luci i kod Blitvenice u razdoblju od 26. do 29. srpnja, nakon čega počinje nagli pad morske razine. No, na slici 4.10, prije filtriranja 24-satnim kliznim srednjakom, vidimo da se morska razina nije vratila u neporemećeno stanje jednolikim padom već nizom oscilacija, što su upravo seši jadranskog bazena. Iako iz spektra gustoće snaga na slici 4.12 vidimo da su dva problematična maksimuma prilično dobro uklonjena, na slici 4.11 u vremenskom nizu filtriranog rezidualnog niza vidimo da je 1. mod jadranskog seša bolje uklonjen iz vremenskog niza za Split-luka nego iz niza za Blitvenicu. Mogući razlog tomu je što Otrantski kanal predstavlja čvrsti kraj prilikom oscilacija te također čvor za 1. mod stojnog vala, dok se u sjeverozapadnom dijelu bazena formira trbuh. Dakle, za očekivati bi bilo da se 1. mod jadranskog seša u točki bližoj čvoru (tj. Otrantskom kanalu) javlja s manjom amplitudom nego u točki koja se nalazi sjeverozapadnije. Stoga, moguće je da je upravo iz tog razloga signal 1. moda seša kod Splita bio slabiji pa samim time i manje zamjetan u signalu nakon primjene 24-satnog kliznog srednjaka.

Prije prelaska na komentar zadnjeg rezultata u radu, osvrnimo se nakratko na usporedbu korelacija za različite podintervale izračuna sa slike 4.13. Ovaj je međurezultat već prodiskutiran uz samu sliku zbog toga što je bio važan dio pripreme prije razmatranja vjetra i samih rezidualnih nizova denivelacija. No, valja još nešto primijetiti. Vidimo da su korelacije za posmake -1 i +1 sat više varijabilne za manji podinterval izračuna. Stoga, pri razmatranju procesa na manjim vremenskim skalama od tri dana vremenski posmak između podataka možda ne bi bio zanemariv te bi ga trebalo uzeti u obzir tijekom razmatranja, kao i smjer iz kojeg nailaze pripadni

atmosferski poremećaji. Obzirom da su postaje vrlo blizu jedna drugoj, za manju vremensku skalu moguća je i situacija u kojoj niži prizemni tlak kod Splita uzrokuje porast morske razine, dok kod Blitvenice uzrokuje pad. Također, u obrnutoj situaciji viši tlak kod Blitvenice uzrokovao bi porast denivelacije, a kod Splita pad. Općenito, korelacije rezidualnih nizova denivelacije su bile zanimljive za razmatranje jer su bile prvi pokazatelj potencijalnih razdoblja u kojima se javljalo izranjanje kod Blitvenice. U takvoj situaciji kod Blitvenice bi trebalo doći do pada morske razine, dok kod Splita ne bi bilo znatne promjene.

Razmotrimo slike 4.14 i 4.15. Grafički prikazi (a), (b), (c) i (d) na slici 4.15 su stavljeni jedni iznad drugih jer je svaki od njih nosio informaciju koja je pomagala pri uočavanju događaja kada je nastupilo izranjanje. Slika 4.14 sadrži vektorski prikaz dnevnih srednjaka vjetra radi lakšeg snalaženja na grafovima (a) i (b) slike 4.15, gdje se nalaze komponente vjetra  $u'$  i  $v'$ . Na njima su pravokutnicima označena razdoblja kada su puhali vjetrovi koji pogoduju izranjanju: *smeđom* bojom razdoblja puhanja sjeverozapadnog vjetra (etezija), a *zelenom* bojom razdoblja puhanja sjeveroistočnog vjetra (bure). Na slici (c) nalaze se rezidualni nizovi denivelacija filtrirani 24-satnim kliznim srednjakom za obje postaje. Na ovom su grafu označena razdoblja u kojima je:

- denivelacija bila niža na postaji Blitvenica nego Split-luka
- pad denivelacije bio veći na postaji Blitvenica nego Split-luka,

obje vrste za slučajeve kada je nekoliko sati prije počelo višednevno puhanje jakog sjeverozapadnog ili sjeveroistočnog vjetra. Na zadnjem grafu pod slovom (d) nalaze se korelacije između denivelacija na Blitvenici i u splitskoj luci za podintervale 3 i 7 dana. One su služile kao dodatna provjera koliko su u razdobljima od interesa denivelacije za dvije lokacije bile korelirane jer kod pojave izranjanja očekujemo nižu korelaciju između denivelacija.

U tablici 4.3 nalaze se detektirana razdoblja u kojima je bila moguća pojava izranjanja. Od početka lipnja pa sve do sredine srpnja prevladavao je vjetar sjeverozapadnog smjera brzine do  $7 \text{ ms}^{-1}$ . Tijekom tog razdoblja u pet epizoda u trajanju dva do tri dana zapuhao je jak sjeveroistočni vjetar, čiji se učinak superponirao na učinak sjeverozapadnog vjetra te su denivelacije poprimale još niže vrijednosti. Od sredine kolovoza do početka rujna također je prevladavao sjeverozapadni vjetar s dvije intenzivne epizode puhanja sjeveroistočnog vjetra. Od sredine rujna sve češće puše sjeveroistočni vjetar koji se izmjenjuje s epizodama puhanja jugoistočnog vjetra (jugo – široko), stoga na denivelacije sve veći utjecaj imaju ova dva vjetra, dok utjecaj sjeverozapadnog vjetra slabi. To je odraz klime u Dalmaciji, gdje u hladnijem dijelu godine

sa zapada češće nailaze ciklonalni poremećaji (npr. Genovska ciklona) tijekom kojih najprije puše jugoistočni vjetar (prednji dio ciklone), a nakon prolaska sjeveroistočni vjetar (stražnji dio ciklone). Ovo se lijepo vidi i na slici 4.14 gdje se od sredine rujna često javlja jugoistočni vjetar nakon kojeg slijedi sjeveroistočni vjetar. Promotrimo načas korelacije izračunate preko kliznih podintervala različitih duljina. Tijekom razdoblja kada je puhao sjeverozapadni vjetar korelacije za trodnevne i sedmodnevne podintervale uglavnom su bile sličnog iznosa. Razlog tomu je što je sjeverozapadni vjetar puhao prilično jednoliko nekoliko dana za redom. No, tijekom razdoblja kada je puhala bura, što je većinom trajalo od jednog do tri dana, korelacije za podinterval od 3 dana su niže nego one za podinterval od 7 dana. Podinterval 7 dana je predug interval da bi se dobro izdvojila točna korelacija rezidualnih nizova tijekom atmosferskih procesa manje skale, stoga bi pri razmatranju izranjanja uzrokovanog isključivo sjeveroistočnim

Tablica 4.3. Razdoblja u kojima su postojali vjetrovni uvjeti za pojavu izranjanja, a denivelacije bile niže ili strmijeg pada kod Blitvenice. Znak \* znači da se datum odnosi na sredinu tog dana.

| Razdoblje      | Smjer vjetra |
|----------------|--------------|
| 13.6.* – 6.7.* | SZ           |
| 9.7. – 11.7.   | SI           |
| 11.7. – 13.7.  | SZ           |
| 29.7. – 6.8.   | SZ           |
| 18.9.* – 22.9. | SI           |

vjetrom ispravno bilo razmatrati korelacije za podinterval 3 dana. No, kako je u ovom radu od najvećeg interesa bilo uočiti razdoblja pojave izranjanja uzrokovanog Ekmanovim transportom mase uslijed etezija, podinterval 7 dana bio je dobar odabir za razmatranje vremenskog niza korelacija. Također je zanimljivo za primijetiti kako se niža korelacija javlja i za razdoblja puhanja jugoistočnog vjetra, kada je zbog utjecaja obale u splitskoj luci bio veći porast denivelacije nego kod Blitvenice.

Idući korak u analizi pojave izranjanja kod Blitvenice bio bi razmatranje vertikalnih profila gustoće i temperature za isto mjesto gdje je bio postavljen tlačni mareograf i to opet za ljetni dio godine, kada postoji stratifikacija. Time bi pojava izranjanja u navedenim razdobljima iz tablice 4.3 bila ili potvrđena ili opovrgnuta. Naime, ako su se u tim razdobljima niža korelacija rezidualnih nizova denivelacije i niža denivelacija kod Blitvenice javljale kao posljedica procesa izranjanja, to će se u vertikalnim profilima očitovati u gušćim izopiknama i izotermama u površinskom sloju. Također, navedene izolije koje inače odgovaraju dubljim slojevima nalazit će se na manjim dubinama, stoga možemo očekivati i izdignutu piknoklinu (sloj u kojem se gustoća naglo mijenja).

Dodatno, prostorno polje temperature površine mora za nekoliko točaka u okolici otoka Blitvenice bilo bi još jedan važan izvor informacija. Ako bi se tijekom razdoblja iz tablice 4.3 kod Blitvenice javila i niža površinska temperatura mora nego u preostalim točkama, bila bi to potvrda pojave izranjanja.



## 5. Zaključak

U ovom radu cilj je bio detaljno analizirati promjene morske razine kod otoka Blitvenice i na postaji Split-luka za razdoblje 7. lipnja – 25. listopada 2019. godine. Na postaji Split-luka podatci su bili minutno uzorkovani digitalnim plovčanim mareografom, a kod otoka Blitvenice podatci su uzorkovani svakih 15 minuta tlačnim mareografom. Najprije je izvršen izračun denivelacija iz podataka o tlaku prema jednadžbi 2.9 te je zaključeno kako je maksimalna amplituda baroklinog doprinosa denivelaciji 3,6 centimetara, a barotropnog 69,9 centimetara. Time je pokazano kako je pretpostavka o zanemarivanju člana  $\frac{\zeta(t)}{h}$  u jednadžbi 2.6 bila prilično razumna jer taj član prema podacima iz mjerenja doprinosi s najviše 20 %.

Za stvaranje satnih nizova iz podataka o denivelaciji s postaje Split-luka prikladnijim se pokazao niskopropusni filter s točkom polovice snage na  $0,5 \text{ h}^{-1}$  zbog boljeg prigušenja kratkoperiodičkih oscilacija. U nizu podataka s Blitvenice kratkoperiodičke su oscilacije već bile manjeg udjela u spektru gustoće snage zbog duljeg intervala uzorkovanja te zato što se Blitvenica nalazi na otvorenom moru gdje se, za razliku od Splita, ne javljaju lokalni seši. Stoga, za takav niz već se i metoda računanja satnih srednjaka za stvaranje satnog niza pokazala dovoljno dobrom.

Izračun rezidualnog niza denivelacija napravljen je oduzimanjem rekonstruiranog plimnog signala od izvornog niza satnih denivelacija. Analiza plimnog signala paketom *T\_TIDE* pokazala se vrlo točnom, što je zaključeno usporedbom s podacima za najbliže prostorne točke iz Cushman-Roisin *et al.* (2001) prema radu Polli (1960). Pokazano je kako blizina amfidromijske točke utječe na manju amplitudu sastavnice M2 kod otoka Blitvenice u odnosu na postaju Split-luka. Oduzimanjem plimnog signala u nastalom rezidualnom nizu denivelacija preostao je dio kratkoperiodičkih oscilacija, od kojih su najveću amplitudu imali 1. i 2. mod jadranskog seša. Te su oscilacije iz rezidualnog niza uklonjene 24-satnim kliznim srednjakom.

Usporedbom vremenskog niza korelacija između denivelacija za postaje Split-luka i Blitvenica utvrđeno je kako ona ovisi o duljini podintervala. Podintervali 3 i 7 dana ne razlikuju se znatno za potrebe proučavanja sjeverozapadnog vjetra, dok bi za potrebe istraživanja utjecaja sjeveroistočnog vjetra na izranjanje prikladnije bilo gledati samo podinterval 3 dana. Uzimanje u obzir posmaka +1 i -1 sat među nizovima denivelacija ne unosi znatnu razliku u niz korelacija. Za podinterval 7 dana u 35,9% slučajeva korelacija za posmak -1 sat je viša, iz čega se može zaključiti da veći atmosferski poremećaji tijekom ljeta najčešće nailaze sa zapada ili sjeverozapada.

Dva najdulja razdoblja kada su postojali uvjeti za pojavu izranjanja uz jak i postojan sjeverozapadni vjetar bila su 13.6. – 6.7.2019. i 29.7. – 6.8.2019. godine. Tada je pad denivelacije kod Blitvenice u odnosu na postaju Split-luka bio znatan, a korelacija nizova denivelacija niža nego inače. Uz dominantni sjeverozapadni vjetar prostorno usrednjene brzine do  $5 \text{ ms}^{-1}$  javljao se i intenzivni sjeveroistočni vjetar u trajanju jednog do tri dana brzine do  $8 \text{ ms}^{-1}$ . Ukupna denivelacija i moguće izranjanje vjerojatno su rezultat superpozicije djelovanja ovih dvaju vjetrova, što bi trebalo dodatno istražiti. Za daljnji rad i provjeru je li u navedenim razdobljima uistinu došlo do pojave izranjanja preporučuju se sljedeći koraci:

- analiza površinske temperature mora tijekom ljetnih mjeseci za nekoliko prostornih točaka u blizini otoka Blitvenice
- razmatranje vertikalnih profila gustoće i temperature za mjesto gdje je bio postavljen tlačni mareograf.

Niža površinska temperatura u odnosu na obližnje točke i izdignuta piknoklina bili bi dodatni pokazatelj pojave izranjanja kod otoka Blitvenice.

## Literatura

- Bakun, A. (1973) Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–71. U.S. Department of Commerce: NOAA Technical Report NMFS SSRF-671.
- Bowden, K. F. (1983) *Physical oceanography of coastal waters*. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- Cushman-Roisin, B., Malačić, V., Gačić, M. (2001) Tides, seiches and low-frequency oscillations. U: Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.-M., Artegiani, A. (ur.), *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, str. 217-240.
- Ekman, V.W. (1905) On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 2(11), 1–52.
- Foreman, M.G.G. (1977) Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. *Pacific Marine Science Report*, 77(10).
- Gačić, M., Poulain, P.-M., Zore-Armanda, M., Barale, V. (2001) Overview. U: Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.-M., Artegiani, A. (ur.), *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, str. 1-44.
- Kämpf, J., Chapman, P. (2016) *Upwelling Systems of the World: A Scientific Journey to the Most Productive Marine Ecosystems*. New York: Springer.
- Međugorac, I. (2018) *Izuzetno visoki vodostaji u sjevernom Jadranu i nagib morske razine u smjeru istok-zapad*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Mrežne stranice Marine Science Australia: Measuring sea level* (2019). Dostupno na: <https://www.ausmarinescience.com/marine-science-basics/measuring-sea-level> [9. srpnja 2020.]
- Orlić, M. (1987) Oscillations of the inertia period on the Adriatic Sea shelf. *Continental Shelf Research*, 7(6), 577-598.
- Orlić, M. (2001) Regional studies: Croatian Coastal Waters. U: Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.-M., Artegiani, A. (ur.), *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 189-214.

- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28, 929-937.
- Polli, S. (1960) La propagazione delle maree nell'Adriatico. *Pubblicazione Istituto Talassografico*, 370.
- Pond, S., Pickard, G. L. (1983) *Introductory Dynamical Oceanography*. Second edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Stewart, R. H. (2008) *Introduction To Physical Oceanography [online]*. Dostupno na: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/160216> [12. srpnja 2020.]
- Šepić, J., Orlić, M., Vilibić, I. (2008) The Bakar Bay seiches and their relationship with atmospheric processes. *Acta Adriatica*, 49(2), 107-123.
- Thomson, R.E., Emery, W.J. (2014) *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Third edition. Amsterdam; Waltham; Oxford: Elsevier.
- Tomczak, M. (1998) *Shelf and Coastal Oceanography: Upwelling dynamics in deep and shallow water*. Online tečaj prema autorovim predavanjima. Dostupno na: <https://www.mt-oceanography.info/ShelfCoast/chapter06.html> [18. srpnja 2020.]
- Vilibić, I., Mihanović, H. (2002) A study of seiches in the Split harbour (Adriatic Sea). *Acta Adriatica*, 43(2), 59-68.
- Zore, M. (1955) On the seiches occuring in the Bay of Kastela. *Acta Adriatica*, 7(3), 1-18.

# Dodatak

## A Popis kratica

|              |  |
|--------------|--|
| <i>MAUD</i>  | projekt <i>Middle Adriatic Upwelling and Downwelling</i>             |
| s.g.š.       | sjeverna geografska širina   |
| i.g.d.       | istočna geografska duljina   |
| $p$          | tlak zraka   |
| $\rho$       | gustoća morske vode  |
| $\zeta$      | denivelacija morske razine   |
| <i>ECMWF</i> | engleska kratica za Europski centar za srednjoročnu prognozu vremena |
| <i>Cov</i>   | kovarijanca  |
| M2           | Glavna Mjesečeva plimna sastavnica                                   |
| S2           | Glavna Sunčeva plimna sastavnica                                     |
| K2           | Mjesečevo – Sunčeva plimna sastavnica                                |
| N2           | Veća Mjesečeva eliptična plimna sastavnica                           |
| O1           | Glavna Mjesečeva dnevna plimna sastavnica                            |
| K1           | Mjesečeva dnevna plimna sastavnica                                   |
| P1           | Glavna Sunčeva dnevna plimna sastavnica                              |
| <i>CET</i>   | Central European time  |
| SI           | sjeveroistok   |
| JI           | jugoistok  |
| JZ           | jugozapad  |
| SZ           | sjeverozapad   |