

# Klimatologija visokofrekventnih oscilacija razine svjetskih mora

---

Zemunik, Petra

Doctoral thesis / Disertacija

2022

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:217:582480>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geološki odsjek

Petra Zemunik

**KLIMATOLOGIJA  
VISOKOFREKVENTNIH OSCILACIJA  
RAZINE SVJETSKIH MORA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geološki odsjek

Petra Zemunik

**KLIMATOLOGIJA  
VISOKOFREKVENTNIH OSCILACIJA  
RAZINE SVJETSKIH MORA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: dr. sc. Ivica Vilibić

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

Faculty of Science  
Department of Geology

Petra Zemunik

# **CLIMATOLOGY OF HIGH-FREQUENCY SEA-LEVEL OSCILLATIONS IN THE WORLD OCEAN**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Dr. Ivica Vilibić

Zagreb, 2022

Ova doktorska disertacija je izrađena u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog doktorskog studija Oceanologija na Geološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom dr. sc. Ivice Vilibića. Istraživanje je provedeno u Laboratoriju za fiziku mora Instituta za oceanografiju i ribarstvo u Splitu u okviru projekta „Jadranske dekadske i međugodišnje oscilacije: opažanja, modeliranje i posljedice“ (ADIOS; IP-2016-06-1955) Hrvatske zaklade za znanost.

## ZAHVALE

Zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Ivici Vilibiću na pomoći, savjetima i uputama tijekom izrade doktorske disertacije i cjelokupnog dokorskog studija. Hvala mu što je uvijek imao vremena za mene i bio ažuran u svim zajedničkim poslovima. Također želim zahvaliti članovima povjerenstva akademiku Mirku Orliću, dr. sc. Miroslavi Pasarić i dr. sc. Ireni Ciglencečki-Jušić.

Zahvaljujem kolegici dr. sc. Cléi Denamiel na nesebičnoj pomoći tijekom ove četiri godine, na brojnim savjetima i dobrim idejama. Također zahvaljujem kolegama dr. sc. Havu Pellikka i Leonu Čatipoviću, a posebno dr. sc. Jadranki Šepić, na odrađenom velikom dijelu posla oko kontrole kvalitete podataka. Hvala mojim kolegicama i prijateljicama Ivi Tojčić i Petri Pranić na nebrojenim satima rasprava o našim doktorskim istraživanjima i što su učinile ovo iskustvo ugodnijim. Hvala svim kolegama iz Instituta za oceanografiju i ribarstvo.

Svoje zahvale želim uputiti i dr. sc. Joanne Williams na njenom gostoprimstvu u Liverpoolu, na interesu za moja doktorska istraživanja i pomoći pri analizama podataka.

Hvala znanstvenicima iz Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) što su mi omogućili korištenje podataka s talijanskih mareografskih i mikrobarografskih postaja te što su sudjelovali u znanstvenom radu o fenomenu *marrobbio*.

Zahvaljujem tisućama znanstvenika, inženjera i tehničara koji su sudjelovali u održavanju postaja čiji su podaci uključeni u skup podataka MISELA. Zahvaljujem grupi iz Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ) koja održava portal IOC SLSMF, čiji podaci čine većinski dio skupa podataka MISELA, osobito dr. sc. Franciscu Hernandezu koji je dao doprinos njegovom publiciranju.

Hvala grupi istraživača meteoroloških tsunamija s kojom sam se zbližila tijekom dvije međunarodne konferencije o meteorološkim tsunamijima, na izmjeni znanja i mišljenja i ugodnom društvu.

Najveću zahvalnost želim izraziti mojim roditeljima Tatijani i Zoranu koji su mi omogućili sve u životu, pa tako i stjecanje doktorata znanosti. Hvala mom bratu Antoniu na potpori u svakoj odluci. Hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su bili uz mene na ovom putu. Posebno hvala mom Tomi na nesebičnoj podršci, uz njega se sve uvijek činilo malo lakše.

## KLIMATOLOGIJA VISOKOFREKVENTNIH OSCILACIJA RAZINE SVJETSKIH MORA

Petra Zemunik

### SAŽETAK

Posljednjih nekoliko desetljeća mnoge svjetske mareografske postaje su povećale razlučivost mjerenja, što je omogućilo istraživanja kratkoperiodičnih oscilacija razine mora te unaprijedilo proučavanje ekstremnih visina razine mora. Osim seizmičkih tsunamija, ekstremnim visinama razine mora doprinose i kratkoperiodične oscilacije generirane poremećajima u atmosferi, među kojima su najrazorniji meteorološki tsunamiji. Meteorološki tsunamiji su oscilacije razine mora koje se javljaju na periodima tsunamija (od nekoliko minuta do nekoliko sati) i generirane su intenzivnim putujućim atmosferskim poremećajima. U ovoj disertaciji su objedinjena svjetska minutna mjerenja visine razine mora na kojima je provedena kontrola kvalitete te izdvojen visokofrekventni signal (perioda  $T < 2$  h). Kreiran je skup podataka pod imenom MISELA (engl. *Minute SEa – Level Analysis data*) koji obuhvaća mjerenja s 331 mareografske postaje u svijetu. Napravljene su statističke globalne i regionalne analize podataka te je načinjena klimatologija atmosferski uzrokovanih visokofrekventnih oscilacija razine mora. Kvantificirana je povezanost između visokofrekventnih oscilacija i sinoptičkih varijabli relevantnih za njihovu pojavu. Također, uočeni su karakteristični sinoptički uzorci tijekom meteoroloških tsunamija diljem svijeta. Uz globalnu analizu visokofrekventnog signala razine mora, u disertaciji je analiziran i fenomen *marrobbio*, meteorološki tsunami koji se javlja na obalama otoka Sicilije i Lampeduse. Analizirana su mjerenja iz 2007. godine tijekom koje je uočeno šest događaja *marrobbia* s rasponom oscilacija većim od 40 cm. Oscilacije su najveće u luci Mazara del Vallo, lokaciji poznatoj po učestaloj pojavi *marrobbia*, koja se nalazi na jugozapadnoj obali Sicilije.

(127 stranica, 44 slike, 9 tablica, 155 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: razina mora, meteorološki tsunamiji, visokofrekventne oscilacije razine mora atmosferskog porijekla, mareografska mjerenja, interakcija atmosfere i mora, sinoptičke varijable, sinoptički indeks, *marrobbio*

Mentor: dr. sc. Ivica Vilibić

Ocjenjivači: akademik Mirko Orlić  
dr. sc. Miroslava Pasarić  
dr. sc. Irena Ciglonečki-Jušić

CLIMATOLOGY OF HIGH-FREQUENCY SEA-LEVEL OSCILLATIONS IN THE  
WORLD OCEAN

Petra Zemunik

ABSTRACT

During the last few decades, many global tide gauges have increased their sampling resolution, which enabled the research of short-period sea-level oscillations and improved assessments of sea-level extremes. Apart from seismic tsunamis, atmospherically-driven short-period oscillations and their extreme manifestations known as meteorological tsunamis are shown to contribute to extreme sea levels. Meteorological tsunamis are sea-level oscillations which occur on periods of seismic tsunamis (from a few minutes to a few hours) and are generated by intensive propagating atmospheric disturbances. In this thesis, available global 1-minute sea-level observations are merged and unified, then subjected to quality control procedures and finally filtered to extract their high-frequency signal (with period  $T < 2\text{h}$ ). The dataset named MISELA (*Minute SEa - Level Analysis data*) has been created containing observations from 331 tide gauges worldwide. Global and regional statistical analyses have been conducted using the MISELA dataset and a climatology of atmospherically-induced high-frequency sea-level oscillations has been constructed. The connection between high-frequency oscillations and relevant synoptic variables has been quantified. Moreover, specific synoptic patterns have been recognized during meteorological tsunamis in many world regions. Along with global analyses of high-frequency signal, this thesis studies the phenomenon *marrobbio*, a meteorological tsunami which occurs on the coasts of Sicily and Lampedusa. The observations from 2007 have been analysed and six *marrobbio* events with a range of oscillations higher than 40 cm have been detected. The oscillations are shown to have the highest range in Mazara del Vallo, a known “hotspot“ of *marrobbio*, located at the southwest coast of Sicily.

(127 pages, 44 figures, 9 tables, 155 references, original in Croatian)

Keywords: sea level, meteorological tsunami, nonseismic high-frequency sea-level oscillations, tide gauge records, atmosphere-ocean interaction, synoptic variables, synoptic index, *marrobbio*

Supervisor: Dr. Ivica Vilibić

Reviewers: Prof. Mirko Orlić  
Dr. Miroslava Pasarić  
Dr. Irena Ciglencečki-Jušić



## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Globalne baze podataka visine razine mora.....	2
1.2.	Meteorološki tsunamiji.....	4
1.3.	Visokofrekventne oscilacije razine mora atmosferskog porijekla .....	8
1.4.	Fenomen <i>marrobbio</i> .....	9
1.5.	Kratki opis disertacije.....	9
2.	PODACI I METODOLOGIJA .....	11
2.1.	Podaci visine razine mora .....	11
2.2.	Određivanje svojstava visokofrekventnih oscilacija razine mora .....	13
2.3.	Izdvajanje i analiza ekstremnih epizoda kolebanja razine mora .....	14
2.4.	Sinoptičke varijable.....	16
2.5.	Konstrukcija sinoptičkog indeksa .....	19
2.6.	Podaci tlaka zraka.....	20
2.7.	Određivanje brzine atmosferskih poremećaja .....	21
2.8.	Visinska mjerenja.....	22
3.	KREIRANJE SKUPA MINUTNIH PODATAKA VISINE RAZINE MORA.....	23
3.1.	Kontrola kvalitete podataka .....	23
3.2.	Opis datoteka iz skupa podataka MISELA .....	27
3.3.	Prostorna razdioba postaja iz skupa podataka MISELA.....	29
3.3.1.	Globalni pregled.....	29
3.3.2.	Pregled po makro-regijama.....	32
3.4.	Diskusija.....	34
4.	ANALIZA VISOKOFREKVENTNIH OSCILACIJA RAZINE MORA.....	38
4.1.	Podjela postaja u područja i zone.....	38
4.2.	Rezultati .....	40

4.2.1.	Globalne varijance i rasponi .....	40
4.2.2.	Sezonske karakteristike.....	44
4.2.3.	Spektralne karakteristike.....	46
4.2.4.	Sinkronicitet ekstremnih epizoda.....	52
4.3.	Diskusija.....	54
4.3.1.	Globalne varijance i rasponi .....	54
4.3.2.	Sezonske karakteristike.....	56
4.3.3.	Spektralne karakteristike.....	57
4.3.4.	Sinkronicitet ekstremnih epizoda.....	58
5.	GLOBALNA POVEZANOST VISOKFREKVENTNIH OSCILACIJA RAZINE MORA S ATMOSFERSKIM UVJETIMA .....	60
5.1.	Povezanost visokofrekventnih oscilacija razine mora sa sinoptičkim varijablama ..	60
5.2.	Sinoptički uvjeti tijekom ekstremnih epizoda.....	67
5.3.	Sinoptički indeks.....	70
5.4.	Diskusija.....	75
6.	VISOKOFREKVENTNE OSCILACIJE RAZINE MORA I FENOMEN <i>MARROBBIO</i> NA JUGOZAPADNOJ OBALI SICILIJE .....	79
6.1.	Mjerenja visine razine mora i tlaka zraka .....	81
6.2.	Analiza izdvojenih događaja <i>marrobbia</i> .....	84
6.2.1.	Vremenski nizovi visine razine mora .....	85
6.2.2.	Atmosferski poremećaji i njihovo propagiranje .....	87
6.2.3.	Spektralna svojstva .....	90
6.3.	Atmosferski uvjeti tijekom izdvojenih događaja <i>marrobbia</i> .....	94
6.3.1.	Analiza sinoptičkih varijabli iz reanalize ERA5.....	94
6.3.2.	Analiza radio-sondažnih mjerenja .....	97
6.4.	Diskusija.....	100
7.	ZAKLJUČCI.....	102
8.	EXTENDED ABSTRACT .....	106

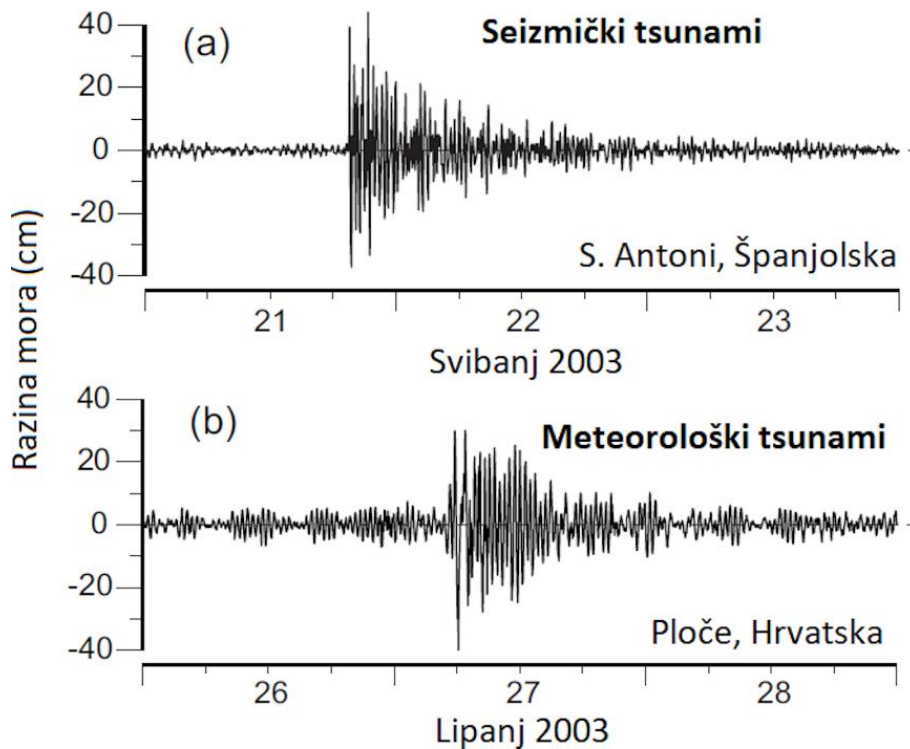
9.	POPIS LITERATURE .....	109
10.	ŽIVOTOPIS .....	125
11.	POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....	126

## 1. UVOD

Ekstremne visine razine mora predstavljaju opasnost u obalnim područjima. Infrastruktura i stanovništvo obalnih područja nisu pripremljeni na ovakve pojave pa je istraživanje njihovog porijekla i karakteristika, procjena njihove učestalosti i razornosti, predikcija njihovog ponašanja u budućoj klimi, razvijanje sustava upozorenja i planiranje mjera prilagodbe na ovakve pojave od iznimne važnosti čovječanstvu (Rabinovich, 2020). Naime, razumijevanje ekstremnih oscilacija razine mora i predikcija njihovih pojavljivanja važna je za pravovremeno upozoravanje građanstva i izbjegavanje potencijalnih materijalnih i ljudskih gubitaka.

Iako se ekstremne visine razine mora pojavljuju naglo, njihov intenzitet je velikim dijelom određen promjenama razine mora koje se odvijaju na duljim periodima. Porast srednje razine mora je proces koji se odvija nejednako u svjetskim morima (Nicholls i sur., 2007) i jedan je od glavnih razloga zašto su obalna poplavlivanja učestalija danas nego prije više desetljeća i stoljeća (Hunter, 2010). Uz to, doprinos ekstremnim visinama razine mora može doći i od međugodišnje i unutargodišnje varijabilnosti (Feng i sur., 2015), promjena u bilanci mase u moru (Rietbroek i sur., 2016), sezonskih oscilacija uzrokovanih steričkim širenjem i atmosferskim sezonskim ciklusom (Domingues i sur., 2018), promjena u cirkulaciji i morskim strujama (Yin i Zhao, 2021), promjena amplitude plimnog signala (Haigh i sur., 2019), a direktan doprinos ekstremima dolazi i od olujnih uspora (engl. *storm surge*), slobodnih oscilacija dijelova ili cijelih bazena (Lowe i sur., 2001), te procesa na minutnoj vremenskoj ljestvici kao što su tsunamiji, slobodne oscilacije manjih zaljeva i drugo (Vilibić i Šepić, 2017).

Među oscilacijama razine mora koje se javljaju na kraćim periodima, najpoznatiji su seizmički tsunamiji. Tsunamiji, čiji naziv dolazi iz japanskog jezika i označava val u luci, su oceanski valovi perioda od nekoliko minuta do nekoliko sati, generirani potresima, podmorskim klizištima ili vulkanskim erupcijama. Zbog svoje razornosti i nerijetkih katastrofalnih događaja koje izazivaju (npr. Chlieh i sur., 2007), u središtu su pozornosti znanstvene zajednice. Uz seizmičke tsunamije, značajnu štetu u obalnim područjima mogu izazvati i atmosferski uzrokovane visokofrekventne oscilacije razine mora i njihove ekstremne manifestacije koje nazivamo meteorološkim tsunamijima (Monserrat i sur., 2006). Gledajući samo mareografske podatke, zapisi meteoroloških i seizmičkih tsunamija vrlo su slični i teško ih se može razlikovati, zbog čega su meteorološki tsunamiji često pogrešno karakterizirani u katalozima tsunamija kao seizmički (slika 1).



**Slika 1.** a) Mjerenja visine razine mora tijekom seizmičkog tsunamija u Sant Antoni (Ibiza, Španjolska) nakon potresa 21. svibnja 2003. godine i b) mjerenja visine razine mora tijekom meteorološkog tsunamija u Pločama (Hrvatska) 27. lipnja 2003. godine. Podaci su filtrirani visokopropusnim filtrom s periodom odsijecanja od 2 h (prilagođeno iz Monserrat i sur., 2006).

Kratkoperiodične oscilacije (seizmički tsunamiji, meteorološki tsunamiji, olujni uspori (engl. *storm surge*) kratkog perioda, infra-težinski valovi (engl. *infragravity waves*)) za svoje istraživanje zahtijevaju podatke visoke razlučivosti. Naime, procesi s periodima kraćim od 2 h ne mogu se pravilno zabilježiti satnim mjerenjima, što je donedavno bio standard svjetskih mareografskih postaja (Menéndez i Woodworth, 2010).

### 1.1. Globalne baze podataka visine razine mora

Mjerenja visine razine mora daju uvid u razne oceanografske procese kao što su seši, olujni uspori, tsunamiji, morske mijene, sezonske promjene razine mora, opći porast razine mora i drugi. Već od davnih dana shvaćena je važnost ovih podataka i njihovog organiziranja i sačuvanja u kvalitetnim i dostupnim bazama podataka koje su neophodne za razvijanje znanja o promjenama razine mora (Vafeidis i sur., 2008; Hunter i sur., 2017) te posljedično za upravljanje obalnih područja. No, do danas nije razvijena ni jedna baza ili skup podataka visine razine mora koja sadrži globalne kontrolirane podatke mjerene s dovoljno velikom

vremenskom razlučivosti i koja bi omogućila znanstveno istraživanje procesa na periodima do nekoliko sati. Dostupne globalne baze podataka razlikuju se u karakteristikama kao što su interval uzorkovanja podataka i prostorna pokrivenost. Globalna mjerenja visine razine mora su arhivirana u sljedećim podatkovnim centrima i skupovima podataka:

1. Služba za srednju razinu mora (PSMSL, engl. *Permanent Service for Mean Sea Level*, <https://www.psmsl.org>) stavlja na raspolaganje srednje mjesečne i godišnje vrijednosti visine razine mora za otprilike 1550 svjetskih postaja, koje se uglavnom koriste za klimatološke studije razine mora (Holgate i sur., 2013).
2. Centar za oceanografske podatke Ujedinjenog Kraljevstva (BODC, engl. *British Oceanographic Data Centre*, <https://www.bodc.ac.uk>) omogućuje pristup podacima visine razine mora mjerene s razlučivosti od jednog sata ili veće za otprilike 215 svjetskih postaja, u vremenskom odmaku do jedne godine tijekom kojeg Centar provodi kontrolu kvalitete. Centar također stavlja na raspolaganje podatke mareografske mreže Ujedinjenog Kraljevstva, kao i povijesna mjerenja tlačnim senzorima (engl. *bottom pressure recorder*).
3. Repozitorij podataka globalne analize ekstremnih razina mora (GESLA, engl. *Global Extreme Sea Level Analysis dataset*, <http://www.gesla.org>) sadrži podatke visine razine mora satne ili veće (npr. 10 ili 15 min) razlučivosti za otprilike 5200 svjetskih postaja (Haigh i sur., 2021). Dodatna kontrola kvalitete podataka se ne provodi, već se repozitorij oslanja na procedure provedene od agencija i institucija koje daju podatke.
4. Centar za razinu mora Sveučilišta na Havajima (UHSLC, engl. *University of Hawaii Sea Level Centre*, <https://uhslc.soest.hawaii.edu>) stavlja na raspolaganje podatke s odmakom do dva mjeseca za otprilike 300 postaja s provedenom preliminarnom kontrolom kvalitete (engl. *fast delivery*), te potpuno kontrolirane (engl. *research quality*) satne podatke za otprilike 550 postaja u suradnji s Nacionalnim centrom za informacije o okolišu Nacionalne agencije za istraživanje oceana i atmosfere (engl. *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Centers for Environmental Information*, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.nodc:JIMAR-JASL>).
5. Portal mareografskih postaja Međuvladine oceanografske komisije (IOC SLSMF, engl. *Intergovernmental Oceanographic Commission Sea Level Station Monitoring*

*Facility*, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>) djeluje pod okriljem Flamanskog morskog instituta (VLIZ, engl. *Flanders Marine Institut*) i omogućuje pristup nekontroliranim (sirovim, engl. *raw*) podacima visine razine mora s otprilike 1100 svjetskih mareografskih postaja s minutnom razlučivosti (na većini postaja) u stvarnom vremenu.

Potonji skup podataka, jedini od navedenih, sadrži podatke visine razine mora mjerene s razlučivosti od 1 minute. Nažalost, podaci koji su dostupni u stvarnom vremenu nemaju mogućnost podvrgavanja procedurama kontrole kvalitete, pa mogu sadržavati različite pogreške u nizovima (UNESCO, 2020). Osim navedenih baza i skupova podataka, postoje centri koji stavljaju na raspolaganje minutne podatke, no uglavnom pokrivaju samo određene obale, primjerice Repozitorij podataka plime i struja (engl. *NOAA Tides and Currents dataset*, <https://tidesandcurrents.noaa.gov>). Stoga je u ovoj disertaciji kreiran globalni skup minutnih kontroliranih podataka visine razine mora imena MISELA (engl. *Minute SEa - Level Analysis data*). Pristup ovakvom skupu podataka može omogućiti sustavna globalna istraživanja raznih kolebanja razine mora koji se javljaju na kratkim periodima, kao što su seši, meteorološki tsunamiji, infra-težinski i obalni valovi (npr. Yankovsky, 2009; Pellikka i sur., 2014; Pattiaratchi i Wijeratne, 2015; Dodet i sur., 2019), a za što satna mjerenja nisu dostatna.

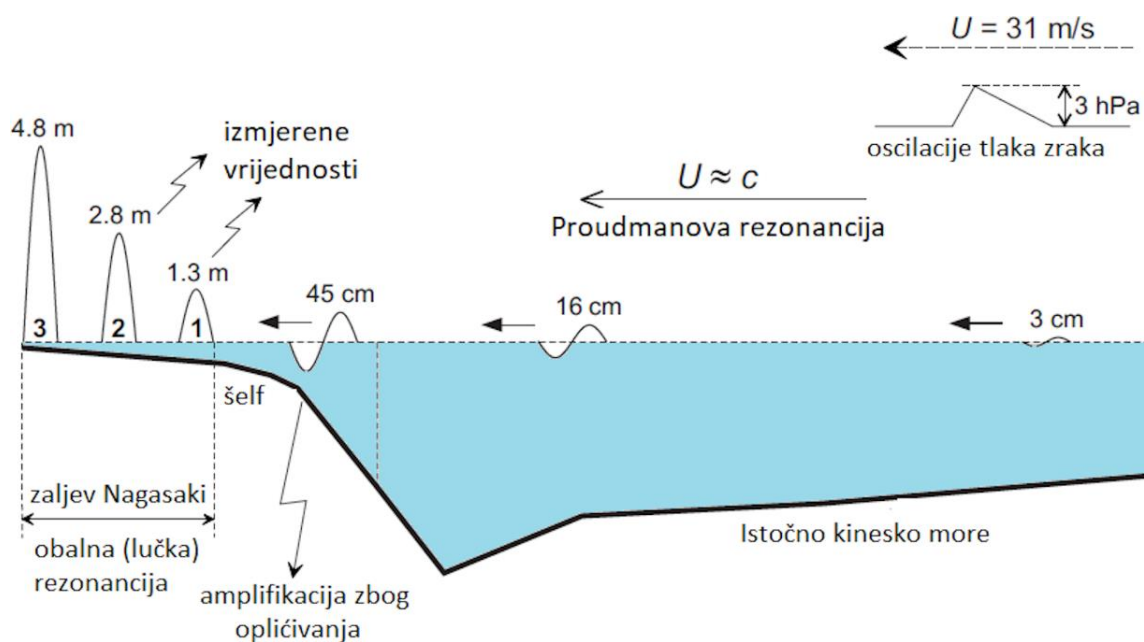
## 1.2. Meteorološki tsunamiji

Meteorološki tsunamiji su oscilacije razine mora koje se javljaju na periodima tsunamija te mogu dosegnuti razornu snagu na specifičnim lokacijama u svijetu (Monserrat i sur., 2006). Ovakvi valovi nisu uzrokovani seizmičkom aktivnosti, već naglim i izraženim atmosferskim poremećajima koji propagiraju nad morem. Meteorološke tsunamije generiraju intenzivne kratkoperiodične oscilacije tlaka zraka s promjenama od najčešće 2-5 hPa u manje od 10 minuta (npr. Hibiya i Kajiura, 1982; Monserrat i sur., 2006) ili snažni pulsirajući vjetrovi s brzinama većim od 20 m/s (npr. Platzman, 1965; Šepić i Rabinovich, 2014). Za razliku od seizmičkih tsunamija koji mogu zahvatiti preoceanska područja te ugroziti više kontinenata istovremeno, meteorološki tsunamiji su uglavnom lokalne pojave i javljaju se na manjim prostornim skalama, do nekoliko stotina kilometara.

Termin „meteorološki tsunamiji“ su prvi uveli Nomitsu (1935) i Defant (1961), definirajući ih kao oscilacije razine mora izazvane meteorološkim poremećajima. No, meteorološki tsunamiji su privukli interes znanstvene zajednice u posljednjim desetljećima i pri njihovom istraživanju pažnja je usmjerena na atmosferske uvjete koji su odgovorni za njihovo

generiranje, procese kojima se energija iz atmosfere prenosi u ocean te priobalnu topografiju i batimetriju koje pospješuju njihovo amplifikiranje (Vilibić i sur., 2016).

Generiranje meteoroloških tsunamija je kompleksan proces tijekom kojeg se javlja više vrsta rezonancija. Mehanizam nastanka meteoroloških tsunamija uključuje: (i) propagirajući poremećaj u atmosferi koji putuje prema području javljanja meteorološkog tsunamija, (ii) rezonantni prijenos energije iz atmosfere u more, (iii) jačanje valova u priobalnom području, te (iv) rezonantno pojačavanje valova u uvalama ili lukama (slika 2).



**Slika 2.** Ilustracija mehanizma generiranja destruktivnog meteorološkog tsunamija u zaljevu Nagasaki (Japan) 31. ožujka 1979. godine. Početna promjena tlaka zraka iznosila je oko 3 hPa. Visina valova otvorenog mora je zbog Proudmanove rezonancije narasla s 3 cm na 16 cm, zatim zbog oplićavanja šelfa na 45 cm te naposljetku zbog obalne rezonancije na 478 cm (prilagođeno iz Monserrat i sur., 2006).

Oscilacije tlaka zraka obično iznose do 5 hPa u 10 minuta, što izaziva inicijalne oscilacije razine mora (inverzni barometarski efekt) od svega nekoliko centimetara ( $1 \text{ cm}/1 \text{ hPa}$ ). Kada se zadovolje određeni uvjeti, dolazi do rezonantnog prijenosa energije iz atmosfere u more, a rezonancija može biti različitog tipa. Proudmanova rezonancija (Proudman, 1929) se javlja kada se ujednače brzina atmosferskog poremećaja i brzina težinskih valova u plitkom moru. Široki šelfovi nad kojima je moguće dugotrajno podudaranje ovih brzina imaju predispozicije za snažno pojačavanje odziva razine mora putem Proudmanove rezonancije. Drugi tip rezonancije je Greenspanova rezonancija (Greenspan, 1956) do koje dolazi kada je brzina



atmosferskog poremećaja jednaka brzini obalnih topografskih valova koji propagiraju uz rub šelfa (engl. *edge waves*). Dokumentirano je da rezonancija može povećati oscilacije razine mora i preko pet puta u odnosu na inicijalne oscilacije (Vilibić i sur., 2008a). Približavanjem obali, zbog smanjenja dubine, brzina valova otvorenog mora se smanjuje, a amplituda im raste. Ako je period nadolazećih valova sličan periodu vlastitih oscilacija zaljeva (seša), dolazi do javljanja obalne (lučke) rezonancije (Rabinovich, 2009) koja dodatno uvećava valove. Luke i zaljevi koji imaju uske otvore, imaju veću mogućnost za amplifikaciju valova (tzv. *lučki paradoks*, Miles i Munk, 1961).

Ono što je ključno za nastanak meteoroloških tsunamija jest da se energija visokofrekventnih oscilacija tlaka zraka ne rasipa pri njihovom propagiranju. Naime, ovakve oscilacije tlaka zraka su većinom kratkog vijeka radi gubitka energije prilikom propagiranja, no oscilacije koje generiraju meteorološke tsunamije zbog mehanizma očuvanja energije mogu propagirati bez značajnog gubitka energije i do nekoliko sati (Orlić, 1980; Vilibić i sur., 2008a). Navedeni mehanizam očuvanja energije može biti različitog tipa: (i) zarobljavanje valova (engl. *wave-ducting*, Lindzen i Tung, 1976; Monserrat i Thorpe, 1996) ili (ii) udvajanje atmosferskog vala i konvektivnog oblaka (engl. *wave - CISK - Conditional Instability of Second Kind* – uvjetna nestabilnost drugog reda, Powers i Reed, 1993; Zhang i sur., 2003). Kod zarobljavanja valova, atmosferski težinski valovi propagiraju u dinamički stabilnom sloju atmosfere koji se nalazi između površine mora i nestabilnog sloja, te se time energija vala reflektira prema površini mora i zadržava u donjoj troposferi. Dakle, nužan uvjet ovog mehanizma jest stabilan sloj atmosfere smješten uz površinu, odnosno u donjoj troposferi, preklapljen nestabilnim slojem u srednjoj troposferi uz to karakteriziranim i snažnim vjetrovima, koji optimizira reflektiranje energije i omogućava propagiranje valova bez gubitka energije. Pri udvajanju atmosferskog vala i konvektivnog oblaka vertikalna gibanja u atmosferskom težinskom valu potiču uzdizanje vodene pare, koja se zatim hladi i ukapljuje te oslobađa energiju potrebnu za stvaranje i propagiranje atmosferskog težinskog vala. Bez ovakvih mehanizama težinski val bi tijekom propagiranja izgubio svoju energiju vrlo brzo (Lindzen i Tung, 1976). Pojedine studije koje proučavaju propagiranje mezoskalnih težinskih valova su potvrdile istodobno djelovanje oba mehanizma (Powers i Reed, 1993; Zhang i sur., 2003), dok je u nekim studijama jedan mehanizam dominantan (Koch i sur., 2001).

Intenzitet meteoroloških tsunamija ovisi o karakteristikama propagirajućih poremećaja tlaka zraka ili vjetra, njihovoj amplitudi, smjeru i brzini propagiranja, dugovječnosti i veličini. Ovi poremećaji mogu biti povezani s raznim atmosferskim procesima kao što su kvazi-linearni

konvektivni sustavi (engl. *squall line*, Churchill i sur., 1995; Kazeminezhad i sur., 2021), intenzivni ljetni atmosferski sustavi nad SAD-om (engl. *derecho*, Johns i Hirt, 1987; Šepić i Rabinovich, 2014), hladne fronte (de Jong i sur., 2003; Williams i sur., 2021a), uragani i tajfuni (Shi i sur., 2020; Heidarzadeh i Rabinovich, 2021) i drugi.

Meteorološki tsunamiji istražuju se na specifičnim područjima (uvalama, zaljevima) koji imaju pogodne uvjete za generiranje ekstremnih valova. Neki od najrazornijih meteoroloških tsunamija koji su prouzrokovali štete na brodovima i u lukama te ugrozili ljudske živote su: 1954. godine na obali jezera Michigan (visine 3 m, Ewing i sur., 1954), 1978. godine u Veloj Luci na otoku Korčuli (6 m, Vučetić i sur., 2009; Orlić i sur., 2010), 1979. godine u zaljevu Nagasaki (4.8 m, Hibiya i Kajiura, 1982), 1992. godine na Floridi (3 m, Churchill i sur., 1995), 2006. u uvali Ciutadella na Balearskom otočju (4 m, Jansà i sur., 2007), 2007. na otoku Istu (4 m, Šepić i sur., 2009a) i 2008. na obali američke savezne države Maine (4 m, Vilibić i sur., 2014). U ovim područjima oni se učestalo pojavljuju, pa su na Balearskom otočju u Španjolskoj poznatiji pod lokalnim imenom *rissaga*, u zaljevu Nagasaki (Japan) *abiki*, *marrobbio* na Siciliji, *milghuba* na Malti te *šćiga* ili *štiga* na hrvatskim otocima. Ostale lokacije na kojima se javljaju meteorološki tsunamiji uključuju Ujedinjeno Kraljevstvo (Haslett i sur., 2009), Novi Zeland (Goring, 2009), Žuto more (Wang i sur., 1987), Argentinu (Dragani i sur., 2002), Nizozemsku (de Jong i sur., 2003), Baltičko more (Pellikka i sur., 2014), Australiju (Pattiaratchi i Wijeratne, 2014) i druge.

Iako su meteorološki tsunamiji uglavnom lokalni fenomen, mogu se također javiti i u slijedu, kada atmosferski poremećaji imaju isti meteorološki izvor i pogađaju uvale udaljene i do 1000 km u kratkom razdoblju (Šepić i sur., 2015a). Slijed meteoroloških tsunamija je prvi put dokumentiran za događaja iz lipnja 2014. godine kada je serija valova pogodila obale nekoliko južnoeuropskih država. Val visine 1 m zabilježen je ponajprije u Ciutadelli, u noći 22./23. lipnja. Dva dana poslije, 25. lipnja, val je pogodio Mazara del Vallo na Siciliji te su istog i sljedećeg dana valovi meteoroloških tsunamija zabilježeni u nekoliko uvala na Jadranu, s najvećom visinom vala opaženoj u Veloj Luci, od oko 3 m. U istim danima zabilježeni su valovi i na obalama Grčke i Turske. Naposljetku, 27. lipnja valovi su pogodili plaže u Odesi smještenoj na sjeverozapadnom dijelu Crnog mora.

Nekoliko studija dokumentiralo je postojanje specifičnih sinoptičkih uvjeta tijekom meteoroloških tsunamija u Sredozemnom moru (Ramis i Jansà, 1983, Jansà i sur., 2007, Vilibić i Šepić, 2009, Šepić i sur., 2015b). Karakteristična sinoptička situacija nad pogođenim

područjem uključuje: (i) prodor toplog i suhog zraka afričkog porijekla u donjoj troposferi, (ii) snažnu mlaznu struju u srednjoj troposferi, (iii) nestabilnosti atmosferskih slojeva u srednjoj troposferi, (iv) pridneni minimum tlaka zraka, te (v) temperaturnu inverziju koja razdvaja površinski zrak od toplog zraka afričkog porijekla na većim visinama.

### 1.3. Visokofrekventne oscilacije razine mora atmosferskog porijekla

Osim destruktivnih i intenzivnih oscilacija kao što su meteorološki tsunamiji, u zapisima svjetskih mareografa su prisutne umjerene i slabije visokofrekventne oscilacije razine mora. S tehnološkim napretkom i sve većom količinom dostupnih podataka visine razine mora, započelo je sustavno istraživanje visokofrekventnog signala razine mora. Dosadašnja istraživanja uglavnom su se temeljila na studijama (engl. *case study*) koje su proučavale pojedine destruktivne događaje. U više studija provedena je sustavna analiza visokofrekventnih oscilacija na duljem razdoblju, no uglavnom na lokalnoj ili regionalnoj razini, primjerice u Sredozemnom moru (Šepić i sur., 2015b), na Velikim jezerima (Bechle i sur., 2016), na istočnoj obali SAD-a (Dusek i sur., 2019), u sjeverozapadnoj Europi (Williams i sur., 2021a), itd. Pojam oscilacija razine mora koje se javljaju na periodima tsunamija i nisu seizmičkog porijekla (NSLOTT, engl. *nonseismic sea-level oscillations at tsunami timescales*), koji generalizira istraživanje meteoroloških tsunamija na ukupni visokofrekventni signal atmosferskog porijekla, je uveden relativno nedavno, studijom Vilibić i Šepić (2017), te je navedena studija prva koja je na globalnoj razini proučavala karakteristike ovih oscilacija i njihove povezanosti sa sinoptičkim atmosferskim uvjetima. Analiza je pokazala da visokofrekventne oscilacije tvore znatan dio ukupne bilance razine mora, osobito tijekom ekstremnih epizoda, gdje doprinos raspona visokofrekventnih oscilacija rasponu ukupnih oscilacija može doseći i do 50 % u područjima slabog plimnog signala (kao što su Sredozemno i Karipsko more).

Nekoliko pitanja i dalje ostaje otvoreno: (i) U kojim svjetskim regijama se visokofrekventne oscilacije atmosferskog porijekla pojavljuju najčešće i s najjačim intenzitetom? (ii) Preferiraju li određena doba godine? (iii) Imaju li zajednička obilježja u nekim regijama ili diljem svijeta? (iv) Pojavljuju li se simultano na više lokacija diljem obala? Neke regionalne studije dale su različite odgovore na ova pitanja. Primjerice, Williams i sur. (2021a) tvrde da se većina meteoroloških tsunamija u sjeverozapadnoj Europi događa zimi, no u nekim drugim područjima dominantni su ljetni maksimumi (npr. u Jadranskom moru, Orlić, 2015; na Velikim jezerima, Bechle i sur., 2016). Treba napomenuti da je metodologija ovih

studija vrlo različita - dok se neki od njih temelje na izjavama očevidaca tijekom destruktivnih događaja, drugi analiziraju višegodišnja mareografska mjerenja. U ovoj disertaciji pokušava se odgovoriti na ova pitanja iz globalne perspektive.

#### 1.4. Fenomen *marrobbio*

Fenomen *marrobbio* ili *marrubbio*, što u prijevodu znači „divlje more“ (engl. *mad sea*), od davnih dana utječe na život ljudi uz jugozapadne obale Sicilije i talijanskog otoka Lampedusa (Colucci i Michelato, 1976). Ovaj fenomen opisan je prije gotovo dva stoljeća od strane admirala Smytha u njegovom Opisu resursa, stanovništva i hidrografije Sicilije (engl. *Memoir descriptive of the resources, inhabitants and hydrography of Sicily*, London, 1824, Honda i sur., 1908). *Marrobbio* je pojava naglih oscilacija razine mora koja se obično događa u proljeće i ljeto i primjetna je diljem obale Sicilije, osobito u određenim uvalama i lukama. Jedna od najčešće pogođenih lokacija je Mazara del Vallo, drevni ribarski grad smješten na rijeci Mazaro. Uz fenomen *marrobbio* javljaju se jake struje i val koji se giba uzvodno uz rijeku (engl. *bore*). Batimetrija rijeke igra važnu ulogu u generiranju i propagiranju tog vala (Šepić i sur., 2018a). Stalnih mjerenja visine razine mora na ovoj lokaciji nema, no kratkoročna mjerenja (do godine dana) su se ponekad provodila (Candela i sur., 1999).

Sličnost između *marrobbia* i fenomena koji se javlja na obali Malte, poznatog pod lokalnim imenom *milghuba* (Drago, 2009), je primijećena već u 19. stoljeću (Airy, 1878). Oba fenomena su generirana poremećajima atmosferskog tlaka, no ne pojavljuju se uvijek istovremeno. Razlog tome je što poremećaji koji generiraju meteorološke tsunamije ne moraju nužno propagirati iznad obje lokacije. Osim toga, brzina atmosferskog poremećaja koja je pogodna za generiranje *marrobbia* nije ista kao i za generiranje *milghube*, zbog različitosti lokalne batimetrije.

#### 1.5. Kratki opis disertacije

Temeljni cilj ovog doktorskog rada je istraživanje oscilacija razine mora koje se javljaju na frekvencijama tsunamija i atmosferskog su porijekla, proučavanje njihovih karakteristika kao što su ekstremnost, učestalost i doprinos ukupnim oscilacijama razine mora te analiziranje njihove povezanosti sa sinoptičkim atmosferskim poljima, sve u svrhu stvaranja globalne klimatologije ovih oscilacija. Prije analiza kreiran je skup minutnih podataka visine razine mora kontrolirane kvalitete s 331 mareografske postaje u svijetu, te su zatim ti podaci podvrgnuti raznim statističkim analizama. Hipoteze ovog istraživanja su da visokofrekventne

oscilacije razine mora na periodima manjim od nekoliko sati značajno doprinose ekstremima razine mora te da su korelirane sa specifičnim sinoptičkim poljima.

Opis korištenih podataka i metoda obrade podataka dan je u drugom poglavlju disertacije. U trećem poglavlju detaljno je opisana obrada podataka i procedure kontrole kvalitete korištene za razvoj skupa podataka MISELA, te izgled datoteka u krajnjem produktu i prostorna razdioba postaja uključenih u MISELA-u.

U četvrtom poglavlju analizirani su podaci iz skupa podatka MISELA, njihove varijance i rasponi visokofrekventnih oscilacija razine mora, sezonske i spektralne karakteristike kao i sinkronicitet između ekstremnih epizoda na obližnjim postajama.

Peto poglavlje kvantificira povezanost visokofrekventnih oscilacija razine mora s atmosferskim sinoptičkim uvjetima. Nakon utvrđivanja korelacija s pojedinim sinoptičkim varijablama, kreiran je indeks, na svakoj postaji zasebno, koji obuhvaća sinoptičke varijable relevantne za dinamiku visokofrekventnih oscilacija na određenoj postaji.

U šestom poglavlju analizirani su podaci s nekoliko talijanskih mareografskih postaja diljem jugozapadne obale Sicilije i otoka Lampeduse i Sardinije te nekoliko mikrobarografskih postaja u gradu Mazara del Vallo, iz razdoblja 2007. godine, kako bi se istražile prostorno-vremenske karakteristike meteoroloških tsunamija (fenomena *marrobbio*) u tom području. Izdvojene su epizode s valnim visinama preko 40 cm koje su definirane kao meteorološki tsunamiji (*marrobbio*), te su analizirana njihova spektralna svojstva i podudaranje izraženih oscilacija tlaka zraka i razine mora. Također, analizirane su sinoptičke varijable i radio-sondažna mjerenja za vrijeme izraženih epizoda.

Naposljetku, u sedmom poglavlju izneseni su zaključci koji su proizašli iz navedenih analiza.

## 2. PODACI I METODOLOGIJA

### 2.1. Podaci visine razine mora

Glavnina podataka visine razine mora korištenih u disertaciji preuzeta je s Portala mareografskih postaja Međuvladine oceanografske komisije, podatkovnog repozitorija koji sadrži nekontrolirane podatke visine razine mora prikupljene u stvarnom vremenu s preko 1000 mareografskih postaja diljem svijeta. Portal IOC SLSMF je započeo s radom 2006. godine, nakon katastrofalnog seizmičkog tsunamija 2004. godine u Indijskom oceanu koji je nastao kao posljedica podmorskog Sumatransko-Andamanskog potresa (Chlieh i sur., 2007). Tsunami je razorio obalna područja od Indonezije do Afrike te usmrtio oko 230 tisuća ljudi. Posljedično, razne svjetske agencije su se fokusirale na razvoj i unaprjeđenje svojih mareografskih mreža, a Međuvladina oceanografska komisija je usmjerila napore na razvoj regionalnih sustava upozorenja na seizmičke tsunamije (Amato, 2020). Portal IOC SLSMF je inicijalno razvijen u svrhu nadzora mjernih postaja u Africi, no, od tada, portal se kontinuirano unaprjeđuje i proširuje mareografsku mrežu.

Temeljna svrha portala IOC SLSMF je nadzor rada mareografskih postaja, odnosno informiranje korisnika o radu i funkcionalnosti pojedine postaje, što uključuje prikaz metapodataka i praćenje aktivnosti postaja, kao i kontaktiranje nadležnih službi u slučaju prestanka njihovog rada. Također, na portalu je moguće grafički prikazati podatke s izabrane postaje u određenom poludnevnom, dnevnom, tjednom ili mjesečnom intervalu tijekom kojeg je postaja bila aktivna (IOC, 2012). Iako znanstvena istraživanja nisu primarna svrha ovog portala, temeljem politike korištenja podataka Međuvladine oceanografske komisije, podatke je moguće i preuzeti te koristiti u znanstvene svrhe.

Podaci primljeni u stvarnom vremenu se koriste uglavnom u operativne svrhe te stoga ne prolaze gotovo nikakve procedure kontrole kvalitete, osim eventualno one procedure koje su ugrađene na samoj mareografskoj postaji. Štoviše, podaci na portalu IOC SLSMF objavljuju se direktno onakvi kakvi su primljeni od nadležnih službi ili institucija koje održavaju postaje, zbog čega je kvaliteta podataka ovisna isključivo o kvaliteti mjernih instrumenata, njihovom održavanju te procedurama kontrole u stvarnom vremenu. Iz tog razloga podaci s mnogih postaja nisu visoke kvalitete i sadrže lažne šiljke, skokove i pomake srednje razine mora, umjetne oscilacije i razne druge pogreške nastale zbog neispravnosti instrumenata. Stoga, bilo kakvo korištenje podataka s portala IOC SLSMF u istraživačke svrhe zahtjeva prethodno ispitivanje njihove kvalitete i obradu podataka, kako bi se podaci pravilno pripremili za analize

te se izbjegla njihova neispravna upotreba, a time i izvođenje krivih zaključaka (Aarup i sur., 2019).

Danas portal sadrži više od 1100 svjetskih postaja, od kojih neke nisu trenutno operativne. Aktivnih postaja je nešto više od 930. Više od 160 agencija, institucija i službi zaduženih za postavljanje i održavanje instrumenata za mjerenje visine razine mora dijele podatke preko portala u stvarnom vremenu ili uz manju odgodu, od nekoliko minuta do nekoliko sati. Svaka odgoda prijenosa podataka duža od 15 minuta istaknuta je na portalu. Za svaku postaju dostupni su podaci o referentnom kodu (kratica naziva postaje), lokaciji i državi postaje, podaci za kontakt s lokalnom agencijom koja održava postaju, geografski položaj postaje, tip instrumenta, vremenska razlučivost mjerenja i drugi. Razlučivost uzorkovanja i frekvencija prijenosa podataka variraju od postaje do postaje. Većina postaja ima minutnu razlučivost, dok neke još uvijek mjere s višeminutnom razlučivosti, a podaci se prenose uglavnom svakih nekoliko minuta do nekoliko desetaka minuta. Instrumenti kojima su postaje opremljene su većinom tlačni ili radarski mareografi, no mogu biti i uređaji koji rade na sistemu mjehurića (engl. *bubbler tide gauge*). Potonji instrumenti se uglavnom koriste na postajama Ujedinjenog Kraljevstva, dok su akustični senzori često korišteni na postajama SAD-a. Također, neke postaje imaju i više senzora, zbog podešavanja pojedinih instrumenata ili višestruke provjere kvalitete mjerenja.

Nadalje, osim postaja s portala IOC SLSMF, u istraživanju je korišteno i 13 postaja Finskog meteorološkog instituta (FMI, engl. *Finnish Meteorological Institute*) koje su smještene na obali Baltičkog mora. Jednominutna mjerenja visine razine mora s ovih postaja postoje od 2004. godine te nisu dostupna na portalu IOC SLSMF. Također, uključene su i četiri postaje Instituta za oceanografiju i ribarstvo (IOR) smještene na obali Jadranskog mora. Ove postaje, izuzev postaje u Splitu, dostupne su od listopada 2018. godine i na portalu IOC SLSMF.

U dijelu disertacije u kojem je proučavan fenomen *marrobbio* na Siciliji korišteni su podaci Instituta za proučavanje antropogenih utjecaja i održivosti u morskom okolišu Nacionalnog vijeća za istraživanja (tal. *Istituto per lo studio degli impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino, Consiglio Nazionale delle Ricerche* (IAS CNR)) s mareografske postaje Mazara del Vallo (MAZ) te podaci s četiri nacionalne talijanske mareografske postaje dostupni na portalu [www.mareografico.it](http://www.mareografico.it) Instituta za zaštitu i istraživanje okoliša (tal. *Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale* (ISPRA)): Cagliari (CGL), Lampedusa (LMP), Porto Empedocle (PEM) i Catania (CTN). Iako se u uvali Mazara del Vallo učestalo događaju

meteorološki tsunamiji (npr. Candela i sur., 1999; Šepić i sur., 2018a), visina razine mora se tamo ne mjeri kontinuirano. Tijekom eksperimenta 2007. godine (Marrobbio Project Report, 2007) na ovom području istovremeno su mjereni tlak zraka pri razini mora (u daljnjem tekstu tlak zraka) i visina razine mora. Mareografska postaja postavljena je na sjevernom dijelu luke i opremljena je Druck senzorom modela PTX1830, s preciznošću mjerenja visine razine mora od  $\pm 0.1$  cm i vremenskom razlučivosti mjerenja od 1 minute. Postaja je bila aktivna od 1. travnja do 31. listopada 2007. godine, a do 22. svibnja podaci su usrednjeni na satnim intervalima. Nakon 22. svibnja visina razine mora je mjerena s minutnom razlučivosti. Mareografska postaja na otoku Lampedusi bila je opremljena sondom SIAP + MICROS P230 SMP, dok su ostale mareografske postaje imale TLR radar. Postaje su mjerile visinu razine mora s vremenskom razlučivosti od 10 minuta, a preciznost mjerenja na ovim postajama iznosila je također  $\pm 0.1$  cm.

## 2.2. Određivanje svojstava visokofrekventnih oscilacija razine mora

Na izvornim podacima provedena je detaljna kontrola kvalitete kao što je opisano u poglavlju 3.1. te su dobiveni pouzdani vremenski nizovi s 331 postaje s vremenskom razlučivosti od 1 minute. Vremenski nizovi visine razine mora podvrgnuti su raznim metodama obrade i analize podataka, između kojih su (i) filtriranje visokopropusnim Kaiser-Bessel filtrom radi izdvajanja visokofrekventnih oscilacija, (ii) računanje ovojnice (engl. *envelope*) signala za procjenu raspona oscilacija, te (iii) spektralna analiza (Thomson i Emery, 2014). Raspon oscilacija procijenjen je Euklidskom udaljenosti između gornje i donje ovojnice signala. Ovojnice su izgladene linije unutar kojih je sadržan izvorni signal i koje su određene prilagodbom krivulje (engl. *spline fitting*) lokalnim maksimumima, odnosno, minimumima signala. U ovom istraživanju su izračunate korištenjem funkcije *envelope* u programskom jeziku Matlab (Cook i sur., 2015). Metoda ovojnice ima primjenu i u analizi seizmičkih mjerenja (Farnbach, 1975). Spektralna analiza je metoda koja se često koristi pri analizi vremenskih nizova visine razine mora i određuje energiju signala na pojedinim frekvencijama. Spektri su izračunati koristeći Welchovu metodu, u kojoj se niz razlaže na manje preklapajuće dijelove te se za svaki dio računa spektar snage koji se zatim usrednjava po preklapajućim dijelovima.



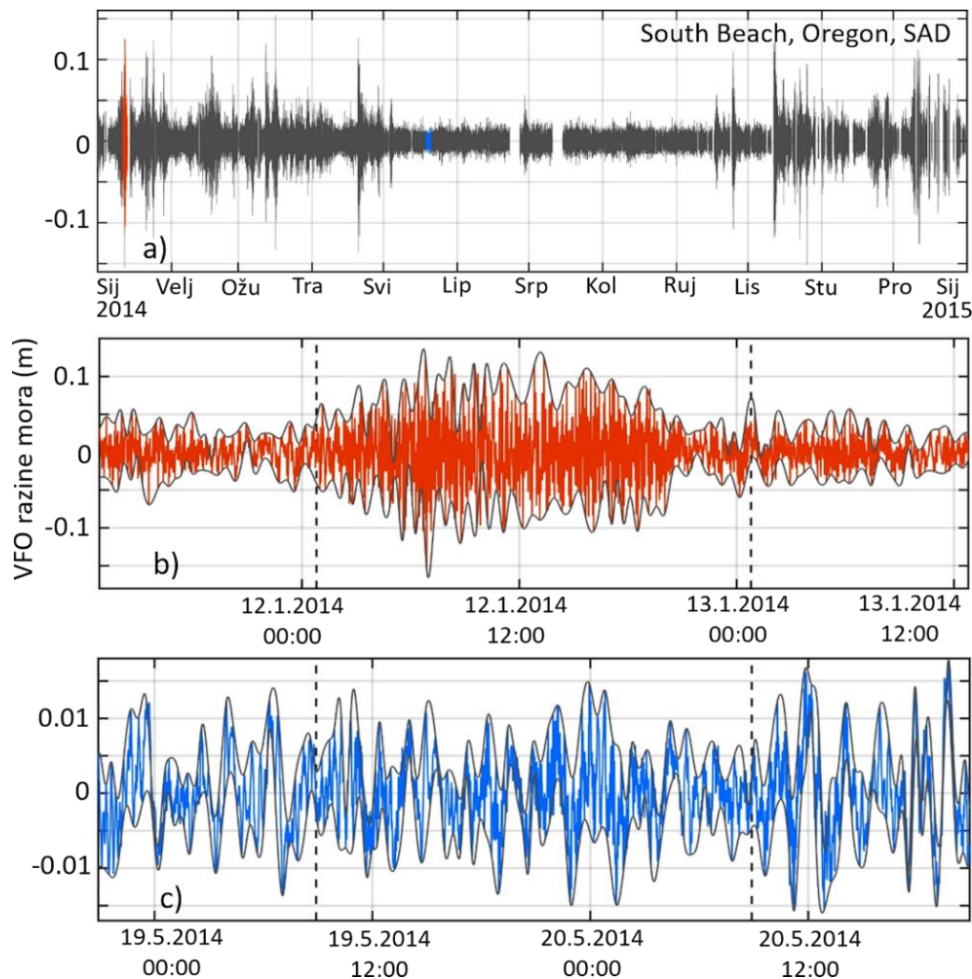
Kako bi se procijenile umjerene i ekstremne oscilacije razine mora, izračunati su medijan i 99.99-i percentil raspona oscilacija (u nastavku raspon umjerenih i ekstremnih oscilacija), a za usporedbu umjerenih i ekstremnih oscilacija izračunata je Z-vrijednost (engl. *Z-score*) po sljedećoj formuli:

$$Z = \frac{p - med}{mad},$$

gdje je  $p$  99.99-i percentil raspona,  $med$  je medijan raspona i  $mad$  je medijan apsolutne devijacije raspona (engl. *median absolute deviation*) u odnosu na medijan raspona  $med$ . Ovakva definicija Z-vrijednosti je mjera ekstremnosti oscilacija i robusnija je od standardne definicije ove statističke veličine temeljene na aritmetičkoj sredini i standardnoj devijaciji, koja je primjenjiva samo za normalnu distribuciju (Leys i sur., 2013).

### 2.3. Izdvajanje i analiza ekstremnih epizoda kolebanja razine mora

Kako bi se utvrdile karakteristike ekstremnih visokofrekventnih oscilacija razine mora, deset ekstremnih (snažnih, izraženih) i deset pozadinskih (mirnih, slabih) epizoda je izdvojeno na svakoj postaji. Ove epizode su određene računanjem varijance 24-h podatkovnih prozora koji ne sadrže više od 10 % praznina u podacima. Vremenski intervali koji su ostvarili deset najvećih (deset najmanjih) vrijednosti varijance su proglašeni ekstremnim (pozadinskim) epizodama, pri čemu je minimalna vremenska udaljenost između epizoda 24 h. Slika 3 prikazuje mjerenja visokofrekventnih oscilacija razine mora s postaje South Beach, Oregon, SAD iz 2014. godine s istaknutom jednom ekstremnom i jednom pozadinskom epizodom te ovojnicama uz pomoć kojih su izračunati rasponi oscilacija.



**Slika 3.** Vremenski niz visokofrekventnih oscilacija (VFO) razine mora izmjerenih na postaji South Beach, Oregon, SAD tijekom a) 2014. godine, b) ekstremne epizode (crveno) i c) pozadinske epizode (plavo), s gornjom i donjom ovojnicom (sivo). Crne isprekidane linije označavaju početak i kraj 24-h ekstremne i pozadinske epizode koje su korištene u analizama.

Ovim epizodama je potom procijenjena spektralna energija, pri čemu su 24 postaje izbačene iz analize zbog manjka podatkovnih prozora koji sadrže najviše 10 % praznina u podacima ili zbog različitih problema unutar spektra, kao što je pogreška prepoznavanja (engl. *aliasing*). Dakle, ukupno 307 vremenskih nizova s postaja korišteno je u daljnjim analizama. Spektar je procijenjen za svaku od ekstremnih i pozadinskih epizoda te je izračunat i omjer između spektra pojedinih ekstremnih epizoda i medijana spektra pozadinskih epizoda. Na taj način je utvrđena amplifikacija energije spektra tijekom izraženih epizoda. Nadalje, procijenjeno je nekoliko dodatnih karakteristika spektra: (i) integral spektra, koji predstavlja ukupnu snagu po svim frekvencijama, te (ii) nagib spektralne krivulje u log-log prikazu, kako bi se kvantificirale promjene snage na frekvencijskoj domeni od interesa. Nadalje, izdvojeni su šiljci (engl. *peak*) u spektru koristeći funkciju *findpeaks* u programskom jeziku Matlab koji su

barem deset puta veći od svojih baznih vrijednosti. Spektri su zatim klasificirani u šest kategorija: padajući, konstantni i rastući, s barem jednim šiljkom ili nijednim šiljkom unutar spektra. Pri tome se spektar smatra konstantnim ako ima nagib između  $-0.3$  i  $0.3$ , što predstavlja uski interval oko 0 odabran prema distribuciji spektralnih nagiba, rezultirajući s oko 20 % konstantnih spektara. Spektar je rastući ako nagib premašuje  $0.3$ , a padajući ako ima nagib manji od  $-0.3$ .

Kako bi se utvrdilo pojavljuju li se ekstremne epizode sinkronizirano na obližnjim postajama, kvantificirano je preklapanje izdvojenih izraženih epizoda. Indeks sinkroniciteta je definiran na postaji  $S$  kao omjer sljedećih varijabli: (i) broj slučajeva u kojima se ekstremna epizoda na postaji  $S$  preklapa s ekstremnom epizodom na bilo kojoj od obližnjih postaja unutar radijusa  $R$  i vremenskog intervala  $[-48 \text{ h}, 48 \text{ h}]$  oko izabranog događaja, te (ii) ukupan broj mogućih preklapanja ekstremnih epizoda na svim postajama unutar radijusa  $R$ . Radijus  $R$  je definiran za tri različite vrijednosti od 250, 500 i 1000 km. Indeks sinkroniciteta iznosi 0 na određenoj postaji ako se nijedan ekstremni događaj s postaje ne preklapa niti s jednim ekstremnim događajem na nijednoj obližnjoj postaji, te je jednak 1 ako su se svi ekstremni događaji pojavili na svim obližnjim postajama u intervalu od  $[-48 \text{ h}, 48 \text{ h}]$  oko događaja. Nadalje, vremenski interval između preklapajućih ekstremnih epizoda, normaliziran pomoću udaljenosti između postaja, procijenjen je i usrednjen na postaji  $S$ .

#### 2.4. Sinoptičke varijable

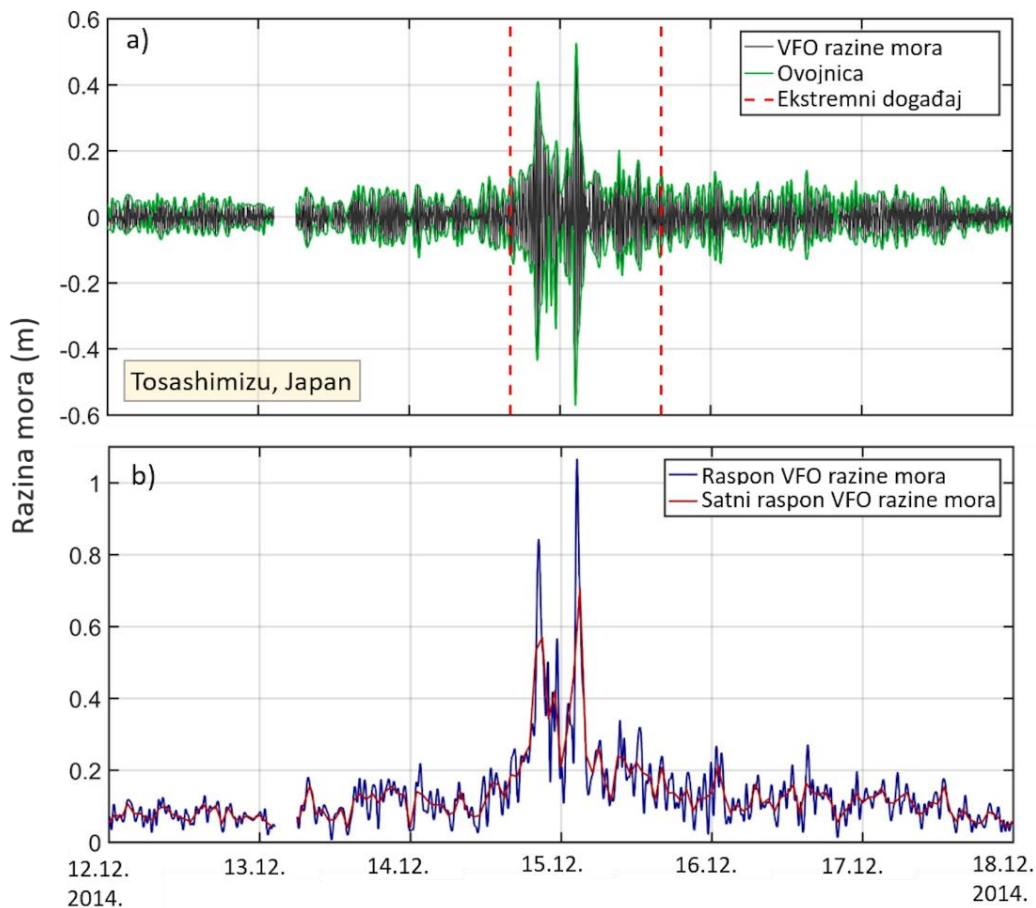
Za određivanje karakteristične sinoptičke situacije za vrijeme visokofrekventnih oscilacija razine mora korišteni su atmosferski podaci reanalize ERA5 (Hersbach i sur., 2020, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF, engl. *European Centre for Middle-range Weather Forecast*). Reanaliza ERA5 ima globalnu pokrivenost, prostornu razlučivost od približno 30 km, vremensku razlučivost od 1 h i razdvaja atmosferu na 137 razina, od površine do visine od oko 80 km. Podaci su trenutno dostupni za razdoblje od 1979. godine do danas, kao i preliminarna verzija podataka za razdoblje od 1950. do 1978. godine. Varijable koje su korištene u analizama su: brzina vjetera, relativna vlažnost, geopotencijal, temperatura i tlak zraka pri razini mora. Ove varijable su se pokazale relevantnima zbog toga što opisuju karakterističnu sinoptičku situaciju koja se pojavljuje tijekom meteoroloških tsunamija (Šepić i sur., 2015b, Šepić i sur., 2016a).

Atmosferski podaci reanalize ERA5 su preuzeti za razdoblje tijekom kojeg su mareografske postaje bile aktivne. Analizirani su: (1) vertikalni profili brzine vjetra, temperature i relativne vlažnosti na razinama od površine mora do visine od 400 hPa u točki mreže koja je najbliža odgovarajućoj mareografskoj postaji, te (2) horizontalne plohe tlaka zraka, temperature na visini od 850 hPa i geopotencijala na visini od 550 hPa u pravokutnom području  $[-10^{\circ}, 10^{\circ}] \times [-10^{\circ}, 10^{\circ}]$  geografske širine i duljine sa središtem u točki koja je najbliža mareografskoj postaji (tablica 1).

**Tablica 1.** Popis sinoptičkih varijabli ERA5 korištenih u analizama i njihove karakteristike.

Vertikalni profil			Horizontalno polje		
Sinoptička varijabla	Visina	Vrijednost/gradijent	Sinoptička varijabla	Visina	Vrijednost/gradijent
<i>Brzina vjetra</i>	Srednja troposfera (400-700 hPa)	Vrijednost	<i>Geopotencijal</i>	550 hPa	Horizontalni gradijent (korak 0.25°)
	Površina	Vrijednost	<i>Tlak zraka pri razini mora</i>	Razina mora	Horizontalni gradijent (korak 0.25°)
<i>Relativna vlažnost</i>	Srednja troposfera (400-700 hPa)	Vrijednost	<i>Temperatura</i>	850 hPa	Horizontalni gradijent (korak 0.25°)
<i>Temperatura</i>	Donja troposfera (800-950 hPa)	Vertikalni gradijent (korak 50 hPa)			

Kako atmosferski podaci reanalize ERA5 imaju satnu vremensku razlučivost, rasponi visokofrekventnih oscilacija razine mora usrednjeni su na satnoj skali kako bi se kvantificirala povezanost između atmosferskih uvjeta i visokofrekventnih oscilacija razine mora (slika 4). Podaci visine razine mora usrednjeni su na vremenskim intervalima  $[-29, 30]$  min oko svakog punog sata, pri čemu su razmatrani samo prozori koji nemaju više od 50 % praznina u podacima.



**Slika 4.** a) Vremenski niz visokofrekventnih oscilacija (VFO) razine mora izmjerenih na postaji Tosashimizu (Japan) u razdoblju 12. – 18. prosinca 2014. godine s donjom i gornjom ovojnicom i b) rasponi visokofrekventnih oscilacija razine mora i satni srednjaci raspona tijekom istog razdoblja.

Izračunate su korelacije između vremenskih nizova sinoptičkih varijabli i satnih raspona visokofrekventnih oscilacija kako bi se utvrdile relevantne sinoptičke varijable i njihove optimalne kombinacije korištene u konstrukciji sinoptičkog indeksa. Za svaku varijablu navedenu pod (1) (tablica 1, lijevo), razmatrane su vrijednosti na visinama u srednjoj (400-700 hPa) i donjoj (800-950 hPa) troposferi (s korakom 25-50 hPa) iznad mareografske postaje, kao i njihovi vertikalni gradijenti na različitim visinama (tj. razlike između vrijednosti varijable na većoj i manjoj visini). Za varijable navedene pod (2) (tablica 1, desno), izračunati su horizontalni gradijenti vrijednosti u točki postaje i ostalim točkama oko postaje (tj. razlike između vrijednosti varijable u točki najbližoj mareografskoj postaji i svakoj drugoj točki unutar pravokutnog područja oko postaje) s korakom od  $0.25^\circ$ . Na svakoj od postaja za varijable iz (1) određena je visina na kojoj su vrijednosti varijable odnosno vertikalni gradijenti najjače korelirani s rasponima visokofrekventnih oscilacija, te je za varijable iz (2) određena točka

unutar pravokutnog područja za koju je gradijent vrijednosti u točki postaje i vrijednosti u toj točki najjače koreliran s rasponima visokofrekventnih oscilacija razine mora. Konačno, varijable na odabranim visinama i u odabranim točkama zadržane su u daljnjim analizama i pri konstrukciji sinoptičkog indeksa.

## 2.5. Konstrukcija sinoptičkog indeksa

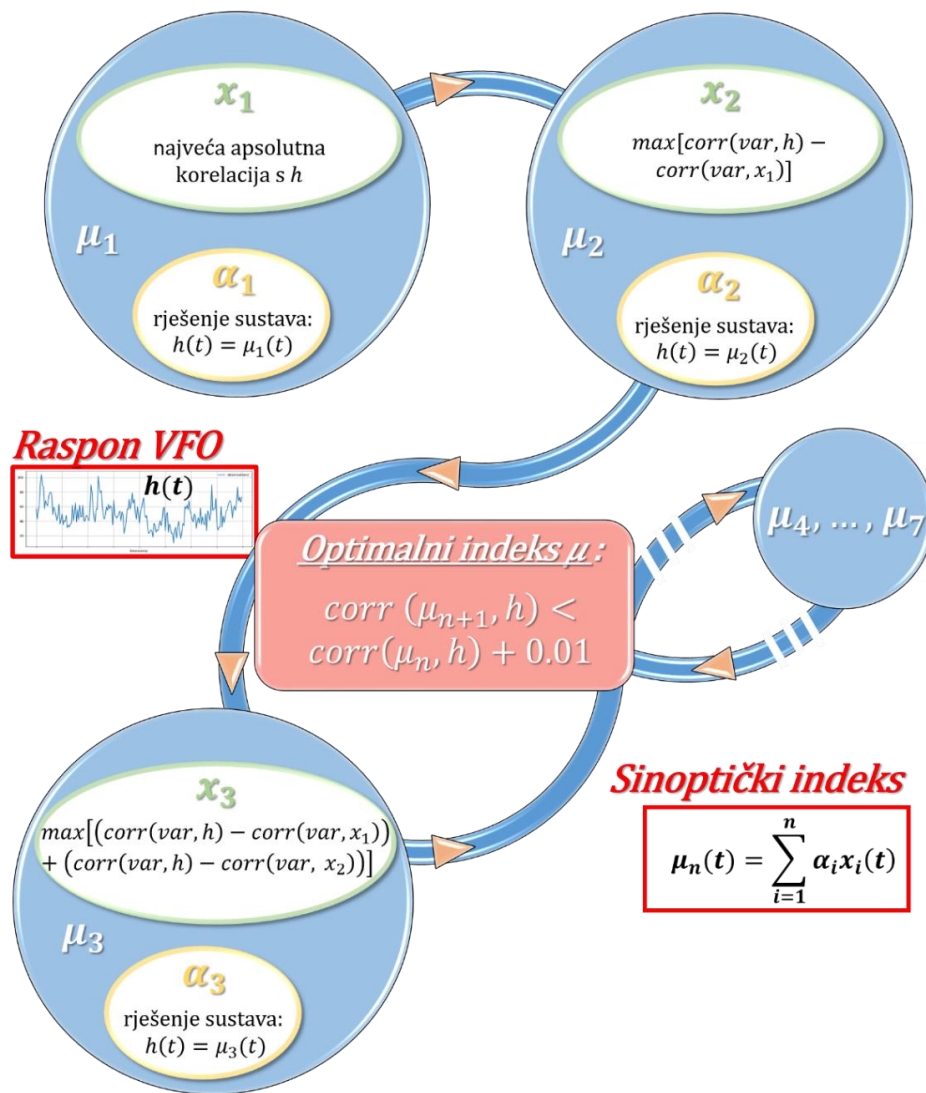
Ovdje se slijedi pristup iz Šepić i sur. (2016a) uz određene razlike opisane u nastavku i vezane za odabir sinoptičkih varijabli za indeks. Sinoptički indeks je definiran za svaku postaju zasebno, kao linearna kombinacija atmosferskih sinoptičkih varijabli iz tablice 1 na visinama vertikalnih profila odnosno u točkama horizontalnih ploha za koje su postignute najviše korelacije s rasponima visokofrekventnih oscilacija razine mora na toj postaji, sljedećom formulom:

$$\mu_n(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i(t),$$

gdje je  $n \in [1,7]$  broj sinoptičkih varijabli korištenih u konstrukciji indeksa  $\mu_n$ ,  $x_i$  je sinoptička varijabla,  $\alpha_i$  je odgovarajući koeficijent i  $t$  je vrijeme. Za konstrukciju indeksa  $\mu_1$  (tj. za  $n = 1$ ), varijabla koja je poprimila najveću apsolutnu korelaciju s rasponom visokofrekventnih oscilacija razine mora je izabrana za  $x_1$ . Varijabla je izabrana zasebno za svaku postaju. Koeficijent  $\alpha_1$  je dobiven kao rješenje sustava jednadžbi  $h(t) = \alpha_1 x_1(t) + \varepsilon_1$  koristeći metodu najmanjih kvadrata (engl. *Least-squares method*), gdje je  $h$  niz satnih vrijednosti raspona oscilacija. Nadalje, za konstrukciju indeksa  $\mu_2$ , varijabla  $x_1$  je preuzeta iz  $\mu_1$ , a varijabla  $x_2$  je izabrana na sljedeći način. Za svaku od preostalih sinoptičkih varijabli izračunata je korelacija između odabrane varijable i raspona visokofrekventnih oscilacija umanjena za korelaciju između te varijable i varijable  $x_1$ . Varijabla koja je ostvarila najveću vrijednost te razlike je izabrana za  $x_2$ , ponovno za svaku postaju zasebno. Koeficijent  $\alpha_2$  je dobiven kao rješenje sustava  $h(t) = \alpha_1 x_1(t) + \alpha_2 x_2(t) + \varepsilon_2$ . Analogno, indeks  $\mu_3$  je kreiran koristeći iste varijable  $x_1$  i  $x_2$  kao u  $\mu_2$ , a birajući za  $x_3$  varijablu koja ima najveću sumu korelacije s nizom raspona visokofrekventnih oscilacija umanjenu za korelaciju s varijablom  $x_1$ , odnosno  $x_2$ . Slijedeći opisanu proceduru, kreirani su indeksi  $\mu_4$  do  $\mu_7$ .

Za svaku postaju izabran je optimalni indeks  $\mu$  koji je nazvan sinoptički indeks. Naime,  $\mu_n$  se smatra optimalnim indeksom ako korelacija između  $\mu_{n+1}$  i  $h$  nije za barem 0.01 veća od korelacije između  $\mu_n$  i  $h$ , tj. ako dodavanje nove varijable u indeks ne povećava značajno

korelaciju između indeksa i raspona visokofrekventnih oscilacija. Konačno, svaka postaja može imati između jedne i sedam sinoptičkih varijabli u sinoptičkom indeksu, izabranih iz tablice 1 i uz koeficijente određene opisanom procedurom. Konstrukcija sinoptičkog indeksa prikazana je dijagramom na slici 5.



**Slika 5.** Dijagram konstrukcije sinoptičkog indeksa. Kratica *corr* označava korelaciju.

## 2.6. Podaci tlaka zraka

Pri istraživanju fenomena *marrobbio* na Siciliji korišteni su podaci s mikrobarografa instituta IAS CNR koji su, kao i mareografska postaja u Mazari del Vallo, bili postavljeni za svrhe eksperimenta 2007. godine. Četiri mikrobarografa postavljena su istočno od grada Mazara del Vallo i opremljena su sensorima tlaka zraka SETRA Model 278, s preciznošću mjerenja od  $\pm 0.3$  hPa i vremenskom razlučivosti mjerenja od 1 s. Četiri postaje (MB1-MB4) instalirane su 1. travnja od kojih su MB1 i MB2 bile aktivne do 31. listopada, MB3 do 4. rujna,

te MB4 do 27. listopada 2007. godine. Postaje MB1 i MB3 međusobno su udaljene 34.2 km, MB1 i MB2 11.1. km te MB1 i MB4 19.5 km. U analizama u poglavlju 6 korišteni su minuti podaci tlaka zraka. Nizovi tlaka zraka od iznimne su važnosti pri proučavanju visokofrekventnih oscilacija razine mora, obzirom da su upravo nagle promjene tlaka zraka inicijalni pokretač oscilacija na moru, koje se potom uvećavaju rezonantnim i drugim procesima te uzrokuju meteorološke tsunamije.

## 2.7. Određivanje brzine atmosferskih poremećaja

Brzina i smjer gibanja atmosferskog poremećaja pri istraživanju fenomena *marrobbio* određeni su iz vremenskih nizova tlaka zraka izmjerenih na četiri mikrobarografske postaje, MB1, MB2, MB3 i MB4 u gradu Mazara del Vallo. Pri tome je korištena triangulacijska metoda (Vilibić i sur., 2008b) koja se primjenjuje na tri meteorološke postaje (ovdje označene s brojevima 1, 2 i 3) postavljene u obliku trokuta, uz pretpostavku da poremećaj propagira konstantnom brzinom i smjerom. Tada su brzina  $U$  i smjer gibanja  $\varphi$  (definiran kao kut otklonjen od sjevera u smjeru kazaljke na satu) definirani kao:

$$\operatorname{tg} \varphi = a = \frac{t_3 y_2 - t_2 y_3}{t_3 x_2 - t_2 x_3},$$

$$U = \frac{1}{t_2} \frac{y_2 - a x_2}{\sqrt{1 + a^2}} = \frac{1}{t_3} \frac{y_2 - a x_2}{\sqrt{1 + a^2}},$$

gdje su  $t_2$  i  $t_3$  vremenski intervali između pojava poremećaja na postaji 2, odnosno postaji 3, te postaji 1. Varijable  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $y_2$  i  $y_3$  su udaljenosti u smjeru zapad-istok ( $x$ ) i jug-sjever ( $y$ ) između postaje 2, odnosno postaje 3, te postaje 1. Vremenski interval između pojava poremećaja na postajama je određen kao interval za kojeg je postignuta maksimalna korelacija u intervalu [-60 min, 60 min] oko vrhunca poremećaja.



## 2.8. Visinska mjerenja

Za analizu vertikalnih profila atmosfere tijekom izraženih epizoda na Siciliji korištena su radio-sondažna mjerenja s meteorološke postaje Trapani, smještene 40 km sjeverno od grada Mazara del Vallo. Vertikalni profili temperature zraka, točke rosišta, brzine vjetra i Richardsonovog broja preuzeti su s web-stranice Sveučilišta u Wyomingu (<https://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Richardsonov broj predstavlja mjeru stabilnosti određenog atmosferskog sloja te je definiran kao:

$$R_i = \frac{N^2}{(du/dz)^2},$$

gdje je  $N$  Brunt-Väisälä frekvencija [ $s^{-2}$ ],  $u$  brzina vjetra [m/s], a  $z$  visina [m]. Brunt-Väisälä frekvencija se računa prema Durran i Klemp (1982) koristeći izraze za suhi (vlažni) zrak na nivoima gdje je relativna vlažnost iznad (ispod) 70 %. U ovom istraživanju, ako je vrijednost Richardsonovog broja manja od 0.5, atmosferski sloj se smatra dinamički nestabilnim.

### 3. KREIRANJE SKUPA MINUTNIH PODATAKA VISINE RAZINE MORA

Do prije jednog desetljeća proučavanje ekstremnih visina razine mora se uglavnom temeljilo na satnim podacima, što je ograničavalo istraživanja na procese perioda duljih od nekoliko sati. No, procesi manjih perioda, od nekoliko minuta do nekoliko sati, kao što su primjerice seši, meteorološki tsunamiji i infra-težinski valovi, mogu čak dominirati u određenim područjima svijeta. Stoga je njihovo istraživanje od velike važnosti za razumijevanje visokofrekventnih oscilacija, ali i ukupnih oscilacija razine mora, naročito onih koje dovode do ekstremnih vrijednosti i poplavlivanja obalnih područja. Slijedom toga, u sklopu ovog doktorskog istraživanja, razvijen je globalni skup 1-minutnih podataka visine razine mora, pod nazivom MISELA, koji obuhvaća zapise atmosferski uzrokovanih oscilacija razine mora na periodima seizmičkih tsunamija ( $T < 2$  h) s 331 mareografske postaje u svijetu (Zemunik i sur., 2021a, b).

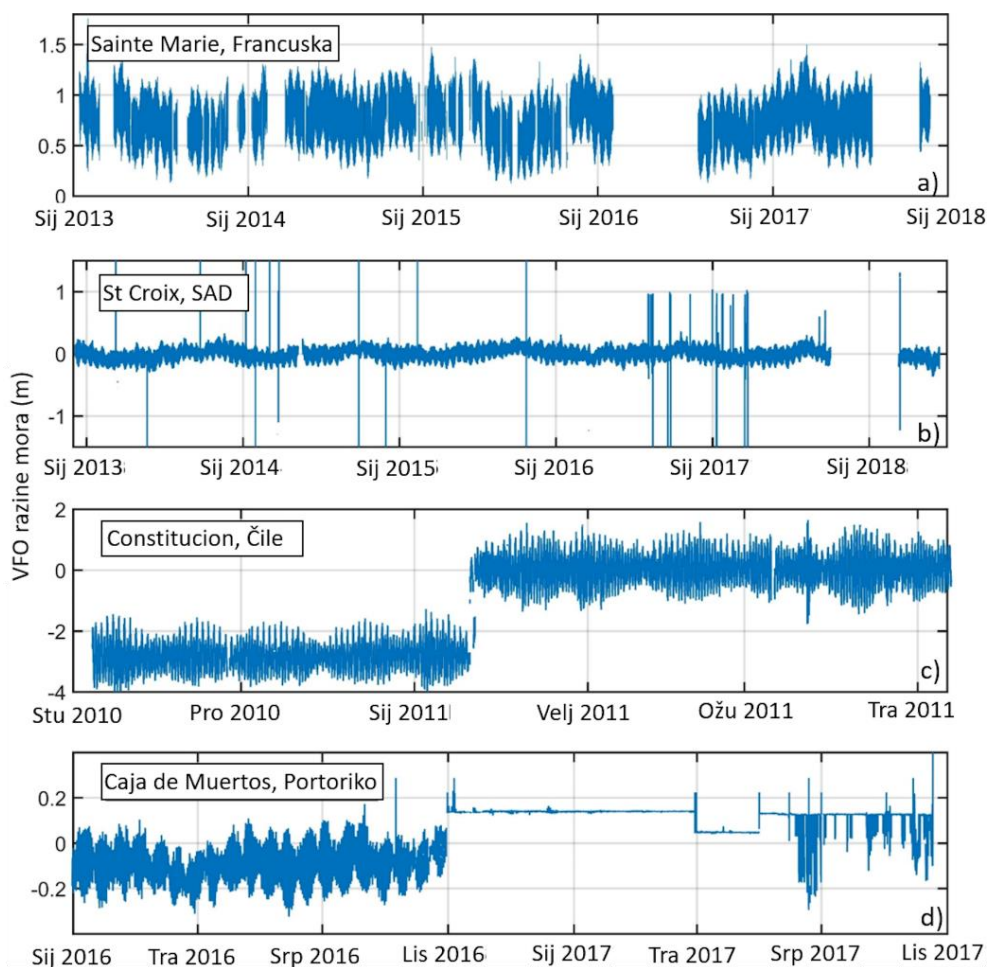
#### 3.1. Kontrola kvalitete podataka

Prvi korak u razvoju skupa podataka MISELA je bio izrada i primjena procedura koje čitaju i pohranjuju podatke s portala IOC SLSMF, od početka mjerenja na pojedinoj postaji (najranije lipanj 2006. godine, kada je portal započeo s radom) do lipnja 2018. godine. Ovim postajama pridružene su i postaje Finskog meteorološkog instituta koje imaju vrlo duge nizove, s početkom već u 2004. godini, te postaje Instituta za oceanografiju i ribarstvo čiji su nizovi nešto kasnije pridruženi MISELA-i pa završavaju 2019. godine.

Sljedeći korak je bio izdvajanje postaja s minutnom razlučivosti mjerenja čiji vremenski nizovi imaju duljinu od barem dvije godine i manje od 30 % praznina u podacima. Ovi kriteriji su odabrani obzirom da je MISELA prvenstveno namijenjena za istraživanja i statističke analize visokofrekventnih procesa, za koje je potrebno imati značajnu duljinu neprekinutih nizova. Naime, podvrgavanje kratkih ili isprekidanih nizova spektralnim i sličnim analizama korištenim u ovoj disertaciji može dati nepouzdana i neprecizne rezultate. Za postaje koje imaju mjerenja s više senzora, odabran je onaj senzor čiji niz ima najveću duljinu ili najmanji postotak praznina u podacima. Postaje s nizovima vrlo niske kvalitete uočene vizualnim pregledom isključene su iz MISELA-e. U nizove niske kvalitete ovdje se primjerice ubrajaju nizovi koji sadrže šiljke raspoređene kroz cijeli niz sa satnim ili višesatnim ponavljanjem, zatim očiti pogrešni zapisi oscilacija nastali zbog neispravnosti instrumenata i slično. Ukupno 314 postaja s portala IOC SLSMF udovoljilo je navedenim kriterijima, te uz 13 postaja Finskog

meteorološkog instituta i četiri postaje Instituta za oceanografiju i ribarstvo, sačinjavaju skup podataka MISELA s 331 svjetske mareografske postaje.

Vizualnom kontrolom utvrđeno je da vremenski nizovi visine razine mora sadržavaju razne pogreške koje je, prethodno analizama, bilo potrebno otkloniti. Neke od pogrešaka u nizovima vidljive su na slici 6 koja prikazuje isprekidanost niza prazninama, brojne šiljke, vertikalne pomake srednje vrijednosti te umjetne i lažne oscilacije izazvane neispravnošću ili blokadama instrumenata.



**Slika 6.** Nekontrolirana mjerenja visine razine mora koja sadrže brojne pogreške u podacima: a) prekidi, b) šiljci, c) pomaci srednje vrijednosti i d) umjetne oscilacije izazvane neispravnošću instrumenata.

Zbog toga je bilo nužno nizove podvrgnuti procedurama kontrole kvalitete kako bi se mogli koristiti u analizama. Nizovima je za početak otklonjen plimni signal uz pomoć paketa funkcija *T\_Tide* u programskom jeziku Matlab (Pawlowicz i sur., 2002), s obzirom da je vizualni pregled jednostavnije provoditi na rezidualnim nizovima (nizovi s uklonjenim plimnim

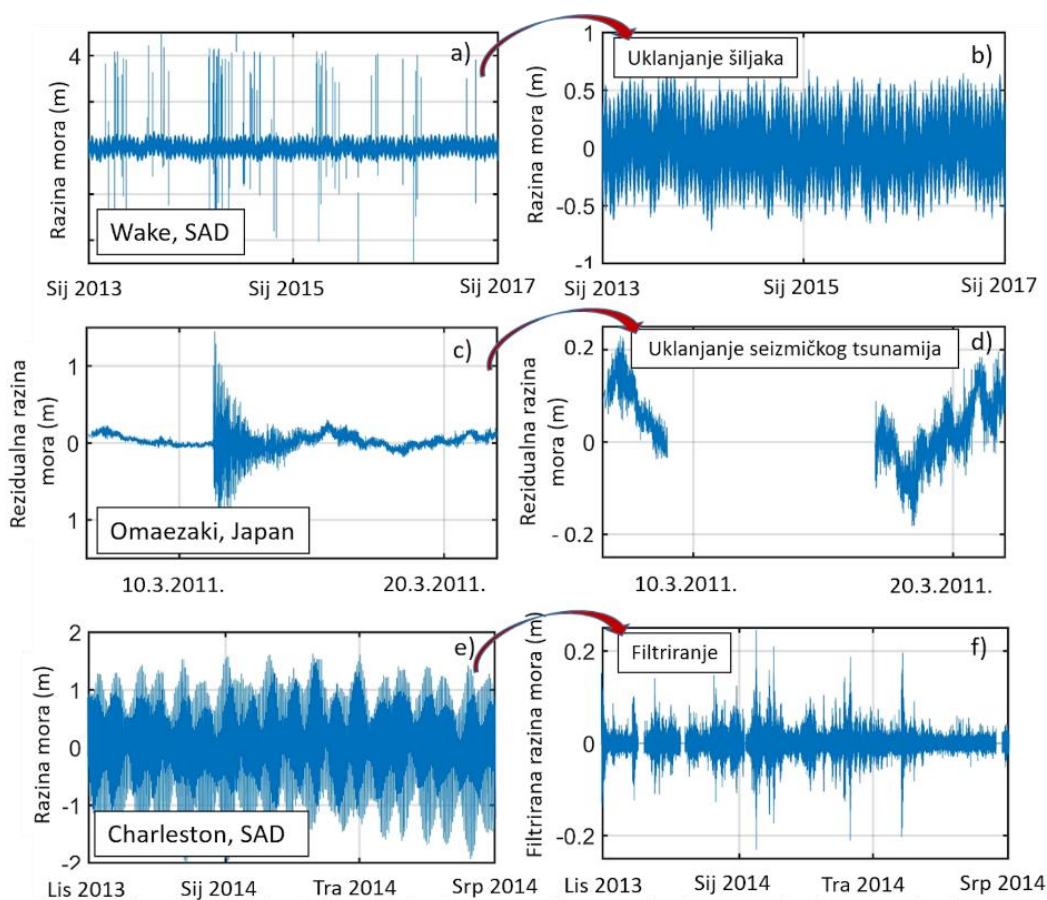
signalom) zbog lakšeg uočavanja šiljaka i ostalih pogrešnih podataka. Zatim je uslijedila automatska kontrola koja se sastojala od više koraka: (i) uklanjanje podataka koji se razlikuju za više od 50 cm od jednog susjednog podatka ili više od 30 cm od oba susjedna podatka (u slučaju postaja Finskog meteorološkog instituta 20 cm od jednog susjednog podatka ili 15 cm od oba susjedna podatka), te (ii) uklanjanje podataka koji odstupaju 3 standardne devijacije od krivulje dobivene prilagodbom na niz metodom najmanjih kvadrata. Potonja je automatska procedura preuzeta od Williams i sur. (2019a) koji su razvili automatski sustav kontrole kvalitete podataka karipskih mareografskih postaja.

Nakon automatske kontrole, uslijedio je vizualni pregled podataka. Tijekom ovog dugotrajnog procesa, niz sa svake postaje je sekvencijalno pregledan po 15-dnevnim prozorima i preostali šiljci i pogrešni zapisi, koji nisu odstranjeni tijekom automatske kontrole, su uočeni i ručno otklonjeni. Znan dio podataka uklonjen je tijekom automatske i ručne kontrole kvalitete zbog čega vremenski nizovi mogu biti nešto kraći (do 1.5 godine) ili s nešto većim postotkom praznina od inicijalnih nizova. Za razliku od dosadašnjih sustava kontrole kvalitete, kao što su primjerice Kontrola kvalitete podataka visine razine mora u približno stvarnom vremenu (SELENE, engl. *Sea level near-real time quality control processing*, EuroGOOS DATA-MEQ working group, 2010) i Sustav automatske obrade podataka mareografskih postaja (engl. *Automatic Tide Gauge Processing System*, National Oceanography Centre, Williams i sur., 2019a), koji su se oslanjali samo na automatske procedure, za pripremu MISELA-e korištena je i ručna procedura otklanjanja podataka niske kvalitete. Razlog tome je što se ovdje razmatra veliki broj mareografskih postaja iz raznih područja u svijetu koje dolaze od brojnih operatera te rade na različitim principima i s različitim sensorima, te zbog toga nije moguće, s trenutnim tehnološkim resursima, uspostaviti automatske procedure koje bi mogle prepoznati svakojake pogrešne podatke. Štoviše, smatra se da, i uz korištenje ručnih procedura kontrole kvalitete, još uvijek nisu isključeni svi pogrešni zapisi u podacima. Negativna strana korištenja ručnih metoda uklanjanja pogrešnih zapisa je što zahtijeva mnogo napora i vremena te je subjektivna i može podlijegati pogreškama i propustima. Iako je većina šiljaka i nestvarnih oscilacija uklonjena iz nizova, dio je zasigurno ostao prisutan u podacima.

U sljedećem koraku uslijedilo je uklanjanje zapisa visina razine mora izmjerenih tijekom seizmičkih tsunamija, s obzirom da oni nisu od interesa u ovoj disertaciji koja se fokusira isključivo na oscilacije atmosferskog porijekla. Koristeći globalnu bazu seizmičkih tsunamija (engl. *National Geophysical Data Center/World Data Service Global Historical Tsunami Database*, [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)) popisani su svi tsunamiji u

razdoblju između 2006. i 2018. godine, te je uklonjeno nekoliko dana (ovisno o intenzitetu tsunamija) podataka visine razine mora tijekom kojih je zabilježen tsunami na postajama u odgovarajućem području.

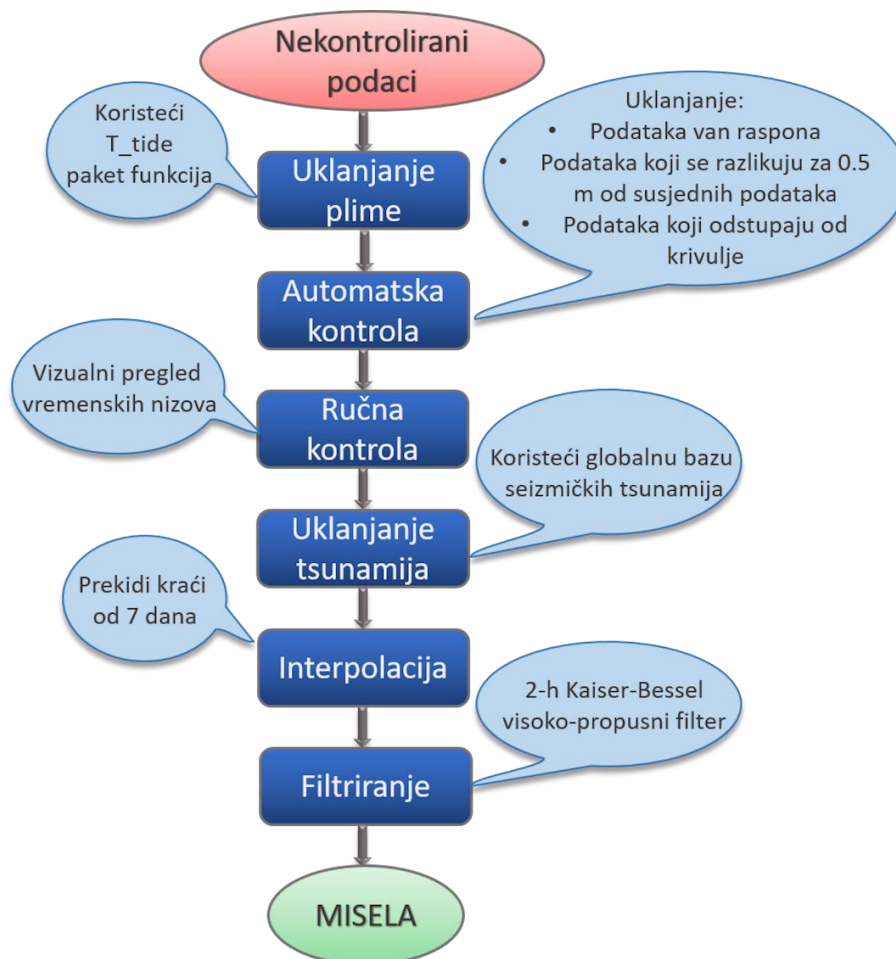
Posljednji korak u procesu tretiranja podataka bilo je izdvajanje visokofrekventnih oscilacija perioda do 2 h iz ukupnog signala razine mora. U tu svrhu, podaci su filtrirani korištenjem visokopropusnog Kaiser-Besselovog prozora (Thomson i Emery, 2014) širine 2 h. Slika 7 prikazuje nekoliko vremenskih nizova prije i poslije primjene određenih koraka kontrole kvalitete kao što su uklanjanje šiljaka, uklanjanje seizmičkog tsunamija, te uklanjanje plimnog signala i filtriranje.



**Slika 7.** Primjeri triju vremenskih nizova prije (a, c, e) i poslije (b, d, f) primjenjenih procedura kontrole kvalitete podataka.

Skup podataka MISELA je kreiran za istraživanje oscilacija razine mora na periodima od nekoliko minuta do nekoliko sati generiranih atmosferskim procesima. No, s obzirom na period odsijecanja od 2 h, MISELA-u je moguće kombinirati s postojećim skupovima podataka satne razlučivosti koji su dostupni na poznatim repozitorijima (kao što su PSMSL, BODC, GESLA,

UHSLC i drugi). Naime, prema Nyquistovoj relaciji, satni podaci mogu zabilježiti oscilacije perioda 2 h ili više, dok MISELA obuhvaća upravo oscilacije perioda do 2 h. S obzirom da filtriranje iziskuje kontinuirane nizove, praznine u nizovima duljine do sedam dana su prije filtriranja linearno interpolirane, a u slučaju praznina dužih od sedam dana filtriranje je provedeno sekvencijalno. Cjelokupni postupak kontrole kvalitete prikazan je shematskim dijagramom na slici 8.



**Slika 8.** Dijagram kontrole kvalitete podataka.

### 3.2. Opis datoteka iz skupa podataka MISELA

Skup podataka MISELA javno je dostupan u Arhivi marinskih podataka (engl. *Marine Data Archive*, Flanders Marine Institute, <https://doi.org/10.14284/456>). MISELA sadrži 331 datoteku u NetCDF formatu, od kojih svaka odgovara podacima visokofrekventnih oscilacija razine mora s jedne mareografske postaje. Tablica 2 prikazuje kako izgleda datoteka iz MISELA-e koja sadrži podatke s postaje Abashiri u Japanu. Datoteka sadrži tri varijable: vrijeme (engl. *time*), visina visokofrekventnih oscilacija (NSLOTT) i zastavicu kontrole

kvalitete (QC, engl. *quality control*), zajedno s atributima koji daju informacije i metapodatke o postaji kao što su ime postaje, geografska lokacija, izvor originalnih podataka, kratki sažetak i kontakt osoba za ovaj skup podataka.

**Tablica 2.** Primjer datoteke iz skupa podataka MISELA.

<b>Ime datoteke:</b>	abas	
<b>Format:</b>	NetCDF	
<b>Globalni atributi:</b>		
<i>Kod postaje</i>	abas	
<i>Geografska širina</i>	44.02° N	
<i>Geografska dužina</i>	144.29° E	
<i>Izvor</i>	<a href="http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=abas">http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=abas</a>	
<i>Sažetak</i>	Ova datoteka je dio skupa podataka MISELA koji sadrži minutna mjerenja visine razine mora kontrolirane kvalitete s 331 postaje u svijetu. Skup podataka MISELA je pogodan za globalna, regionalna i lokalna istraživanja visokofrekventnih oscilacija razine mora atmosferskog porijekla.	
<i>Kontakt</i>	Petra Zemunik Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split, Hrvatska zemunik@izor.hr	
<b>Varijable:</b>		
<i>vrijeme</i>	Veličina: 3276018 x 1 Tip podataka: numerički Puni naziv: vrijeme Jedinica: broj minuta od 1.1.2000. 00:00:00 Razlučivost: 1 min Početak/kraj: 21.3.2012. 23:43:00 14.6.2018. 00:00:00	
<i>visina visokofrekventnih oscilacija</i>	Veličina: 3276018 x 1 Tip podataka: numerički Puni naziv: visina visokofrekventnih oscilacija razine mora Jedinica: m	
<i>kontrola kvalitete</i>	Veličina: 3276018 x 1 Tip podataka: numerički Puni naziv: zastavica kontrole kvalitete Zastavice: 0 uklonjeni ili nepostojeći podatak 1 kontrolirani podatak 2 interpolirani podatak 3 interpolirani ili uklonjeni podatak zbog zapisa seizmičkog tsunamija	
<i>vrijeme</i>	<i>visina visokofrekventnih oscilacija</i>	<i>kontrola kvalitete</i>
6428143	2.0816682e-17	1
6428144	0.0030234202	1
6428145	0.012026043	1
6428146	0.0089078695	1
6428147	-0.00043109810	1
6428148	0.0025091446	1
6428149	0.0023286000	1

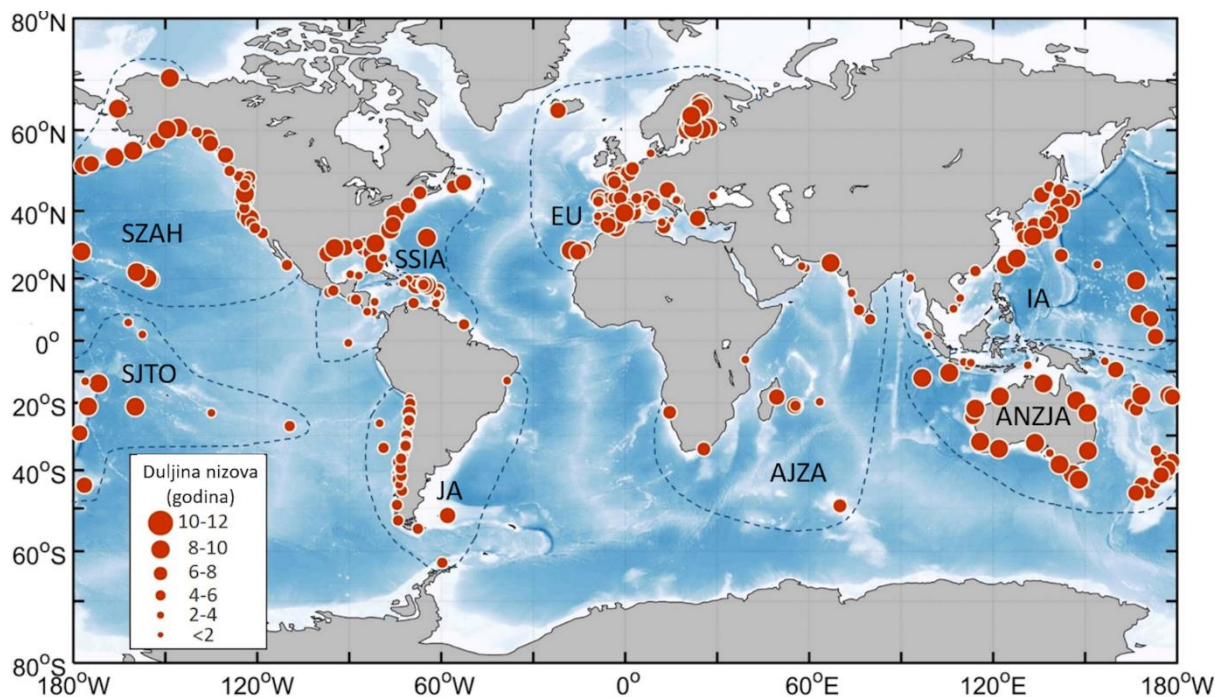
Svaka datoteka nosi naziv prema referentnom kodu postaje (kratica naziva postaje od četiri ili pet znakova) koji je preuzet s portala IOC SLSMF tako da korisnik može na portalu jednostavno pronaći dodatne informacije o postaji (npr. lokacija i država u kojoj se postaja nalazi, lokalni kontakt, vrsta senzora). Iznimno, postaje Finskog meteorološkog instituta i Instituta za oceanografiju i ribarstvo umjesto skraćenog naziva sadrže puno ime postaje u nazivu datoteke (npr. „helsinki“, „degerby“, „velaluka“, „starigrad“). Varijabla vremena izražena je u jedinici broja minuta od 1. siječnja 2004. godine u 00:00:00 UTC (koordinirano svjetsko vrijeme, engl. *Universal Time Coordinated*), a vrijednost visine razine mora (dobivena nakon provedenih procedura kontrole kvalitete i filtriranja visokopropusnim filtrom) u metrima s pridruženom zastavicom kontrole kvalitete koja poprima vrijednosti između 0 i 3. Zastavica 0 označava da je taj podatak bio nepostojeći ili je uklonjen, u slučaju zastavice 1 podatak je provjerene kvalitete, vrijednost 2 signalizira da se radi o interpoliranom podatku, a vrijednost 3 označava interpolirani ili uklonjeni podatak u zapisu seizmičkog tsunamija.

### 3.3. Prostorna razdioba postaja iz skupa podataka MISELA

#### 3.3.1. Globalni pregled

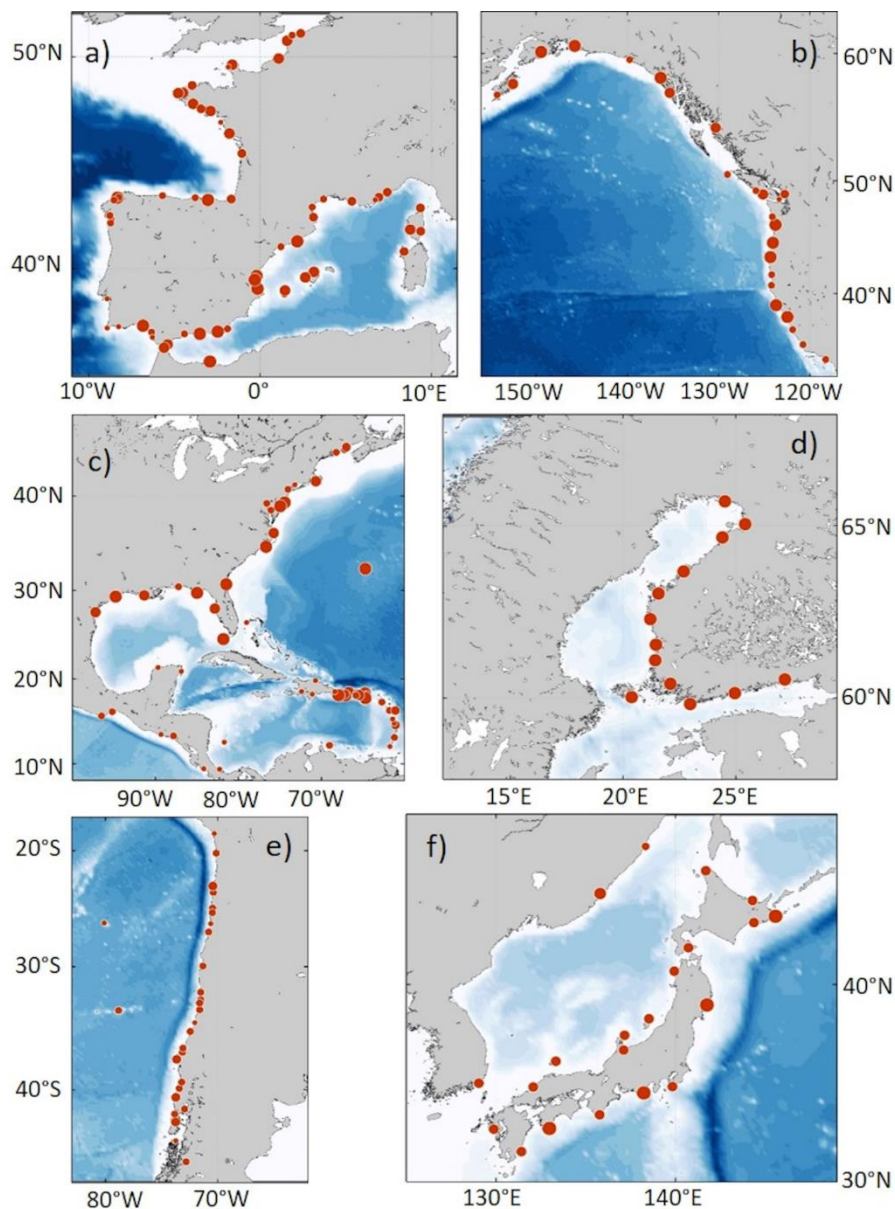
Prostorna razdioba mareografskih postaja koje pripadaju skupu podataka MISELA prikazana je na slici 9. Mreža mjernih postaja pokriva obale mora i oceana diljem svijeta. Postaje su gušće raspoređene u područjima s dugogodišnjom tradicijom u mjerenju visine razine mora, kao što su Sredozemno more, istočna i zapadna obala Sjeverne Amerike, zapadna obala Južne Amerike te cijela obala Australije. Također, brojna otočja i otočne države, primjerice Japan, Novi Zeland, Aleutsko otočje, Havajsko i Karipsko otočje, imaju bogatu mrežu mareografskih postaja. Međutim, određena područja, kao što su istočna obala Južne Amerike, cijela obala Afrike i Bliskog Istoka te indonezijska i ruska obala, još uvijek nemaju dovoljno razvijenu mrežu postaja na portalu IOC SLSMF. Razlog tome može biti nedovoljno ulaganje u istraživanja razine mora ili restriktivna politika dijeljenja podataka.





**Slika 9.** Karta s postajama iz skupa podataka MISELA. Isprekidanim linijama naznačene su granice između makro-regija.

Mareografske postaje dominiraju na sjevernoj hemisferi u odnosu na južnu. Čak 70 % postaja nalazi se na sjevernoj hemisferi, a najviše ih ima u umjerenom geografskom pojasu između 30 i 60 stupnja geografske širine koji sadrži 137 postaja raspoređenih diljem obala Sjeverne Amerike, Europe i Japana. Zbog učestalih i razornih tsunamija u Japanu te uragana u SAD-u, kao i zbog istraživanja olujnih uspora u obalnom području, u ovim područjima ulažu se veliki ljudski i financijski resursi u istraživanja i praćenja promjena razine mora. Slika 10 prikazuje područja gusto raspoređenih postaja zapadnog Sredozemnog mora i Europe, zapadne obale Amerike te japanske, čileanske i finske obale.



**Slika 10.** Područja s gusto raspoređenim postajama: a) zapadno Sredozemno more i zapadna Europa, b) zapadna obala Sjeverne Amerike, c) Karipsko otočje, Meksički zaljev i istočna obala sjeverne Amerike, d) obala Finske, e) obala Čilea i f) obala Japana.

Skup podataka MISELA sadrži ukupno 2303 godine podataka s 331 mareografske postaje u razdoblju od 2004. do 2019. godine. Srednja duljina vremenskog niza iznosi oko 7 godina, no može varirati od 1.5 godine do 12 godina. Dulji nizovi, s više od 10 godina podataka, dominiraju u područjima Baltičkog mora i Australije, dok su kraći nizovi, duljine do 4 godine, uglavnom zastupljeni na obala Čilea, Srednje Amerike i Indonezije. Kao što je već spomenuto, važan doprinos MISELA-i dolazi od regionalnih mareografskih mreža s velikim brojem postaja prvenstveno u Sredozemnom moru, Japanu, Meksičkom zaljevu, Novom Zelandu i mnogim drugim područjima koji imaju vremenske nizove različitih duljina.

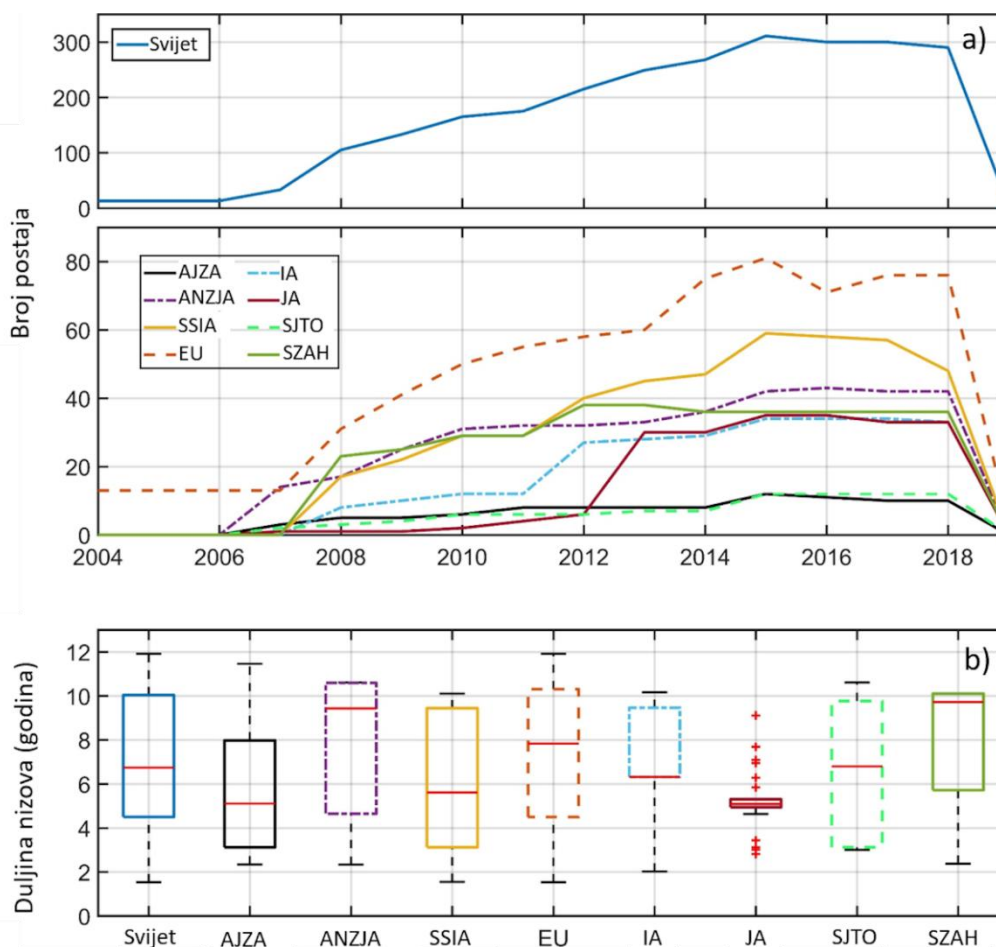
### 3.3.2. Pregled po makro-regijama

Postaje su u svrhu regionalne statističke analize podijeljene u osam makro-regija: Europa (EU), Srednja i sjeveroistočna Amerika (SSIA), Sjeverozapadna Amerika i Havaji (SZAH), Istočna Azija (IA), Afrika i jugozapadna Azija (AJZA), Australija, Novi Zeland i južna Azija (ANZJA), Južna Amerika (JA), te Srednji i južni Tihi ocean (SJTO) (tablica 3). Regije EU, SSIA i SZAH, koje se nalaze u sjevernom umjerenom pojasu, su među vodećima u broju postaja, dok regije AJZA i SJTO sadrže najmanje postaja. Najdulji nizovi, s prosječnom duljinom od 8.3 godine, nalaze se u SZAH regiji, nakon čega slijede regije ANZJA i EU s prosječnom duljinom nizova od 7.8, odnosno 7.4 godine. Najkraći nizovi su zastupljeni u JA i AJZA regijama, s prosječnom duljinom od 5.1 i 5.8 godina, a interesantno je da regija AJZA, iako sadrži većinom kraće nizove, također ima i neke od najduljih nizova MISELA-e.

**Tablica 3.** Broj postaja i prosječna duljina vremenskih nizova (u godinama) u svakoj makro-regiji i globalno.

	Broj postaja	Prosječna duljina vremenskih nizova (godine)
<i>Svijet</i>	331	6.96
<i>Europa (EU)</i>	90	7.39
<i>Srednja i sjeveroistočna Amerika (SSIA)</i>	63	6.27
<i>Sjeverozapadna Amerika i Havaji (SZAH)</i>	39	8.27
<i>Istočna Azija (IA)</i>	34	6.89
<i>Afrika i jugozapadna Azija (AJZA)</i>	14	5.78
<i>Australija, Novi Zeland i južna Azija (ANZJA)</i>	44	7.88
<i>Južna Amerika (JA)</i>	35	5.12
<i>Srednji i južni Tihi Ocean (SJTO)</i>	12	6.53

Slika 11 ukazuje na to da je broj postaja u MISELA-i značajno povećan nakon 2011. godine. Ova godina je bila prekretnica u razvoju svjetske mareografske mreže zbog razornog seizmičkog tsunamija koji je te godine pogodio Japan (Simons i sur., 2011) i odnio desetke tisuća žrtava, nakon čega su unaprijeđeni sustavi upozorenja na tsunamije te postavljene brojne nove mjerne postaje. Evidentno je povećanje broja postaja 2012. godine u regijama IA, SSIA i SZAH, te 2013. godine u regiji JA. Sve regije bilježe stalan porast broja postaja tijekom razdoblja MISELA-e od 2004. do 2019. godine, a regija EU kontinuirano ima najveći broj postaja.



**Slika 11.** a) Broj postaja u skupu podataka MISELA po godinama, od 2004. do 2019. godine, i b) duljina vremenskih nizova u svakoj makro-regiji i globalno. Na grafu b) središnja crvena linija pravokutnika označava medijan, donji i gornji rub pravokutnika označavaju 25. i 75. percentil. Iscrtkane linije se protežu do najmanje i najveće vrijednosti (koje se ne smatraju netipičnima (engl. *outlier*)), a netipične vrijednosti su označene crvenim plusevima.

Potrebno je naglasiti da je broj postaja na samom početku i kraju razdoblja MISELA-e manji u odnosu na ostatak razdoblja, zbog toga što su u 2004. godini dostupni samo podaci s postaja Finskog meteorološkog instituta na obali Baltičkog mora, a u 2019. godini samo s postaja Instituta za oceanografiju i ribarstvo na obali Jadranskog mora. Sve ostale postaje preuzete su s portala IOC SLSMF za najduže moguće razdoblje između lipnja 2006. godine, kada je portal započeo s radom, i lipnja 2018. godine, kada je završeno preuzimanje podataka s portala u svrhu ove doktorske disertacije. No, većina postaja ima kraće nizove jer je imala kraće vrijeme aktivnosti ili kraće vrijeme prenošenja podataka portalu ili je njihov vremenski niz skraćen tijekom primjene procedura kontrole kvalitete.

### 3.4. Diskusija

Globalni skup podataka visokofrekventnih oscilacija razine mora pod imenom MISELA kreiran je kako bi omogućio istraživanje i procjenu obalnih hazarda uzrokovanih promjenama razine mora na malim vremenskim skalama. Sustavno istraživanje ovakvih procesa u prošlosti nije bilo moguće prvenstveno jer nisu postojali visokofrekventni podaci razine mora, ali i zbog nedovoljnih računalnih resursa, male memorije za pohranu podataka i ograničenja sustava za obradu podataka. Određena ograničenja postoje i danas, no unatoč tome, istraživanja na temu visokofrekventnih oscilacija, osobito meteoroloških tsunamija, su u posljednje vrijeme sve brojnija. Primjerice, zabilježen je porast i do pet publiciranih članaka godišnje na temu meteoroloških tsunamija u Sredozemnom i Crnom moru (Vilibić i sur., 2021). Broj radova o meteorološkim tsunamijima u navedenim područjima kulminira u onim godinama u kojima su objavljena posebna izdanja nekoliko časopisa: (i) osam članaka 2009. godine, (ii) pet članaka 2018. godine, te (iii) sedam članaka 2021. godine. U pojedinim istraživanjima provedene su sustavne analize na većim područjima, određene studije opisuju izdvojene lokalne događaje, poneki članci se temelje na mjerenjima, a neki se od njih oslanjaju na numeričke modele, no svi imaju za cilj bolje poznavanje i širenje znanja o ovom fenomenu.

Skup podataka MISELA objedinio je podatke visine razine mora s nekoliko izvora u jednu cjelinu koja može poslužiti za istraživanje amplitude i učestalosti umjerenih i ekstremnih visokofrekventnih oscilacija razine mora na globalnoj razini. Motivacija za kreiranje ovakvog skupa podataka proizlazi iz potrebe za detaljnijim istraživanjem visokofrekventnih oscilacija razine mora, osobito onih atmosferskih uzroka koji su do danas nedovoljno istraženi. Kako bi istraživanje na globalnoj razini bilo moguće, potrebno je objediniti mjerenja s brojnih svjetskih mareografskih postaja i pripremiti ih kako bi se mogli koristiti u znanstvene svrhe. S obzirom da nijedan od postojećih centara podataka i baza podataka (npr. PSMSL, BODC, GESLA, UHSLC i drugi) ne objedinjuje globalna kontrolirana minutna mjerenja, potreba za razvojem takvog skupa podataka je bila izrazito velika. Razvojem MISELA-e donekle su zadovoljene potrebe za ovakvom vrstom podataka, no kako bi se nastavila istraživanja, njezin daljnji razvoj je neophodan.

Potrebno je naglasiti da provedene procedure kontrole kvalitete postavljaju ograničenja na primjenu ovog skupa podataka. Brojne pogreške u originalnim podacima (kao što su pomaci srednje vrijednosti i umjetne oscilacije) onemogućile su da cjelokupni signal razine mora bude uključen u skup podataka bez da se dvoji o njihovoj kvaliteti, pa je stoga izdvojen samo

visokofrekventni dio signala. Naime, digitalnim filtriranjem podataka, kojim je izdvojen visokofrekventni signal, ujedno su uklonjeni vertikalni pomaci u podacima koji se nisu mogli prepoznati i ukloniti drugim automatskim procedurama. Ovime je ograničena primjena skupa podataka MISELA na istraživanja isključivo visokofrekventnih procesa, s periodom do 2 h. Nadalje, pojedini pogrešni podaci ostali su netretirani. Primjerice, pomaci u vremenu nisu otklonjeni zato što bi to zahtijevalo informacije koje nisu dostupne na portalu IOC SLSMF. Također, praznine u podacima uvijek su linearno interpolirane, te nisu popunjavane podacima s drugih senzora na postajama koje imaju mjerenja s nekoliko senzora. Razlog tome je što je uočeno da različiti senzori mogu različito mjeriti oscilacije na minutnoj skali zbog upotrebe drugačijih metoda usrednjavanja. Značajna količina vremena, napora i informacija bila bi potrebna da se mjerenja s različitih senzora standardiziraju, no to bi zasigurno bio jedan od načina unaprjeđivanja skupa podataka MISELA.

Nekoliko je ključnih izazova za budući napredak u istraživanju visokofrekventnih fenomena razine mora, a tiču se mjerenja i dostupnosti podataka na minutnoj skali. Prvi izazov odnosi se na povećanje razlučivosti mjerenja na brojnim mareografskim postajama koje su zadržale manju vremensku razlučivost. Naime, s manjom razlučivosti mjerenja, primjerice satnom koja je standard u mnogim svjetskim bazama podataka visine razine mora, oscilacije manjih perioda ne mogu se pravilno zabilježiti, odnosno dolazi do podcjenjivanja njihove vrijednosti. Usprkos tome, neke mareografske postaje i mreže postaja još uvijek imaju manju razlučivost mjerenja, zbog čega se njihovi podaci ne mogu koristiti za analize visokofrekventnih procesa. Na primjer, bogata mareografska mreža Ujedinjenog Kraljevstva koja trenutno sadrži oko 70 postaja većinom mjeri visine razine mora na vremenskom intervalu od 15 minuta, zbog čega nije uključena u MISELA-u. No, teži se ka povećavanju razlučivosti, što je vidljivo iz novijih postaja dostupnih na portalu koje mjere s intervalom od 10 sekundi.

Sljedeći izazov odnosi se na postavljanje novih mareografskih postaja, osobito u područjima gdje ih nedostaje (IOC, 2012). Na primjer, veliki nedostatak postaja je na čitavoj obali Afrike, osim na dijelu istočne obale gdje ih je postavljeno nekoliko nakon razornog seizmičkog tsunamija u Indijskom oceanu 2004. godine. Nekoliko je inicijativa pokrenuto još u prošlom stoljeću za konstruiranje mareografske mreže u Africi (IOC, 1997; Woodworth i sur., 2007), no najveća prepreka nije postavljanje instrumenata, već njihovo održavanje. Osim afričke obale, mnoga golema područja, primjerice sjeverna obala Kanade, skandinavske države, Rusija, Ujedinjeno Kraljevstvo i Irska, Antarktika i Bliski istok, nemaju postaja u skupu podataka MISELA. Poneka područja (sjeverna obala Europe, Azije, Sjeverne Amerike,

Antarktike i Afrike) nisu naseljena, dok određena područja nemaju adekvatnu razlučivost mjerenja (Ujedinjeno Kraljevstvo i Irska) ili imaju restriktivne politike dijeljenja podataka (Rusija). Također, postaje izostaju i u polarnim područjima koja su oduvijek predstavljala izazov u prikupljanju podataka, a njihova su mjerenja poželjna u svim aspektima istraživanja mora.

Posljednji izazov vezan je uz razvoj procedura kontrole kvalitete koje se primjenjuju u stvarnom vremenu. Trenutni dosezi ovakvih procedura su nedovoljni da bi podaci bili dovoljno kvalitetni za korištenje u znanstvene svrhe. Prije analiziranja podataka uvijek je potrebno načiniti dodatne kontrole kvalitete. Neki od poznatih podatkovnih centara takve procedure primjenjuju prije objave podataka, pa su podaci korisnicima dostupni s određenim vremenskim odmakom (npr. BODC). No, s napretkom tehnoloških resursa i metoda kao što su umjetna inteligencija, treba težiti automatiziranju ovakvih procedura te njihovom provođenju u trenutku što bližem trenutku mjerenja. Novi priručnik o kontroli kvalitete podataka visine razine mora (UNESCO/IOC, 2020) objedinio je mnoge korisne preporuke i relevantne faktore za pravilno provođenje kontrole kvalitete. Naime, procedura kontrole kvalitete mora zadovoljavati određene standarde, biti konzistentna i pouzdana kako bi se podaci obradili u skladu s principima FAIR (engl. *Findability, Accessibility, Interoperability, and Reuse*) za upravljanje znanstvenim podacima (Wilkinson i sur., 2016). Kvalitetni i precizni metapodaci (informacije o mareografskim postajama) ovdje također igraju važnu ulogu. Uvažavajući ove principe, svi vremenski nizovi iz skupa podataka MISELA podvrgnuti su procedurama kontrole kvalitete. Iako je kvaliteta krajnjeg produkta značajno poboljšana u odnosu na kvalitetu sirovih podataka, puno vremena (oko 2 godine) utrošeno je na ručnu kontrolu podataka temeljenu na vizualnom pregledu nizova. Razvojem novih tehnologija i metoda za obradu podataka, određene procedure mogle bi biti automatizirane, te bi time količina vremena i resursa utrošena na ručne procedure mogla biti smanjena.

Nekoliko nedavnih studija sugerira da bi standard svjetske mareografske mreže trebao biti mjerenje s razlučivosti od barem jedne minute, te da kontrola kvalitete, koliko god je to moguće, treba biti provedena u vremenu mjerenja prema standardiziranoj proceduri (Vilibić i Šepić, 2017; Zemunik i sur., 2021b).

U budućnosti skup podataka MISELA može biti nadopunjen s novim dostupnim podacima. S obzirom da je kontrola kvalitete potrajala gotovo dvije godine, posljednji podaci u MISELA-i su iz lipnja 2018. godine (osim četiri postaje iz Jadranskog mora koje imaju nizove do 2019.

godine), što već u ovom trenutku daje prostor za značajnu nadogradnju. Također, postavljanjem novih mareografskih postaja ukupan broj postaja u MISELA-i bi se povećao te bi se postigla bolja pokrivenost svjetskih obala. Kontinuirana nadogradnja i unaprjeđenje skupa podataka MISELA svakako bi iziskivali uključivanje veće skupine ljudi koji su nužni za provođenje kontrole kvalitete. Stavljanje MISELA-e pod okrilje podatkovnih centara koji imaju dugu tradiciju u tom području (npr. GLOSS, engl. *The Global Sea Level Observing System*), zasigurno bi rezultiralo značajnim unaprjeđenjem ovog skupa podataka.



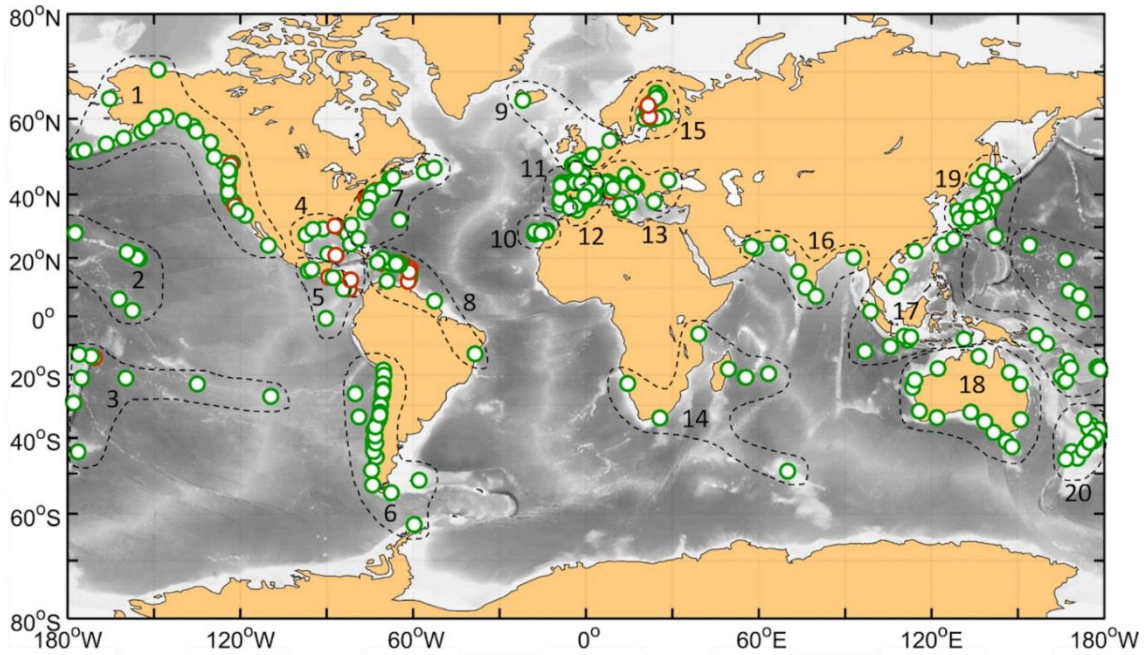
#### 4. ANALIZA VISOKOFREKVENTNIH OSCILACIJA RAZINE MORA

Nakon kreiranja skupa podataka, sljedeći korak je regionalna i globalna analiza visokofrekventnih oscilacija razine mora zapisanih u podacima MISELA-e (Zemunik i sur., 2022a). U ovom poglavlju disertacije konstruira se globalna klimatologija umjerenih i ekstremnih visokofrekventnih oscilacija, procjenjuju se njihove sezonske promjene, spektralne karakteristike te regionalni sinkronicitet ekstremnih epizoda.

Treba naglasiti da su prije analiza svi podaci označeni kao interpolirani u skupu podataka MISELA isključeni iz nizova, osim sljedova interpoliranih podataka duljine do 5 minuta, koji se smatraju prekratkima da bi utjecali na rezultate. Njihovim isključivanjem iz podataka nizovi bi postali suviše isprekidani, čime bi se utjecalo na kvalitetu izvođenja metoda koje ne mogu tretirati prekide u podacima (npr. izračun ovojnice niza i spektralna analiza). Nadalje, sljedovi podataka duljine jednog sata koji se nalaze na rubovima nizova, kao i sljedovi kraći od 6 h i okruženi prekidima, su također uklonjeni zbog nepouzdanosti metode filtriranja, spektralne analize i izračuna ovojnice na rubovima nizova podataka.

##### 4.1. Podjela postaja u područja i zone

Prostorni prikaz postaja (slika 12) ukazuje da postaje pokrivaju obale svih kontinenata pa skup podataka MISELA ima zadovoljavajuću razdiobu za regionalne i globalne analize. Kako bi se napravila robusna statistička analiza, postaje su podijeljene u 20 područja, manjih od makro-regija korištenih u prethodnom poglavlju za opis karakteristika MISELA-e (tablica 4). Tablica 4 pokazuje da područja Južne Amerike i Zapadne Sjeverne Amerike sadržavaju najviše postaja (34 i 32). Određena područja su veća od drugih ili imaju gušće raspoređene postaje pa posljedično imaju i veću ukupnu duljinu vremenskih nizova. Primjerice, područje Zapadne Sjeverne Amerike ima trostruko više postaja te time i trostruko veću ukupnu duljinu nizova od područja Sjeverne Europe. Međutim, postaje u određenim područjima imaju dulje nizove od prosječnih, primjerice Baltičko more i Australija, čije su srednje duljine nizova 12, odnosno 10 godina. Iz tog razloga ova područja imaju veću ukupnu duljinu nizova od nekih područja s većim brojem postaja (npr. Istočno Sredozemno more). Područja Zapadne Srednje Amerike, Sjeverozapadne Afrike, Južne Afrike i Sjevernog Indijskog oceana imaju najmanje postaja i najkraću ukupnu duljinu vremenskih nizova, što je odraz nerazvijenih mareografskih mreža u ovim dijelovima svijeta (Woodworth i sur., 2007).

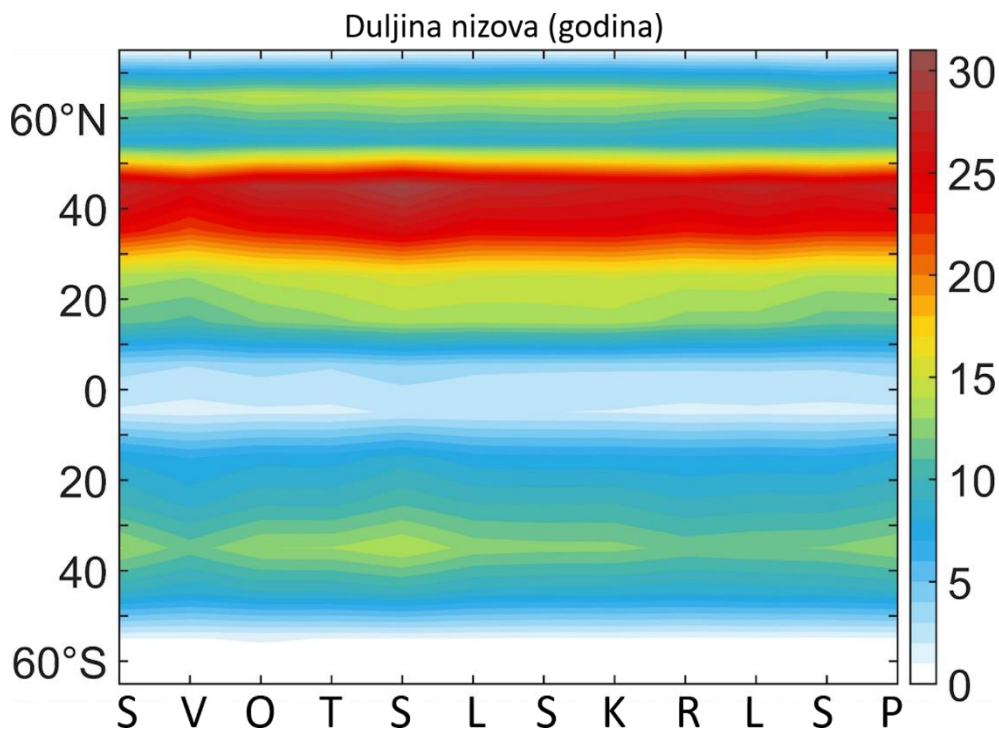


**Slika 12.** Karta s postajama iz skupa podataka MISELA koje su korištene u analizama. Zeleni kružići označavaju postaje korištene u spektralnoj analizi, a crveni postaje izbačene iz spektralne analize. Granice između definiranih područja su naznačene isprekidanim linijama.

**Tablica 4.** Broj postaja, ukupna duljina vremenskih nizova (u godinama) i prosječna duljina vremenskih nizova (u godinama) po područjima.

	Broj postaja	Ukupna duljina nizova (godine)	Prosječna duljina nizova (godine)
1. Zapadna Sjeverna Amerika	32	256.03	8.00
2. Havaji i središnji Tih ocean	14	114.90	8.21
3. Južni Tih ocean	10	72.20	7.22
4. Meksički zaljev	11	77.05	7.00
5. Zapadna Srednja Amerika	6	21.81	3.64
6. Južna Amerika	34	176.09	5.18
7. Istočna Sjeverna Amerika	18	126.22	7.01
8. Karipsko otočje	29	173.33	5.98
9. Sjeverna Europa	11	79.16	7.20
10. Sjeverozapadna Afrika	6	48.25	8.04
11. Zapadna Europa	24	139.60	5.82
12. Zapadno Sredozemno more	19	150.57	7.92
13. Istočno Sredozemno more	17	93.12	5.48
14. Južna Afrika	8	51.89	6.49
15. Baltičko more	13	154.78	11.91
16. Sjeverni Indijski ocean	7	31.32	4.47
17. Jugoistočna Azija	22	135.12	6.14
18. Australija	14	138.48	9.89
19. Sjeverozapadni Tih ocean	22	156.89	7.13
20. Novi Zeland	14	106.25	7.59

Kako bi se istražila zonalna obilježja visokofrekventnih oscilacija, postaje su zonalno grupirane svakih 10 stupnjeva geografske širine (slika 13). Pojasi s najvećim brojem postaja i ukupnom duljinom vremenskih nizova su umjerene geografske širine, a naročito pojas 40-50° sjeverne geografske širine koji sadrži 69 postaja te ukupno 445 godina podatka. Na južnoj hemisferi, pojas 30-40° južne geografske širine sadrži najviše postaja, njih 27, s ukupnom duljinom vremenskih nizova nešto većom od 180 godina. Tropski i polarni pojas karakterizirani su najvećim manjkom podataka, pa tako rubni pojasevi (70-80° sjeverne geografske širine, 60-70° južne geografske širine) sadrže po samo jednu postaju, na Antarktici te na sjeveru Aljaske. Broj postaja i podataka tijekom godine je gotovo konstantan, odnosno nešto viši tijekom proljeća u umjerenim pojasevima.



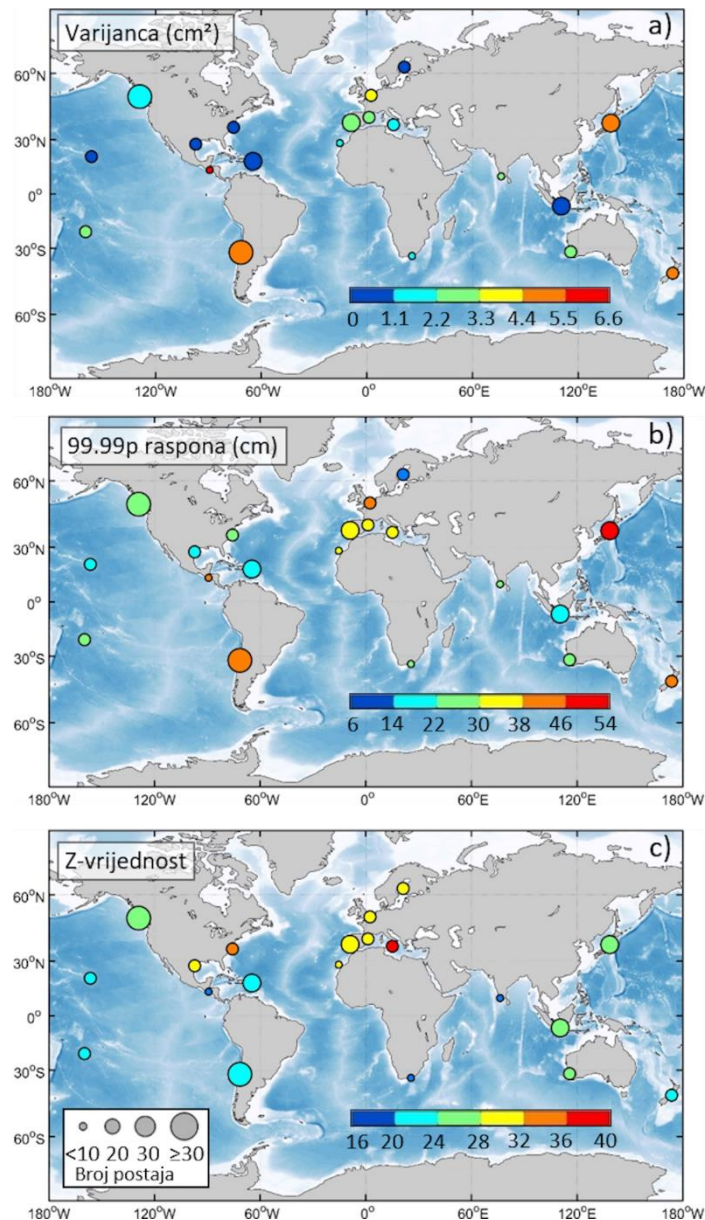
**Slika 13.** Mjesečna razdioba ukupne duljine vremenskih nizova (u godinama).

## 4.2. Rezultati

### 4.2.1. Globalne varijance i rasponi

Prostorne razdiobe varijance visokofrekventnih vremenskih nizova razine mora, raspona ekstremnih oscilacija (99.99-i percentil vremenskog niza raspona oscilacija) i Z-vrijednosti raspona oscilacija, usrednjenih (medijan) po definiranim područjima, su prikazane na slici 14. Varijanca signala doseže  $6.57 \text{ cm}^2$ , što implicira da visokofrekventne oscilacije nisu snažne kao ostale komponentne razine mora, odnosno da su nekoliko redova veličine manje od

plimnog signala (Haigh i sur., 2019) ili olujnih uspora (Muis i sur., 2020). Najveće vrijednosti varijance zabilježene su u područjima Zapadne Srednje Amerike ( $6.57 \text{ cm}^2$ ) i Sjeverozapadnog Tihog oceana, dok su najmanje vrijednosti u Meksičkom zaljevu ( $0.56 \text{ cm}^2$ ) i Baltičkom moru ( $0.25 \text{ cm}^2$ ).



**Slika 14.** a) Varijanca, b) 99.99-i percentil raspona i c) Z-vrijednost visokofrekventnih oscilacija razine mora, usrednjeni po područjima. Veličina kružića proporcionalna je broju postaja u pojedinom području.

Usprkos tome što visokofrekventne oscilacije u prosjeku nisu snažne, ove oscilacije mogu doseći velike raspona tijekom ekstremnih događaja (tj. meteoroloških tsunamija), čak više od 4 m (Rabinovich, 2020). Medijan raspona ekstremnih oscilacija premašuje pola metra u

područjima Sjeverozapadnog Tihog oceana (slika 14b), te nešto manje u područjima Južne Amerike, Zapadne Srednje Amerike, Sjeverne Europe i Novog Zelanda. Štoviše, raspon oscilacija na pojedinim postajama premašuje 1 m, primjerice u Nagasakiju (Japan) i Lampeduzi (Italija), gdje raspon ekstremnih oscilacija iznosi 105 i 97 cm, redom (tablica 5).

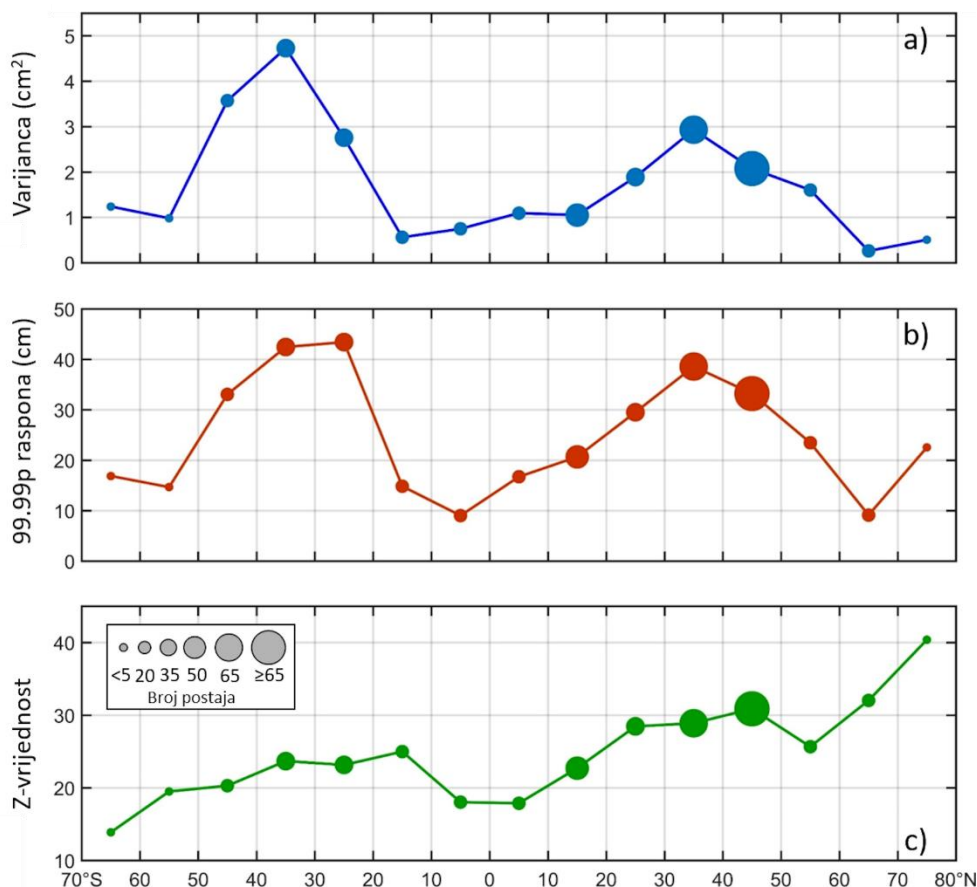
**Tablica 5.** Postaje s najvećim 99.99-im percentilom raspona visokofrekventnih oscilacija, najvećim medijanom raspona visokofrekventnih oscilacija i najvećom Z-vrijednosti.

Ime postaje	99.99p (cm)	Ime postaje	Medijan (cm)	Ime postaje	Z-vrijednost
<i>Nagasaki, Japan</i>	104.6	<i>Bucalemu, Chile</i>	15.7	<i>Lawma, Amerada Pass, Louisiana, SAD</i>	87.9
<i>Lampedusa, Italija</i>	97.4	<i>Bahia Mansa, Čile</i>	11.8	<i>Castro, Čile</i>	84.9
<i>Minami-Tori-Shima, Japan</i>	89.8	<i>La Libertad, El Salvador</i>	10.6	<i>Split, Hrvatska</i>	79.4
<i>Juan Fernandez, Čile</i>	82.7	<i>Cape Cuvier Wharf, Australija</i>	10.0	<i>Magueyes, Island, Puerto Rico</i>	77.5
<i>San Felix, Čile</i>	82.1	<i>Port Elizabeth, Južnoafrička Republika</i>	9.7	<i>Hienghene, Nova Kaledonija</i>	68.0
<i>Port Napier, Novi Zeland</i>	78.7	<i>San Felix, Čile</i>	9.1	<i>Apalachicola, Florida, SAD</i>	66.5
<i>Bucalemu, Čile</i>	77.8	<i>Calais, Francuska</i>	9.0	<i>Prince Rupert, Kanada</i>	65.0
<i>Rudnaya Pristan, Rusija</i>	75.7	<i>Jackson Bay, Novi Zeland</i>	8.5	<i>Tarifa, Španjolska</i>	63.9
<i>Atlantic City, New Jersey, SAD</i>	75.0	<i>Puerto Angel, Meksiko</i>	8.5	<i>Cordova, Aljaska, SAD</i>	62.7
<i>Iquique, Čile</i>	74.8	<i>Salina Cruz, Oaxaca, Meksiko</i>	8.4	<i>Lampedusa, Italija</i>	61.6

Z-vrijednost koja kvantificira odnos između ekstremnih i umjerenih oscilacija poprima najveće vrijednosti u Sredozemnom moru i drugim europskim područjima te u Istočnoj Sjevernoj Americi (slika 14c). U Sredozemnom moru Z-vrijednost doseže 40, što znači da su rasponi oscilacija tijekom ekstremnih epizoda veći od medijana raspona za iznos koji odgovara 40 medijana apsolutnih devijacija. Na nekim postajama te vrijednosti su čak i više, primjerice u Splitu (Hrvatska) i u Lampedusi (Italija), gdje Z-vrijednosti iznose 79 i 62. Dakle,

visokofrekventne oscilacije u ekstremnim slučajevima mogu biti uvećane i nekoliko desetaka puta u odnosu na svoje prosječne raspone, zbog čega predstavljaju prijetnju obalama, osobito u područjima s niskim rasponom plimnog signala kao što je Sredozemno more (Vilibić i Šepić, 2017). Naime, analiza je pokazala da raspon visokofrekventnih oscilacija doseže 1 m na određenim postajama u Sredozemnom moru, a plimni raspon, izuzev specifičnih područja, iznosi do 40 cm (Arabelos i sur., 2011).

Krivulje zonalne distribucije varijance, raspona ekstremnih oscilacija i Z-vrijednosti su vrlo slične, s nižim vrijednostima u tropskim i polarnim područjima, te višim u umjerenim pojasevima (slika 15). Vidljiva je iznimka na krivulji Z-vrijednosti s maksimumom koji se postiže u najsjevernijim pojasevima (60-80° sjeverne geografske širine). Ovdje treba istaknuti da sjeverni i južni rubni pojasevi sadrže samo po jednu postaju (postaje na Antarktici i Aljasci), stoga izračun vrijednosti u ovim pojasevima nije robusan kao u onima koji sadrže po nekoliko desetaka postaja. Medijani varijance i raspona ekstremnih oscilacija su četiri do pet puta veći u umjerenim pojasevima nego u tropskim područjima, te postižu maksimume na južnoj hemisferi. Medijan Z-vrijednosti je veći u sjevernom umjerenom pojasu nego u južnom, što sugerira da, iako su više vrijednosti varijance i raspona ekstremnih oscilacija zabilježene na postajama južne hemisfere, veća amplifikacija oscilacija opažena je na sjevernoj hemisferi.

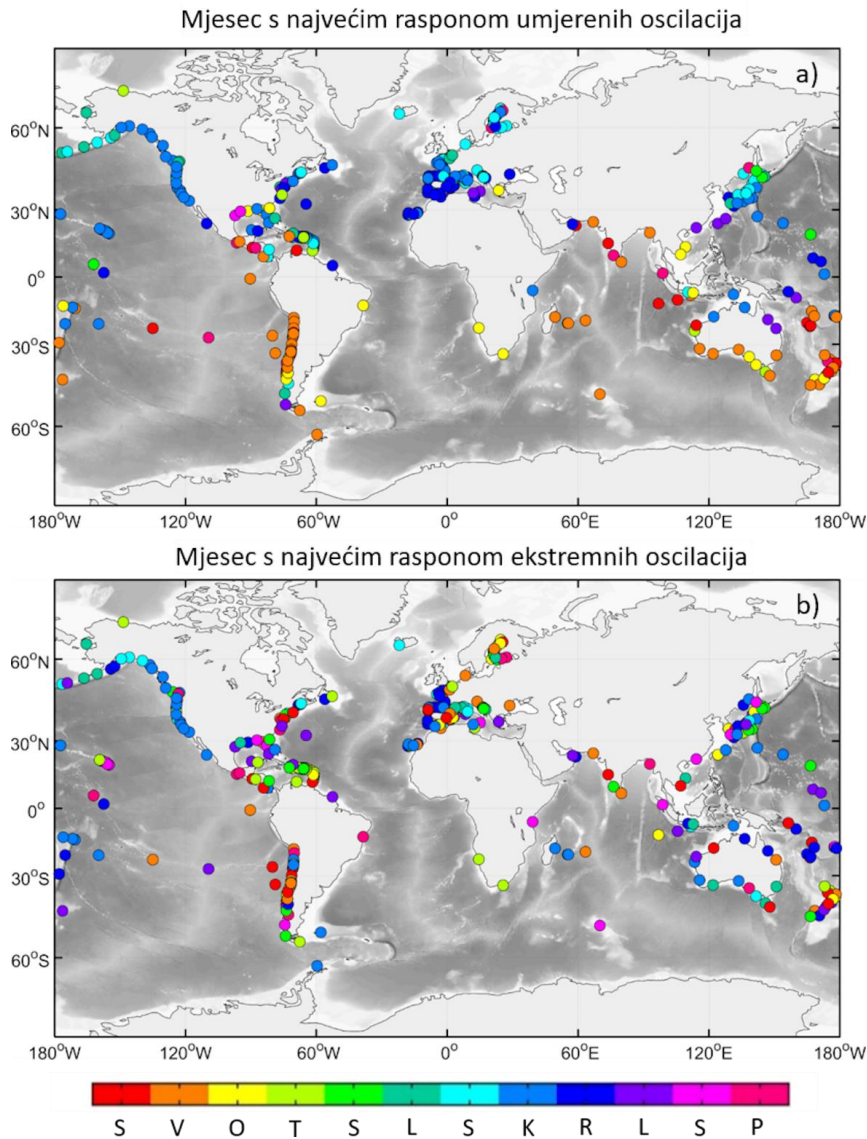


**Slika 15.** a) Varijanca, b) 99.99-i percentil raspona i c) Z-vrijednost visokofrekventnih oscilacija, usrednjeno preko 10° geografske širine. Veličina kružića proporcionalna je broju postaja u pojedinom zonalnom pojasu.

#### 4.2.2. Sezonske karakteristike

Kako bi se utvrdilo postoje li sezonske promjene u visini visokofrekventnih oscilacija, napravljena je analiza njihovih raspona u pojedinim mjesecima. Ova analiza je važna zato što omogućuje da se utvrdi postoje li mjeseci ili godišnja doba preferirana za pojavu ekstremnih oscilacija. Slika 16 prikazuje mjesec u kojem su ostvarene najveće vrijednosti raspona umjerenih i ekstremnih visokofrekventnih oscilacija razine mora. Evidentan je maksimum raspona umjerenih oscilacija tijekom zimskih mjeseci u umjerenim geografskim širinama (prosinac-veljača na sjevernoj hemisferi i lipanj-kolovoz na južnoj hemisferi). Među svim postajama koje se nalaze u umjerenim pojasevima, 85 % njih ima maksimalne raspone umjerenih oscilacija zimi, a iznimke su vidljive na južnoj obali Čilea, sjeveru Australije i u Meksičkom zaljevu. U tropskim područjima Indije i Meksika maksimum se uglavnom postiže tijekom kišnih sezona. Rasponi ekstremnih oscilacija nemaju tako egzaktn obrazac. Maksimum raspona ekstremnih oscilacija se otprilike podjednako pojavljuje u različitim

sezonomama. Točnije, na 57 % postaja maksimum je postignut u jesen i zimu, a na 43 % u proljeće i ljeto. No, neka područja zadržavaju jasnu sezonalnost maksimalnih vrijednosti, primjerice Zapadna Sjeverna Amerika koja ima zimske maksimume, te Sjeverna Europa, Sjeverozapadna obala Tihog Oceana i Južna Amerika u kojima maksimumi također prevladavaju zimi, s ponekim iznimkama u proljeće i ljeto.

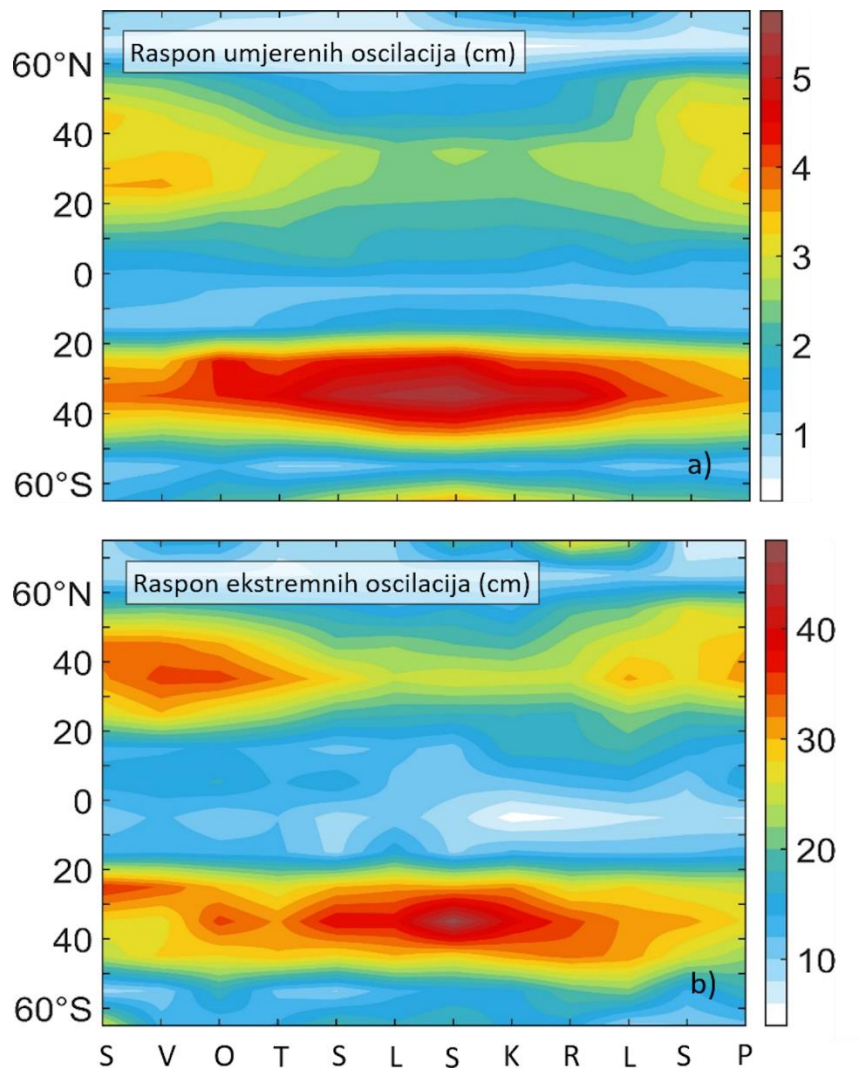


**Slika 16.** Prostorna razdioba mjeseci s najvećim a) medijanom i b) 99.99-im percentilom raspona visokofrekventnih oscilacija.

Nadalje, slika 17 prikazuje dominaciju umjerenih i ekstremnih visokofrekventnih oscilacija u umjerenim pojasevima tijekom hladnog dijela godine. U slučaju ekstremnih oscilacija, srednji raspon od gotovo pola metra je zabilježen u pojasu 30-40° južne geografske širine u srpnju. Umjerene oscilacije postižu maksimum u istom pojasu, no za razliku od ekstremnih oscilacija nemaju strogo izraženi sezonski ciklus, već su prijelazi između sezona blaži i



vrijednosti su visoke tijekom cijele godine. Drugi maksimum je vidljiv u zimu i rano proljeće u pojasu 20-40° sjeverne geografske širine, s rasponima umjerenih oscilacija do 3.5 cm te rasponima ekstremnih oscilacija do 35 cm.



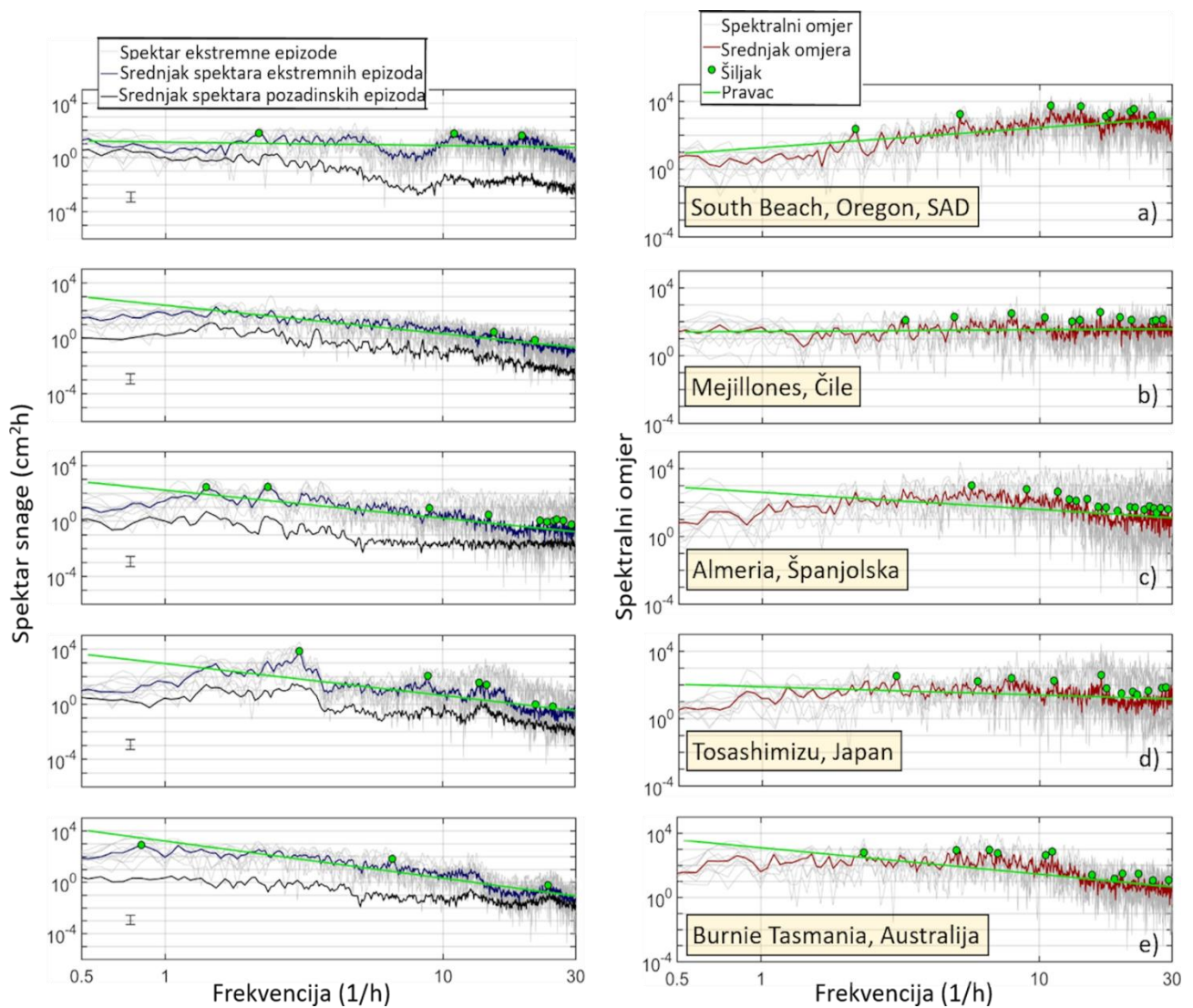
**Slika 17.** Mjesečna razdioba a) medijana i b) 99.99-og percentila raspona visokofrekventnih oscilacija, usrednjenih preko 10° geografske širine.

#### 4.2.3. Spektralne karakteristike

Sljedeća analiza je analiza spektralnih svojstava visokofrekventnih oscilacija, koja omogućuje da se utvrdi je li snaga oscilacija izraženija na određenim frekvencijama ili rasponima frekvencija. Na slici 18 su prikazani spektri deset ekstremnih 24-satnih epizoda i odgovarajući pozadinski spektar (medijan spektara deset pozadinskih 24-satnih epizoda) na postajama South Beach (SAD), Mejilones (Čile), Almeria (Španjolska), Tosashimizu (Japan) i Burnie Tasmania (Australija). Slika 18 također prikazuje i omjere spektara ekstremnih

epizoda i pozadinskog spektra. Ove postaje su izabrane za prikaz zbog toga što imaju kvalitetne nizove podataka duljine od sedam ili više godina. Spektri su izračunati Welchovom metodom, pri čemu se korišteni preklapajući Kaiser-Besselovi prozori (50 % preklapanja) širine 17 h. Treba naglasiti da su spektri prikazani debljim plavim, crnim i crvenim linijama nastali usrednjavanjem (medijanom) spektara pojedinih epizoda, zbog čega su te linije glađe, odnosno sadrže manje šiljaka, od tankih sivih linija koje odgovaraju spektrima pojedinih epizoda.

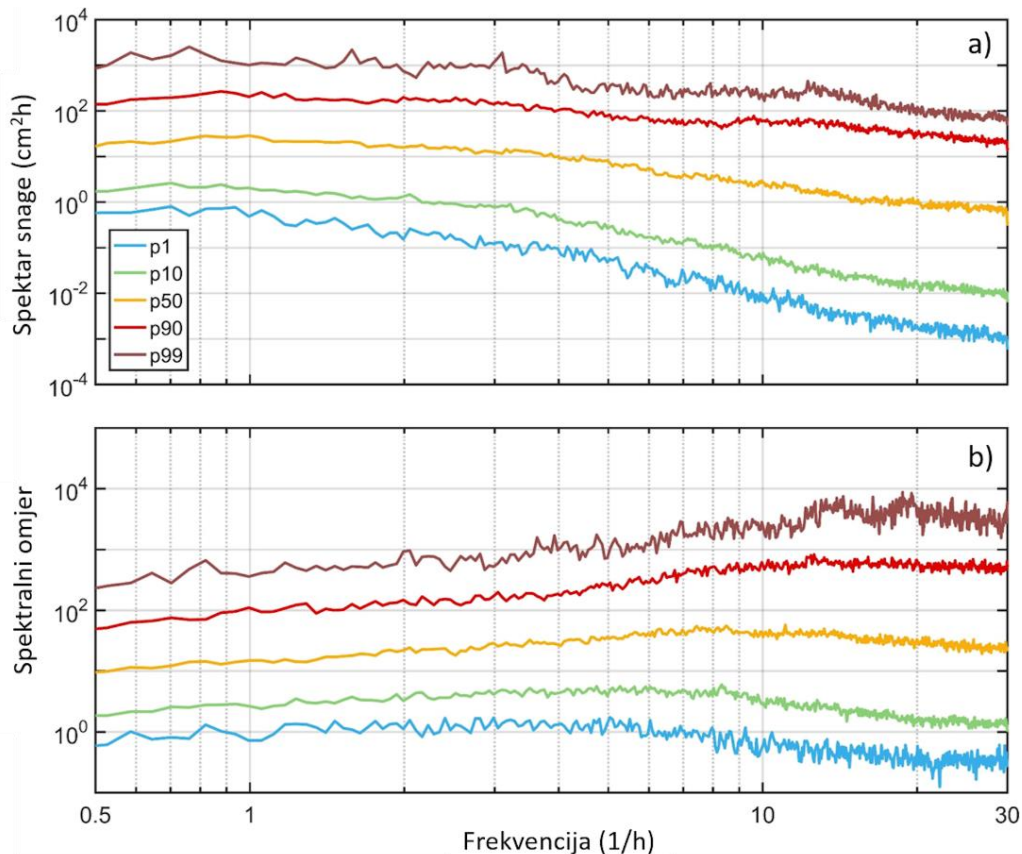
Spektri pokazuju nekoliko zajedničkih karakteristika: (i) srednji spektar ekstremnih epizoda sadrži glavninu energije na nižim frekvencijama (koje odgovaraju periodima većim od 15 minuta) te ima pad energije s porastom frekvencije, (ii) većina spektralnih šiljaka je opažena na vrlo visokim frekvencijama (koje odgovaraju periodima do 6 min), te (iii) pozadinski spektar (medijan spektara pozadinskih epizoda) ima otprilike sličnu distribuciju energije kao i spektar ekstremnih epizoda, no s manje izraženim šiljcima i do četiri reda veličine manjim iznosima snage. Na dijelu postaja omjeri između spektara ekstremnih epizoda i pozadinskog spektra prikazuju monotonu raspodjelu energije, te ponegdje i porast na višim frekvencijama, primjerice na postaji South Beach, Oregon, SAD.



**Slika 18.** Spektri snage izračunati za deset ekstremnih epizoda (sivo), medijan spektara deset ekstremnih epizoda (tamno-plavo), medijan spektara deset pozadinskih epizoda (pozadinski spektar, crno) (lijevo), omjeri između spektara pojedinih ekstremnih epizoda i pozadinskog spektra (sivo) i medijan omjera (crveno) (desno) na postajama a) South Beach, Oregon, SAD, b) Mejillones, Čile, c) Tosashimizu, Japan i d) Burnie Tasmania, Australija. Pravci dobiveni prilagodbom spektrima i spektralnim omjerima te šiljci su također prikazani (zeleno). 95%-tni interval pouzdanosti je naznačen na lijevim grafovima.

Nadalje, na svakoj frekvenciji izračunato je pet različitih percentila (1., 10., 50., 90., 99. percentil) spektralne snage i spektralnih omjera sa svih 307 postaja koje su korištene u analizi, kako bi se utvrdile zajedničke spektralne karakteristike visokofrekventnih oscilacija u svijetu (slika 19). Globalni spektri potvrđuju pad energije s porastom frekvencije za sve odabrane percentile. Opadanje energije s frekvencijom je najizraženije na postajama s niskom količinom energije i najblaže na postajama s visokom količinom energije na cijelom rasponu frekvencija.

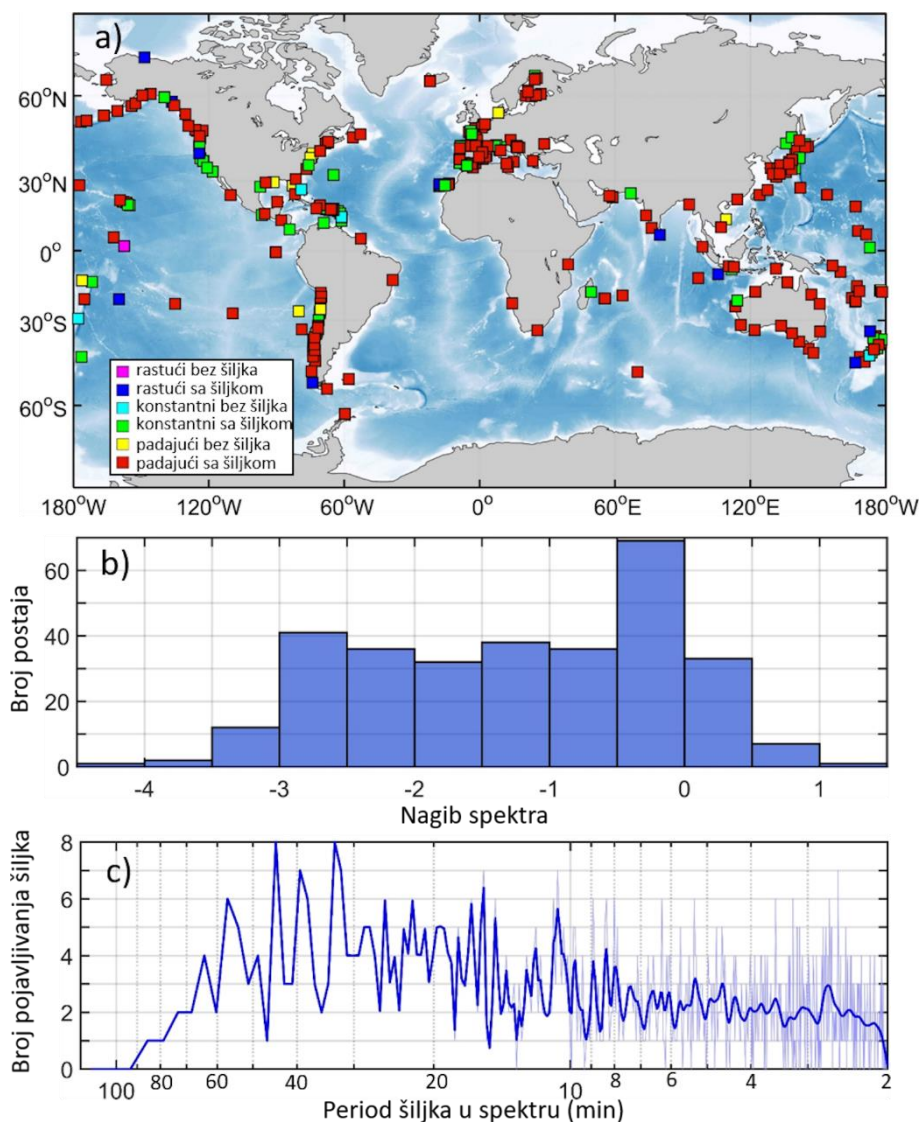
Kod ekstremnih epizoda snaga na određenoj frekvenciji može za različite postaje varirati do pet redova veličine. Spektralni omjer (između spektra ekstremnih epizoda i pozadinskog spektra) raste s porastom frekvencije, osobito na postajama s velikom razlikom u snazi ekstremnih i pozadinskih epizoda (99. percentil spektralnih omjera). Dakle, amplifikacija oscilacija je najviše izražena na periodima kraćim od 10 min (odgovara frekvenciji od  $6 \text{ h}^{-1}$ ). Iznimku čine postaje s niskim spektralnim omjerom, do 10. percentila, koje imaju konstantnu ili blago padajuću krivulju spektralnog omjera.



**Slika 19.** Vrijednosti 1., 10., 50., 90. i 99. percentila a) spektara ekstremnih epizoda i b) omjera između spektara ekstremnih epizoda i pozadinskog spektra sa svih postaja.

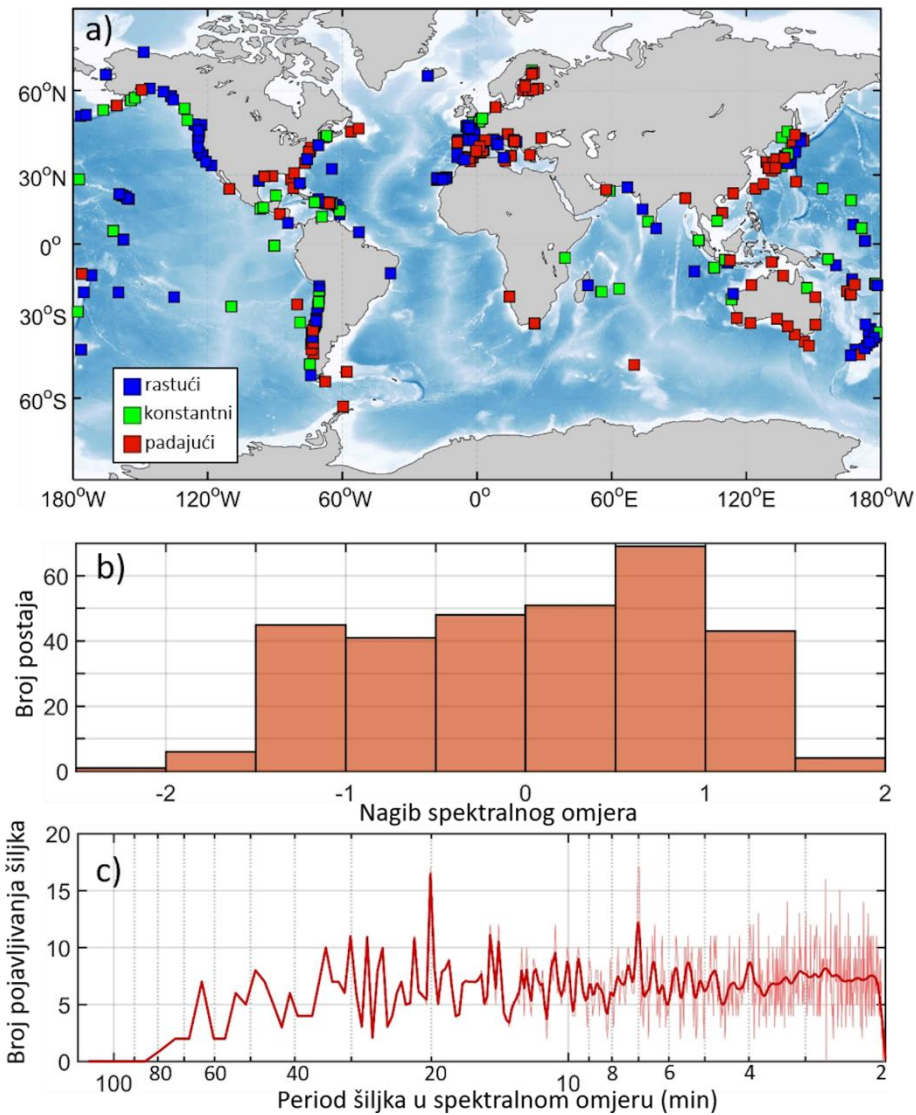
Zatim su spektri ekstremnih epizoda klasificirani na padajuće, konstante i rastuće, sa ili bez spektralnih šiljaka, te je prikazana prostorna razdioba ovih kategorija kako bi se utvrdilo postoji li grupiranje na obalama, što bi moglo sugerirati slične mehanizme nastanka visokofrekventnih oscilacija. Slika 20 prikazuje da padajući i konstantni spektri sa šiljcima dominiraju u svim morima. Svega 5 % postaja ima rastući spektar (tj. nagib pravca veći od 0.3) i one su raštrkane po promatranim područjima, dok su spektri bez ijednog šiljka vrlo rijetki i prisutni na nekoliko postaja u Tihom oceanu, duž istočne obale SAD-a i na nekoliko drugih lokacija uglavnom

smještenih na otvorenim obalama. Maksimumi (šiljci) energije se najčešće javljaju na periodima između 15 i 60 min.



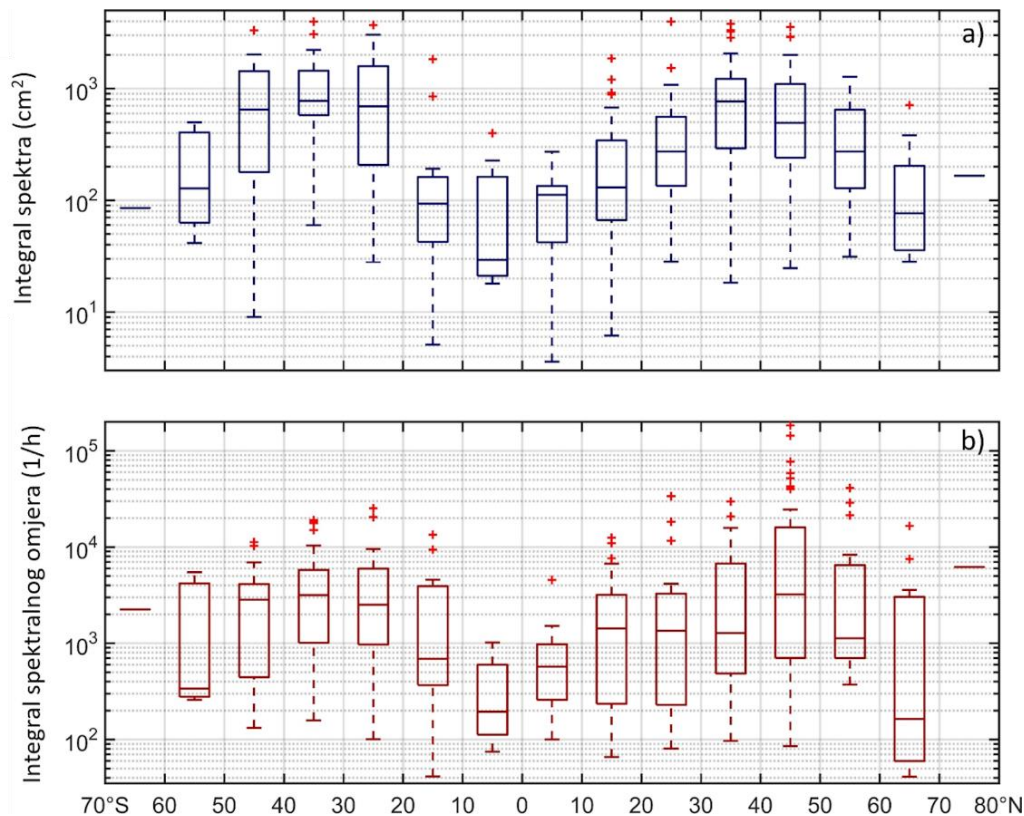
**Slika 20.** Medijani spektara ekstremnih epizoda: a) prostorna razdioba kategorija (rastući, konstantni i padajući sa ili bez šiljaka), b) distribucija nagiba i c) broj pojavljivanja šiljaka na postajama po periodima. Na grafu c) svijetlo-plava krivulja označava originalnu liniju, dok tamno-plava označava izglađenu krivulju.

Nadalje, ne postoji spektralni omjer bez ijednog šiljka, što implicira da svaka postaja ima amplifikaciju snage tijekom ekstremnih epizoda na nekom periodu (slika 21). Znakovito je da otprilike isti broj postaja ima pozitivan i negativan nagib spektralnih omjera, što znači da se na nekim lokacijama veća amplifikacija događa na nižim frekvencijama (Australija, Japan, Sredozemno i Baltičko more), dok se na drugima (zapadna obala SAD-a, Novi Zeland i zapadna i istočna Europa) događa na višim frekvencijama.



**Slika 21.** Kao na slici 20, ali za medijane omjera između spektara ekstremnih epizoda i pozadinskog spektra.

Kako bi se napravila međusobna usporedba ukupne energije visokofrekventnih oscilacija između zonalnih pojaseva i postaja u njima, za svaku postaju je izračunat integral medijana spektara snage za ekstremne epizode te integral medijana spektralnih omjera. Integral spektra ekstremnih epizoda ima zonalnu distribuciju sličnu zonalnoj distribuciji varijance i raspona visokofrekventnih oscilacija, s najvećim vrijednostima u umjerenim pojasevima te padom prema tropima i polovima (slika 22). Sličnost je vidljiva i za integral spektralnih omjera, što upućuje na veću amplifikaciju ovih oscilacija u umjerenim geografskim širinama, a što je zaključeno i analizom Z-vrijednosti.



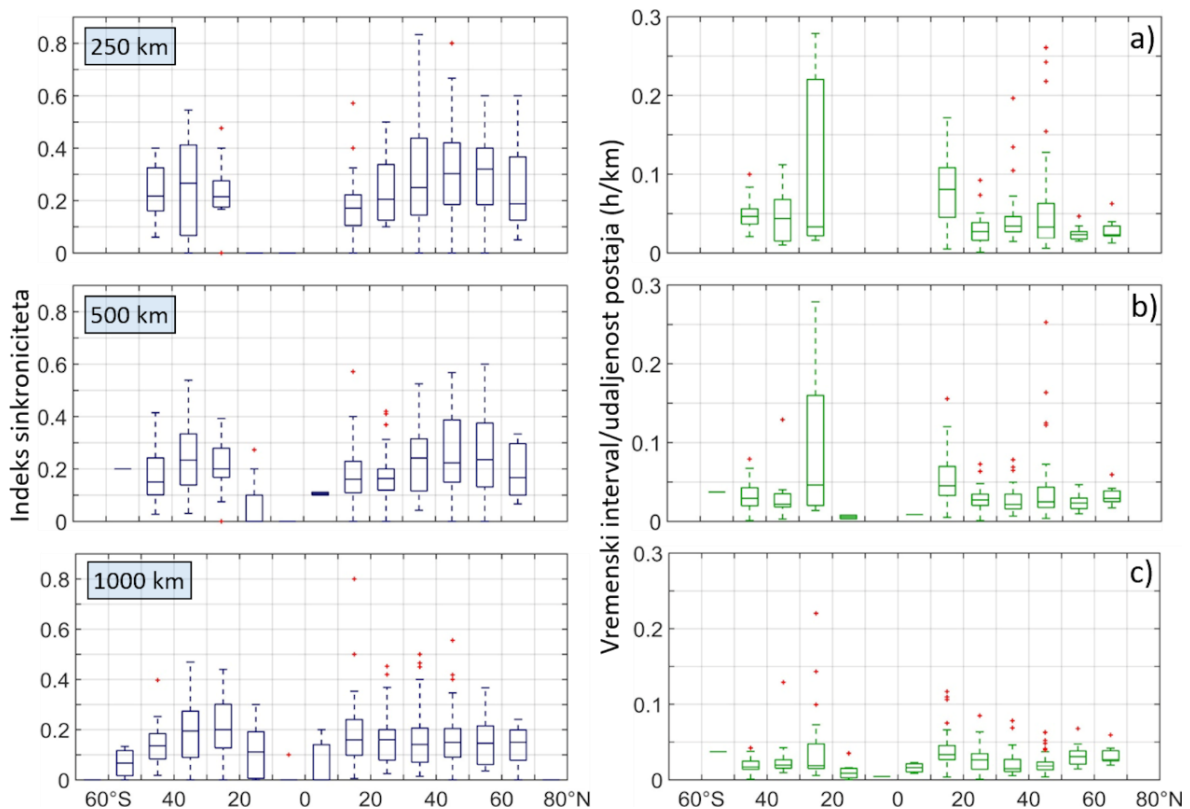
**Slika 22.** Zonalna distribucija a) medijana energije spektra tijekom ekstremnih epizoda (izračunatog kao integral medijana spektara ekstremnih epizoda) i b) medijana omjera energije spektra ekstremnih epizoda u odnosu na pozadinski spektar (izračunatog kao integral medijana spektralnih omjera).

#### 4.2.4. Sinkronicitet ekstremnih epizoda

Kako bi se procijenilo pojavljuju li se ekstremne epizode u istom času ili s kratkim vremenskim razmakom na više od jedne lokacije, kvantificirano je preklapanje izdvojenih epizoda na obližnjim mareografskim postajama. U tu svrhu izračunat je indeks sinkroniciteta za svaku postaju i prikazana je njegova zonalna distribucija za radijuse od 250, 500 i 1000 km unutar kojih se promatra preklapanje epizoda na postajama (slika 23). Evidentno je da su najveće vrijednosti indeksa postignute za najmanji radijus, što znači da je preklapanje ekstremnih epizoda učestalije kada se promatraju postaje udaljene do 250 km u odnosu na one na većim udaljenostima. Drugim riječima, na udaljenijim postajama rjeđa je sinkronizacija ekstremnih događaja. Ekstremne epizode se pojavljuju sinkrono na obližnjim postajama umjerenih pojaseva u prosjeku u 20 do 32 % slučajeva. Indeks je manji za radijuse od 500 i 1000 km, za koje je zabilježeno redom od 15 do 24 %, te od 6 do 20 % sinkronih ekstremnih događaja u umjerenim pojasevima. U tropskim područjima indeks sinkroniciteta je jednak nuli

zbog toga što nije zabilježeno niti jedno preklapanje epizoda, dok u visokim geografskim širinama ne postoje postaje koje se nalaze unutar odgovarajućeg radijusa, te su zato vrijednosti indeksa ovdje odsutne.

Na slici 23 prikazana je zonalna distribucija vremenskih intervala između pojave sinkronih ekstremnih epizoda, normalizirana s udaljenosti postaja. Vrijednosti su ponovno najveće u slučaju najmanjeg promatranog radijusa. Vrijednost od 0.04 h/km u pojasu 20-40° sjeverne geografske širine označava da u prosjeku prođe 6 h između pojave ekstremnih događaja na dvije postaje udaljene 150 km. Dakle, prosječna brzina poremećaja koji generira ekstremne oscilacije je 7 m/s, što je nekoliko puta manje od brzine propagiranja sinoptičkih sustava i frontalnih zona u umjerenim pojasevima (Ulbrich i sur., 2009). Ovo sugerira da su sustavi koji generiraju visokofrekventne oscilacije u prosjeku sporiji od ekstratropskih ciklona.



**Slika 23.** Zonalna distribucija indeksa sinkroniciteta (lijevo) i vremenskog intervala potrebnog za sinkronicitet epizoda na obližnjim postajama normaliziranog s udaljenosti postaja za radijuse od a) 250 km, b) 500 km i c) 1000 km.



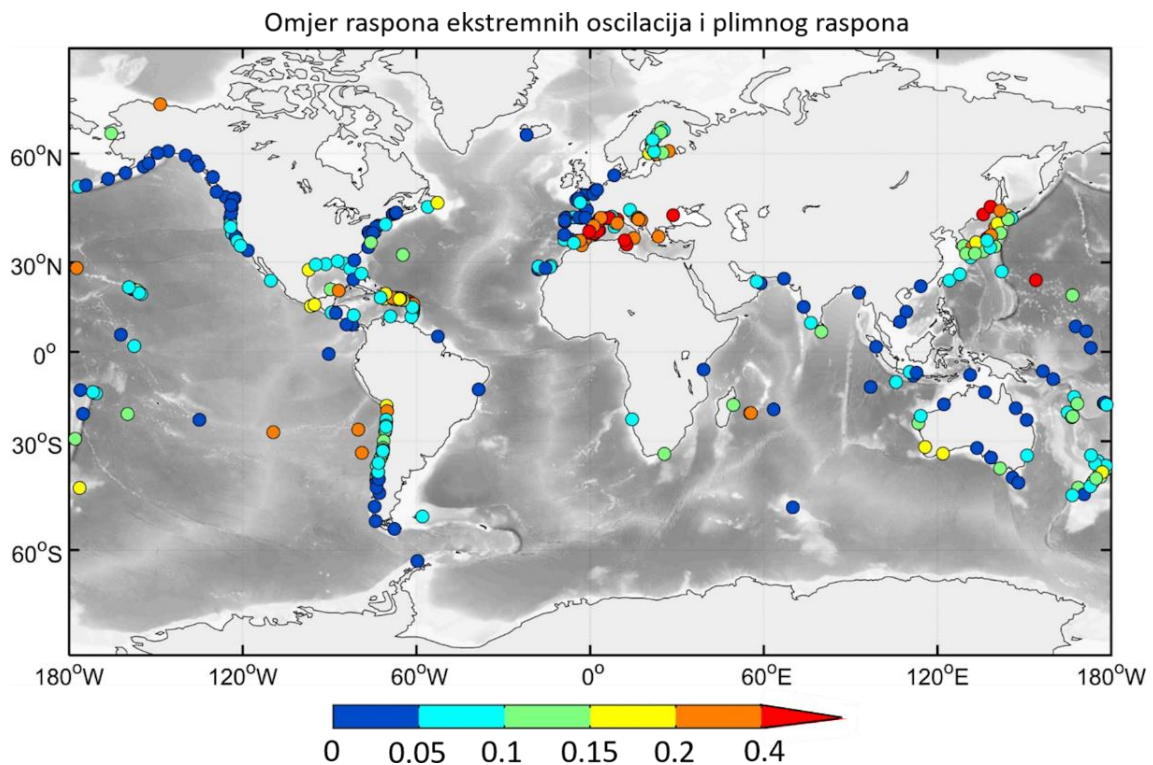
### 4.3. Diskusija

#### 4.3.1. Globalne varijance i rasponi

Analiza varijance signala, raspona ekstremnih oscilacija i Z-vrijednosti raspona oscilacija razine mora je zanimljiva zbog više razloga. Varijanca je relativno niska, sa srednjim vrijednostima u promatranim područjima do  $6.6 \text{ cm}^2$ . Naime, Vilibić i Šepić (2017) tvrde da doprinos varijance visokofrekventnog signala razine mora varijanci ukupnog signala razine mora doseže svega 1.25 %. Doprinos je nešto veći u bazenima s niskim plimnim rasponom, primjerice u Sredozemnom moru gdje iznosi 9.5 % (Šepić i sur., 2015b). No, usprkos niskoj varijanci, visokofrekventne oscilacije mogu postići velike raspone tijekom ekstremnih manifestacija (tj. meteoroloških tsunamija). Raspon oscilacija tada premašuje pola metra u pojedinim područjima, a čak jedan metar na određenim postajama, gdje može premašiti plimni raspon (Rabinovich, 2020). Prethodna istraživanja su pokazala da doprinos raspona visokofrekventnih oscilacija ukupnom signalu može narasti do 50 % kada se promatraju izražene epizode (Vilibić i Šepić, 2017), što naglašava važnost uključivanja ove vrste oscilacija pri procjenama globalnih ekstrema razine mora.

S obzirom da skup podataka MISELA sadrži samo visokofrekventni dio signala razine mora, nije moguće načiniti usporedbu visokofrekventnih oscilacija s ukupnim oscilacijama koristeći samo podatke iz MISELA-e. Iz tog razloga, za usporedbu su korišteni podaci globalnog oceanskog plimnog modela EOT20 (Hurt-Davis i sur., 2021). Plimni raspon je izračunat kao suma dvostruke amplitude 17 plimnih konstituenata u točkama modela koje su najbliže mareografskim postajama. Slika 24 prikazuje omjer između raspona ekstremnih visokofrekventnih oscilacija i plimnog raspona. Vrijednosti omjera su uglavnom konzistentne na obalama i prate globalnu razdiobu plimnog raspona (Hill, 2016). Primjerice, zapadna obala Sjeverne Amerike i sjever Europe imaju neke od najvećih plimnih oscilacija na svijetu, te je stoga navedeni omjer vrlo mali, uglavnom do 0.05 i ponegdje do 0.1. Omjeri su najveći u područjima niskog plimnog signala, kao što su Sredozemno i Japansko more (Odamaki, 1989; Tsimplis i sur., 1995), zbog toga što su rasponi visokofrekventnih oscilacija po iznosu bliži plimnim rasponima. Ova područja su poznata po pojavama meteoroloških tsunamija te je u njima i najviše istraživani ovaj fenomen (Hibiya i Kajiura, 1982; Vilibić i sur., 2021; Jansa i Ramis, 2021). Sve postaje u Sredozemnom moru imaju omjer veći od 0.2, uz iznimke sjevernog Jadrana gdje veći plimni signal rezultira manjim omjerom, te nekoliko postaja u Ligurskom moru. Dvije najveće vrijednosti omjera su dobivene na talijanskim postajama Pantelleria i

Lampedusa (1.01 i 1.04) koje su smještene u blizini amfidromijske točke u kojima amplituda plimnog signala iščezava (Abdennadher i Boukthir, 2006), a nalaze se na šelfu, što pogoduje nastanku visokofrekventnih oscilacija (Candela i sur., 1999).



**Slika 24.** Omjer između 99.99-og percentila raspona visokofrekventnih oscilacija i plimnog raspona na postajama.

Varijanca visokofrekventnih oscilacija se razlikuje između susjednih postaja, što je posljedica lokalne batimetrije koja okružuje postaje (Monserrat i sur., 1998; Woodworth, 2017). Naime, ako je postaja smještena unutar luke ili zaljeva, osobito uskog i izduženog zaljeva, oscilacije mogu imati sposobnost amplifikacije zbog učinka obalne rezonancije. Za razliku od postaja u zaljevima, visokofrekventne oscilacije izmjerene na postajama koje se nalaze na otvorenim obalama su pod utjecajem samo vanjske rezonancije, kao što su Proudmanova rezonancija ili rezonancija šelfa, i ovise o veličini šelfa na kojem se rezonancija događa.

Raspon visokofrekventnih oscilacija tijekom ekstremnih epizoda je uvećan nekoliko puta u odnosu na raspon tijekom mirnih razdoblja. No, intenzitet porasta raspona varira od područja do područja i ovisi o širini šelfa koji se prostire ispred njega. Što je veći šelf, veći je prostor na kojem djeluje Proudmanova rezonancija koja uvećava oscilacije (Williams i sur., 2021b). Zbog toga su Z-vrijednosti veće u područjima koja imaju stotine kilometara šelfa ispred obale (npr.

sjeverna Europa i istočna obala SAD-a). Obala Čilea ima manju Z-vrijednost te u kombinaciji s visokom varijancom sugerira trajnu postojanost umjerenih visokofrekventnih oscilacija. S druge strane, visoke Z-vrijednosti i niske varijance u Sredozemnom moru ukazuju na to da su visokofrekventne oscilacije u tom području karakterizirane izraženim epizodama, što može biti posljedica specifičnih sinoptičkih uvjeta koji su karakteristični za ovu vrstu oscilacija i mehanizma zarobljavanja valova koji je odgovoran za propagiranje atmosferskih poremećaja.

Varijanca i raspon ekstremnih oscilacija imaju najveće vrijednosti u umjerenim geografskim širinama i najmanje u tropskim i polarnim područjima, što je prethodno pokazano i u studiji Vilibić i Šepić (2017). Autori su također utvrdili značajnu korelaciju varijance i raspona visokofrekventnih oscilacija s brzinom vjetra na visini od 500 hPa, što može upućivati na globalnu povezanost vjetra u srednjoj troposferi s pojavom ove vrste oscilacija.

#### 4.3.2. Sezonske karakteristike

Utvrđeni zimski maksimumi umjerenih visokofrekventnih oscilacija su u skladu s prethodnim regionalnim i lokalnim studijama, primjerice s analizama seša i visokofrekventnih oscilacija na obalama Sjevernog mora i u luci Rotterdam (de Jong i Battjes, 2004; Ozsoy i sur., 2016). Snažni vjetrovi u srednjoj troposferi za vrijeme kojih se pojavljuju ove oscilacije (analiza u poglavlju 5) su uobičajeni u umjerenim pojasevima tijekom zimskih mjeseci (Hartmann, 2007).

Sezonska razdioba je nešto kompleksnija kada se promatraju ekstremne visokofrekventne oscilacije. Rezultati su pokazali da, iako umjerene oscilacije najveće raspone postižu zimi, u slučaju ekstremnih oscilacija maksimalni rasponi su zabilježeni gotovo podjednako u hladnom i toplom dijelu godine. Nadalje, dominacija pojedinog godišnjeg doba nije vidljiva ni na prostornoj razdiobi, što odražava činjenicu da su lokalni utjecaji - kao što su orijentacija obale i smjer propagiranja atmosferskog poremećaja - presudni za oblikovanje ekstremnih oscilacija.

Većina sustavnih regionalnih studija meteoroloških tsunamija se fokusira na događaje koji su se pojavili u ljetnoj sezoni, i to uglavnom u Sredozemnom moru (Šepić i sur., 2015b; Jansà i Ramis, 2021), na finskoj obali (Pellikka i sur., 2020), na Velikim jezerima (Bechle i sur., 2016) te na australskoj obali (Pattiaratchi i Wijeratne, 2014). No, pokazano je da ekstremne visokofrekventne oscilacije na zapadnoj europskoj obali imaju maksimalne raspone zimi (Williams i sur., 2021a), što je u skladu s regionalnim klimatološkim studijama meteoroloških tsunamija u ovom području (Ozsoy i sur., 2016). Na nekim obalama, naprotiv, vrhunac u broju

pojava meteoroloških tsunamija je zastupljen u obje sezone, primjerice na istočnoj obali SAD-a (Dusek i sur., 2019).

Bez obzira na veću dostupnost podataka, studije meteoroloških tsunamija su i dalje više fokusirane na istraživanje pojedinih slučajeva, nego na statističku analizu kontinuiranih i dugih nizova podataka. Studije pojedinih slučajeva uglavnom proučavaju meteorološke tsunamije koji se pojavljuju u ljeto i time sugeriraju da su oni ljetni fenomen. Ljetni meteorološki tsunamiji zasigurno privlače više pažnje zbog toga što se pojavljuju iznenadno tijekom mjeseci stabilnih vremenskih uvjeta te mogu ugroziti ljude na plažama i brodovima. No, sustavne studije visokofrekventnih oscilacija, poput Williams i sur. (2021a), ističu da se na temelju studija izoliranih događaja ne mogu donositi zaključci o sezonalnosti meteoroloških tsunamija.

#### 4.3.3. Spektralne karakteristike

Analizom globalnih spektara visokofrekventnih oscilacija razine mora utvrđeno je da energija uglavnom opada s porastom frekvencije, no s manjim intenzitetom nego što je dokumentirano za oscilacije perioda duljih od 2 h. Spektri oscilacija duljih perioda (od nekoliko sati do nekoliko dana) uglavnom prate nagib crvenog šuma, koji u logaritamskom koordinatnom sustavu iznosi  $-2$  (Medvedev i sur., 2020). No, nagib spektara visokofrekventnih oscilacija varira od postaje do postaje i može iznositi između  $-3$  i  $0.5$ . Ovo je posljedica raznolikosti obalnih topografskih i batimetrijskih obilježja, koji mogu amplificirati oscilacije na duljim periodima u većim lukama i zaljevima (Woodworth, 2017) te na širim šelfovima (Williams i sur., 2021b), ili na kraćim periodima, od nekoliko minuta do nekoliko desetaka minuta, u manjim lukama (Thotagamuwage and Pattiaratchi, 2014). Nadalje, povećana energija na minutnim periodima može biti posljedica brodova koji prolaze ispred luka ili se kreću unutar njih (Shao i sur., 2020) te vjetrovnih ili infra-težinskih valova (Merrifield i sur., 2014; Neale i sur., 2015).

Većina analiziranih spektara sadrži barem jedan spektralni šiljak (njih više od 90 %), što je vjerojatno posljedica položaja mareografskih postaja unutar luka ili zaljeva koje su tamo zaštićenije nego na otvorenim obalama. No, upravo u izduženim i uskim lukama s visokim faktorom amplifikacije (Miles i Munk, 1961) događaju se najrazorniji meteorološki tsunamiji (Monserrat i sur., 2006). Amplifikacija je zabilježena i na procesima duljih perioda, kao što su plimne oscilacije, čija se energija zahvaljujući rezonanciji može znatno uvećati (Arbic i sur., 2007; Medvedev i sur., 2020). U slučaju kompleksne topografije, kada nastupaju i obalna rezonancija i rezonancija na šelfu, energija može biti uvećana na širem rasponu frekvencija

(Zemunik i sur., 2021c). Spektralna energija na promatranim frekvencijama se razlikuje od postaje do postaje za nekoliko redova veličine, što je posljedica ukupnih mogućnosti lokalne batimetrije da omogući efikasniji prijenos energije iz atmosfere u more i uveća oscilacije.

#### 4.3.4. Sinkronicitet ekstremnih epizoda

Meteorološki tsunamiji su donedavno kategorizirani kao izolirane pojave koje se javljaju isključivo na specifičnim lokacijama (Ewing i sur., 1954; Orlić, 1980; Hibiya i Kajiura, 1982; Churchill i sur., 1995). No, novije regionalne studije koje se temelje na mjerenjima visoke vremenske razlučivosti i dobre prostorne pokrivenosti ukazuju na to da se meteorološki tsunamiji mogu pojaviti i u nizu, na više lokacija udaljenih i do tisuću kilometara diljem obale (Šepić i Rabinovich, 2014; Šepić i sur., 2015a). Šepić i sur. (2015a) su u svojoj studiji dokumentirali 30 % umjerenih i ekstremnih događaja koji su se dogodili duž cijelog promatranog područja u Sredozemlju, od Balearskog otočja do Grčke, u razdoblju između 2008. i 2014. godine. Događaji su se pojavljivali od zapada prema istoku, prateći gibanje atmosferskih ciklonalnih sustava. Šepić i sur. (2009b) pokazali su da su visokofrekventne oscilacije u južnom Jadranskom moru u 50 % slučajeva povezane s balearskim meteorološkim tsunamijima u razdoblju od 1975. do 1998. godine. Dakle, navedene studije utvrdile su sinkronicitet meteoroloških tsunamija na regionalnoj razini.

U ovoj disertaciji sinkronicitet ekstremnih epizoda visokofrekventnih oscilacija kvantificiran je indeksom na globalnoj razini. Epizode su najčešće sinkrone u sjevernom umjerenom pojasu (30-60° sjeverne geografske širine) i južnom suptropskom i umjerenom pojasu (20-40° južne geografske širine). Indeks sinkroniciteta (za radijus od 250 km) u umjerenom pojasu ima srednju vrijednost (medijan) između 20 % i 32 %, što je u skladu s navedenim regionalnim studijama Sredozemnog mora. Sinkronicitet izraženih epizoda je daleko više dokumentiran kroz istraživanja visokofrekventnih oscilacija u sjevernim umjerenim područjima u odnosu na južna područja. Na primjer, meteorološki tsunami koji je pogodio portugalsku obalu 2010. godine i pojavio se na više lokacija udaljenih nekoliko stotina kilometara proučavali su Kim i Omira (2021). Nadalje, meteorološki tsunami 2017. godine koji je zadesio turističke plaže diljem obale Sjevernog mora i La Mancha istraživan je od strane autora Sibley i sur. (2021). Uzastopne pojave meteoroloških tsunamija zabilježene su i u Australiji (Pattiaratchi and Wijeratne, 2014), na istočnoj obali SAD-a (Pasquet i sur., 2013), u zapadnoj Europi (Williams i sur., 2019b), itd.

Primjena indeksa sinkroniciteta moguća je u sustavima upozorenja na meteorološke tsunamije. Primjerice, Marcos i sur. (2009) dokumentirali su pojavu izraženih oscilacija na postaji smještenoj na otoku Mallorca otprilike 40 min prije pojave u luci Ciutadella na otoku Menorca, žarištu meteoroloških tsunamija poznatijih u ovim područjima pod imenom *rissaga*. Autori stoga predlažu da se mjerenja na toj postaji mogu koristiti u sustavima upozorenja za predikcije fenomena *rissaga* u Ciutadelli. Na sličan način, postaje s visokim indeksom sinkroniciteta mogu se koristiti za kvalitativne ili kvantitativne predikcije meteoroloških tsunamija, pri tome uzimajući u obzir mjerenja s više okolnih postaja za dobivanje takvih procjena.

## **5. GLOBALNA POVEZANOST VISOKFREKVENTNIH OSCILACIJA RAZINE MORA S ATMOSFERSKIM UVJETIMA**

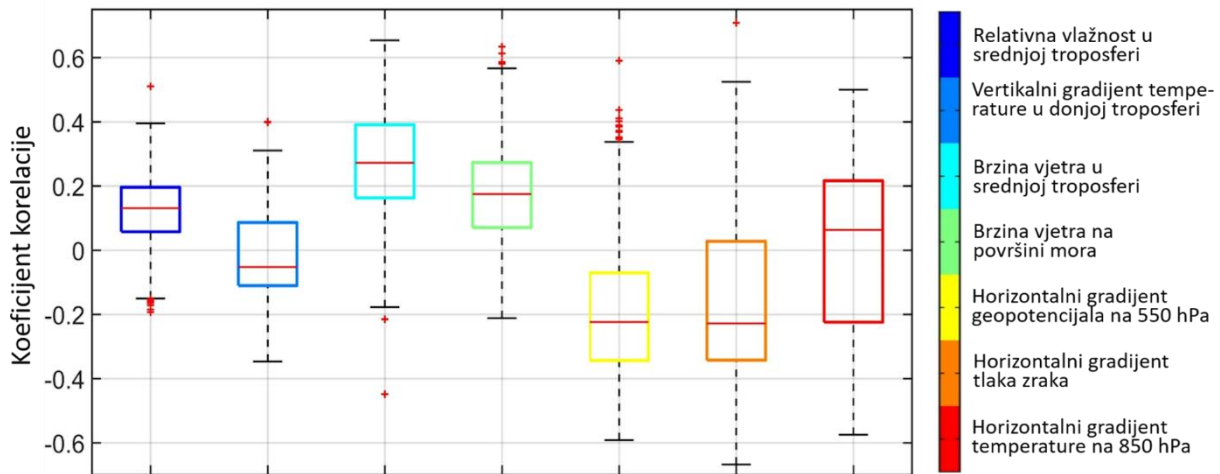
Meteorološki tsunamiji, kao i ostale slabije i umjerene visokofrekventne oscilacije razine mora koje nisu seizmičkog porijekla, izazvane su procesima u atmosferi. Razne studije dokumentirale su nagle poremećaje tlaka zraka ili promjene brzine vjetra tijekom meteoroloških tsunamija na određenim lokacijama (Churchill i sur., 1995; Candela i sur., 1999; Šepić i sur., 2016b), a klimatološke studije na većim područjima i duljim razdobljima zabilježile su pojavu karakteristične sinoptičke situacije tijekom izraženih oscilacija razine mora (Šepić i sur., 2015b; Williams i sur., 2021a). Stoga se, nakon detaljne analize karakteristika visokofrekventnih oscilacija razine mora na globalnoj razini, u nastavku istražuje njihova povezanost sa sinoptičkim atmosferskim poljima. U ovom poglavlju disertacije proučavaju se korelacije pojedinih sinoptičkih varijabli s rasponima visokofrekventnih oscilacija razine mora i konstruira se sinoptički indeks s optimalnom kombinacijom varijabli koje opisuju atmosferske uvjete na sinoptičkoj skali iznad promatranih postaja tijekom umjerenih i izraženih visokofrekventnih oscilacija razine mora.

### **5.1. Povezanost visokofrekventnih oscilacija razine mora sa sinoptičkim varijablama**

Kako bi se utvrdila povezanost visokofrekventnih oscilacija razine mora sa sinoptičkim varijablama, proučavane su njihove međusobne korelacije na svakoj od postaja zasebno i utvrđivani su zajednički obrasci ponašanja na regionalnoj i globalnoj skali (Zemunik i sur., 2022b). Korelacije između raspona visokofrekventnih oscilacija razine mora i svake pojedine sinoptičke varijable iznad točke mreže najbliže mareografskoj postaji na visini uzduž vertikalnog profila za koju je postignuta maksimalna korelacija su prikazane na slikama 25 i 26.

Korelacija s brzinom vjetra u srednjoj troposferi je pozitivna gotovo na svim obalama s medijanom 0.27 (slika 25). Najveće korelacije su ostvarene u područjima Sredozemnog mora, sjeverne Europe, zapadnog Japana, južne Australije, zapadne obale Sjeverne Amerike i južnog Čilea, a najmanje i ponegdje negativne korelacije su uglavnom zastupljene u tropskim područjima (slika 26a). Globalni obrasci ponašanja su evidentni – korelacije rastu prema umjerenim pojasevima gdje su vjetrovi u srednjoj troposferi stalni i imaju izražene brzine tijekom ekstremnih visokofrekventnih oscilacija, za razliku od tropskih područja za koja su ostvarene manje korelacije zbog odsustva mlazne struje u srednjoj troposferi (Lee, 1999), uz već dokumentirani manji raspon visokofrekventnih oscilacija razine mora (poglavlje 4). Ovaj

zaključak je u skladu s prethodnim studijama koje su prepoznale vjetar u srednjoj troposferi kao ključni faktor za generiranje i dugotrajnost poremećaja odgovornih za nastanak ekstremnih visokofrekventnih oscilacija razine mora (Šepić i sur., 2015b; Vilibić i Šepić, 2017).



**Slika 25.** Koeficijent korelacije između raspona visokofrekventnih oscilacija razine mora i pojedinih sinoptičkih varijabli.

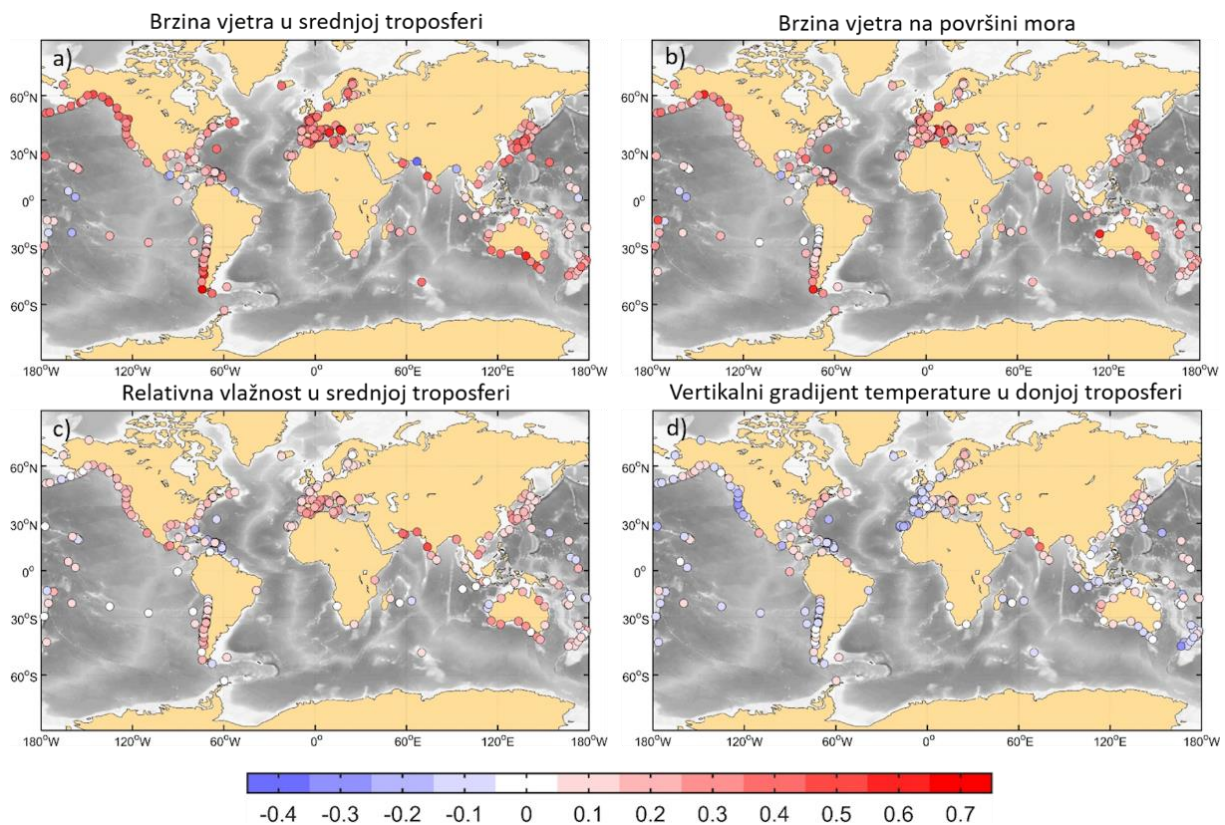
Korelacija s brzinom površinskog vjetra je nešto slabija, između -0.21 i 0.63 s medijanom 0.17 (slika 25). Korelacije su manje nego u slučaju varijable brzine vjetra u srednjoj troposferi, ali imaju sličnu prostornu razdiobu (slika 26b).

Sljedeća promatrana varijabla je relativna vlažnost u srednjoj troposferi koja opisuje stabilnost mlazne struje. Korelacije se kreću između -0.19 i 0.51 s medijanom 0.13 (slika 25) i sličnom prostornom razdiobom kao za prethodne dvije varijable (slika 26c). Potonje implicira da su visokofrekventne oscilacije razine mora izraženije u slučajevima kada je mlazna struja u srednjoj troposferi nestabilna, odnosno sadrži veću količinu vlage.

Korelacije s vertikalnim gradijentom temperature u donjoj troposferi (na plohama udaljenim 50 hPa) su na gotovo istom broju postaja pozitivne i negativne, variraju u vrijednostima od -0.35 do 0.4 s medijanom -0.05 (slika 25), nešto manje nego kod ostalih promatranih sinoptičkih varijabli. Korelacije s pozitivnim predznakom označavaju da se tijekom porasta raspona visokofrekventnih oscilacija viši slojevi donje troposfere zagrijavaju, a niži slojevi hlade, što može ukazivati na temperaturnu inverziju. Zanimljivo je da su korelacije uglavnom pozitivne na istočnim obalama i negativne na zapadnim obalama mora i oceana, otkrivajući različite temperaturne uvjete povezane s visokofrekventnim oscilacijama (slika 26d). Na zapadnoj obali SAD-a korelacije su uglavnom negativne, uz iznimku Aljaske



koja ima blage pozitivne vrijednosti. Negativne korelacije su također prisutne na obalama Čilea, Novog Zelanda i duž zapadnog Sredozemnog mora i zapadne i sjeverne Europe, dok pozitivne vrijednosti prevladavaju u istočnom Sredozemnom moru, Baltičkom moru i duž istočne obale Japana.

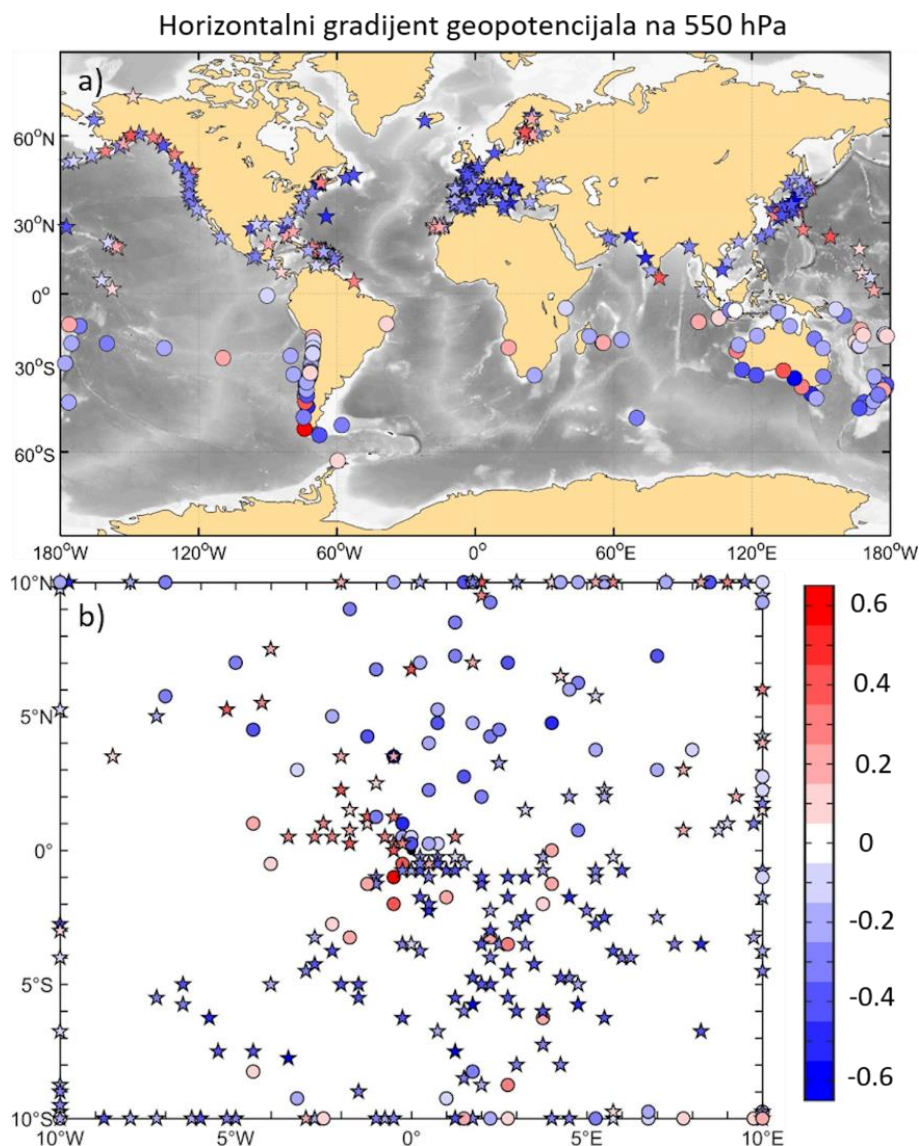


**Slika 26.** Prostorna razdioba maksimalne korelacije između raspona visokofrekventnih oscilacija razine mora i a) brzine vjetra u srednjoj troposferi, b) brzine vjetra na površini mora, c) relativne vlažnosti u srednjoj troposferi i d) vertikalnog gradijenta temperature u donjoj troposferi.

Korelacije su izračunate i za horizontalne gradijente sinoptičkih varijabli na određenim visinama, gdje su gradijenti izračunati kao razlika varijable u točki najbližoj mareografskoj postaji i nekoj drugoj točki unutar pravokutnog područja oko postaje za koju je postignuta najveća korelacija s visokofrekventnim oscilacijama razine mora. Treba naglasiti da se za sljedeće tri varijable promatraju gradijenti njihovih vrijednosti u prostoru, a ne vrijednosti u jednoj točki. Stoga, negativna korelacija označava da, kada raspon visokofrekventnih oscilacija na postaji raste, vrijednost sinoptičke varijable raste u određenoj točki u okolini postaje, a pada u točki postaje. Suprotno tome, pozitivna korelacija označava da, kada raspon visokofrekventnih oscilacija na postaji raste, vrijednost sinoptičke varijable u točki postaje

raste, a pada u točki u okolici postaje. Bez obzira na sličnost i povezanost (koreliranost) pojedinih sinoptičkih varijabli, kao što su npr. brzina vjetera i horizontalni gradijent geopotencijala u srednjoj troposferi, odnosno brzina površinskog vjetera i gradijent površinskog tlaka, korištenje ovako definiranih varijabli nema za cilj opisivanje samih procesa već maksimiziranje računatih korelacija, te omogućavanje primjene navedenih odnosa u operativne ili slične svrhe (vidi poglavlje 5.4).

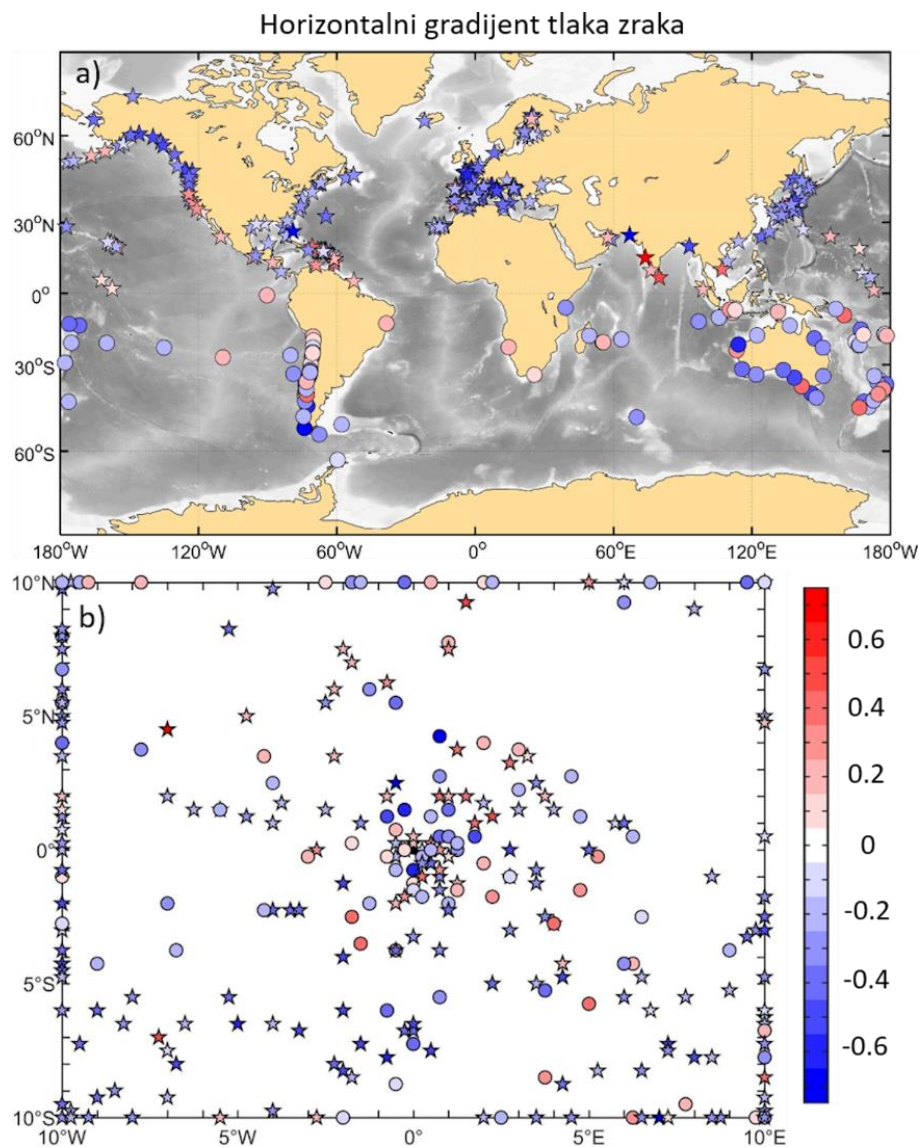
Vrijednosti korelacija između raspona visokofrekventnih oscilacija i horizontalnog gradijenta geopotencijala na visini od 550 hPa ukazuju na prisustvo intenzivnih prostornih gradijenata geopotencijala u srednjoj troposferi tijekom izraženih oscilacija razine mora (slika 27a). Slika 27b pokazuje da su najsnažnije korelacije postignute na liniji koja se proteže u smjeru jugoistok-sjeverozapad od položaja mareografske postaje. Pretpostavimo li da je strujanje zraka određeno geostrofičkom ravnotežom, možemo zaključiti da su visokofrekventne oscilacije povezane s jugozapadnim strujanjem na sjevernoj hemisferi i sa zapadnim-sjeverozapadnim strujanjem na južnoj hemisferi. Kao i za vjetar u srednjoj troposferi, korelacije su najviše u umjerenim pojasevima, a slabije u tropskim i suptropskim pojasevima, no generalno s nižim vrijednostima u odnosu na korelacije s vjetrom u srednjoj troposferi (slika 25). Negativne korelacije na istočnoj obali SAD-a su grupirane istočno od referentne postaje, dok je za postaje u Sredozemnom moru grupiranje prema jugoistoku (grupiranje po područjima nije naznačeno na slici). To implicira da su visokofrekventne oscilacije u oba područja povezane sa sustavima visokog geopotencijala koji se protežu prema istoku ili jugoistoku. Grupa točaka u blizini referentne postaje na slici 27b odgovara postajama sa zapadne obale SAD-a, što ukazuje na to da su visokofrekventne oscilacije u ovom području uglavnom povezane sa sinoptičkim sustavima u blizini istraživanog područja.



**Slika 27.** a) Prostorna razdioba maksimalne korelacije između raspona visokofrekventnih oscilacija razine mora i horizontalnog gradijenta geopotencijala na 550 hPa između točke najbliže mareografskoj postaji i točke u pravokutniku  $[-10^{\circ}, 10^{\circ}] \times [-10^{\circ}, 10^{\circ}]$  geografske širine i duljine sa središtem u postaji za koju je postignuta maksimalna korelacija i b) položaj točke u kojoj je ostvarena maksimalna korelacija u odnosu na položaj postaje (s koordinatama  $0^{\circ}, 0^{\circ}$ ). Zvezdice označavaju postaje na sjevernoj hemisferi, a kružići postaje na južnoj hemisferi.

Sljedeća promatrana varijabla je horizontalni gradijent tlaka zraka pri razini mora. Različiti predznaci korelacija ukazuju na postizanje maksimalne korelacije s visokofrekventnim oscilacijama razine mora u smjeru prema ili od središta ciklone (slika 28). Na sjevernoj hemisferi ciklone se uglavnom protežu sjeverno-sjeverozapadno od postaje (slika 28b), što je u skladu s regionalnim studijama visokofrekventnih oscilacija razine mora u Sredozemnom

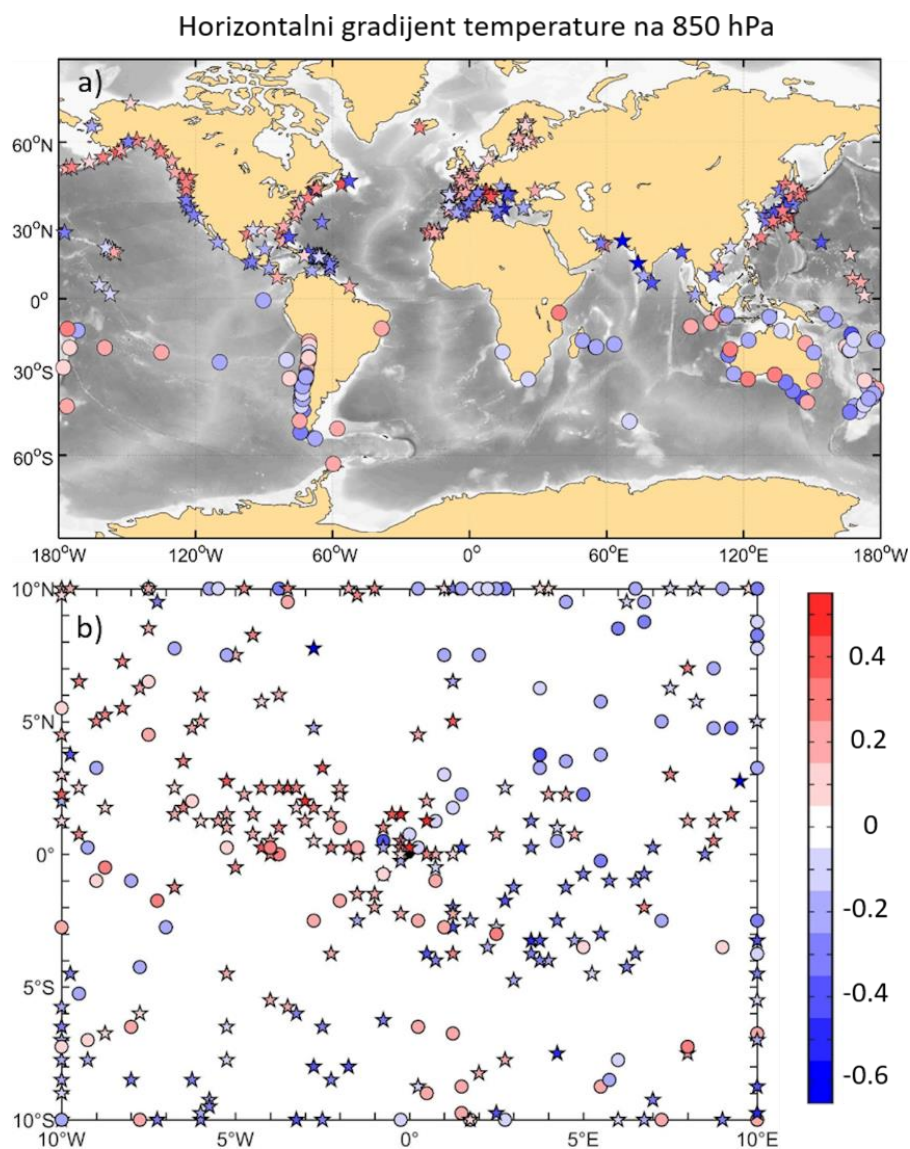
moru (Šepić i sur., 2015b). Za japanske postaje, najveće korelacije su dobivene u točkama na zapadnom rubu promatranog pravokutnog područja, dok se za čileanske postaje najveća korelacija ostvaruje u blizini referentne postaje (grupiranje po područjima nije naznačeno na slici). Ovo implicira da su pojave visokofrekventnih oscilacija razine mora u Japanu povezane sa sinoptičkim sustavima koji se protežu do tisuću kilometara prema zapadu, dok su u Čileu povezane sa sustavima koji se nalaze u blizini postaje sa zabilježenim oscilacijama. Postaje na zapadnoj obali SAD-a ostvarile su najveće korelacije prema jugoistoku, dakle u smjeru od središta ciklone.



**Slika 28.** Kao na slici 27, ali za horizontalni gradijent tlaka zraka pri razini mora.

Nešto slabije maksimalne korelacije, do 0.57, su ostvarene između visokofrekventnih oscilacija razine mora i gradijenta temperature na visini od 850 hPa (slika 29). Maksimalne korelacije se postižu kada je hladni zrak smješten sjeverozapadno i topli zrak jugoistočno od

referentne postaje na sjevernoj hemisferi, dok je oprečna situacija uobičajena na južnoj hemisferi, s toplim zrakom sjeveroistočno i hladnim zrakom jugozapadno od postaje (slika 29b). Visokofrekventne oscilacije na istočnoj obali SAD-a uglavnom su povezane s područjima niže temperature smještenima zapadno-sjeverozapadno od promatrane postaje (grupiranje po područjima nije naznačeno na slici). U Sredozemnom moru dva su slučaja – u istočnom i zapadnom dijelu najveće korelacije su ostvarene kad se područje više temperature proteže jugoistočno od postaje, dok je u središnjem dijelu to ostvareno kad je područje niže temperature na sjeverozapadu.



**Slika 29.** Kao na slici 27, ali za horizontalni gradijent temperature na 850 hPa.

## 5.2. Sinoptički uvjeti tijekom ekstremnih epizoda

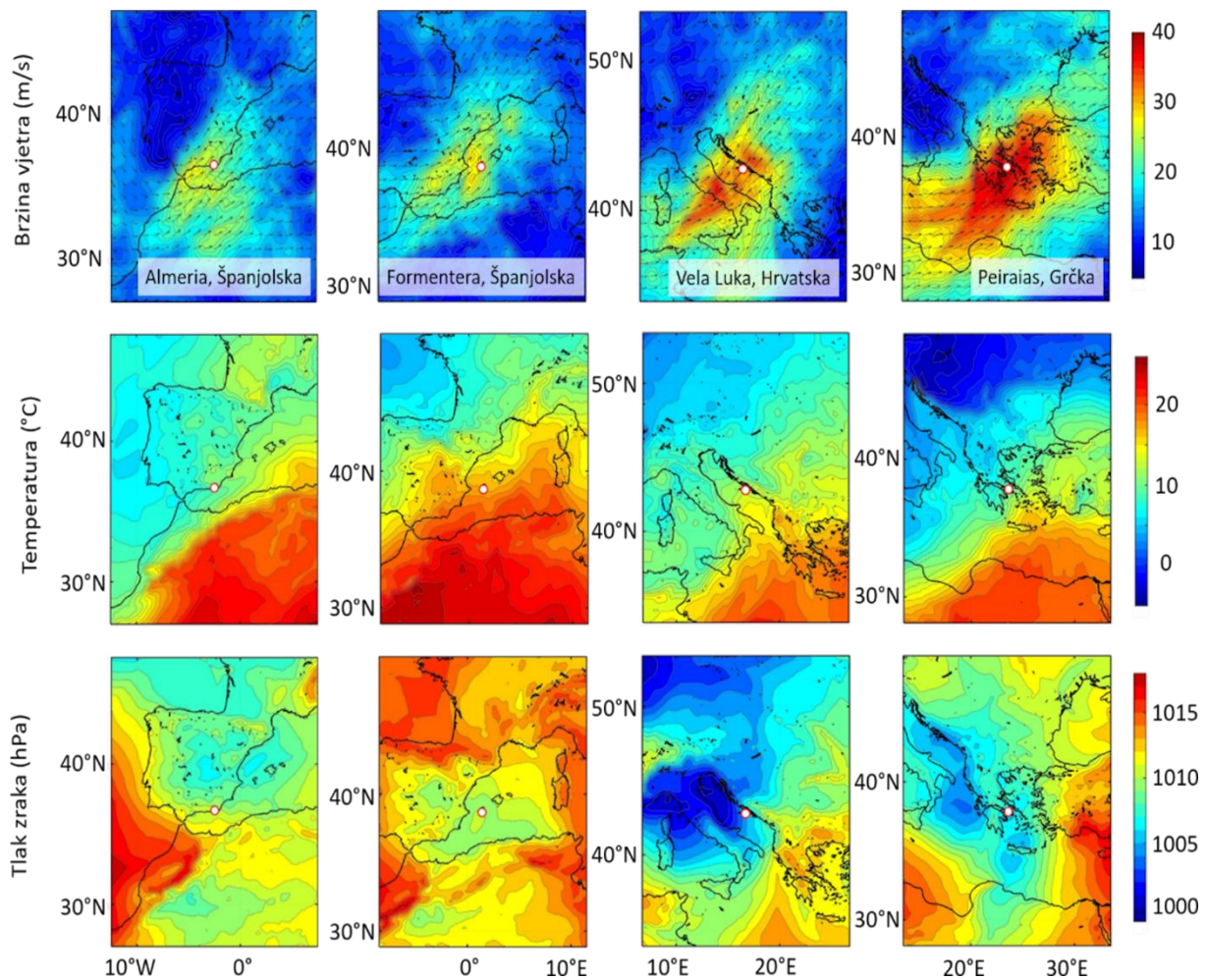
U ovom poglavlju ispitivani su sinoptički uvjeti tijekom pojava ekstremnih epizoda visokofrekventnih oscilacija razine mora. Za testni slučaj korištene su postaje iz Sredozemnog mora, za koje su korelacije sinoptičkih varijabli s rasponima visokofrekventnih oscilacija u ovom području bile značajne. Slika 30 pokazuje sinoptičke uzorke polja vjetra na visini od 550 hPa, tlaka zraka pri razini mora i temperature na visini od 850 hPa dobivene usrednjavanjem preko deset ekstremnih epizoda na četiri kvadratna područja dimenzija 20 stupnjeva geografske širine i dužine sa središtima u promatranim postajama. Postaje se nalaze na lokacijama (i) Almeria, Španjolska, (ii) Formentera, Španjolska, (iii) Vela Luka, Hrvatska, te (iv) Peiraias, Grčka.

Tijekom ekstremnih epizoda zabilježenih na postaji u Almeriji, jaki jugozapadni vjetrovi na visini od 550 hPa su postizali prosječne brzine od 28 m/s iznad Gibraltarskih vrata. Osim s mlaznom strujom u srednjoj troposferi, ekstremne oscilacije razine mora su povezane sa sustavom niskog tlaka zraka s centrom iznad središnjeg dijela Pirinejskog poluotoka, a koji se proteže preko cijelog promatranog područja. Prodor toplog zraka u donjoj troposferi na visini od 850 hPa je vidljiv iznad sjeverozapadnog dijela Afrike s temperaturama preko 21°C i termalnom frontom koja prati sjevernu obalu Afrike u smjeru od jugozapada prema sjeveroistoku.

Sinoptički uzorci povezani s ekstremnim visokofrekventnim oscilacijama u Formenteri su vrlo slični onima u Almeriji. Blaga ciklona s minimumom oko postaje sličnog je intenziteta i veličine kao za oscilacija razine mora u Almeriji. Položaj mlazne struje u srednjoj troposferi je paralelan obali Španjolske na Sredozemnom moru, dok je maksimum brzine vjetra u prosjeku od 29 m/s bilježen zapadno od same postaje, s jugozapadnim smjerom. Termalna fronta na visini od 850 hPa pruža se iznad središnjeg dijela Španjolske i dalje prati obalu Francuske.

Sinoptički uvjeti tijekom ekstremnih epizoda na trećoj promatranoj postaji, u Veloj Luci, su karakterizirani intenzivnom ciklonom smještenom na sjeveru Italije. Ciklona je smještena sjeverozapadno od postaje. Mlazna struja u srednjoj troposferi ima snažnije jugozapadne vjetrove u odnosu na one u Almeriji i Formenteri, s prosječnom brzinom do 36 m/s, te se pruža okomito na Apeninski poluotok, od Tunisa do središnjeg dijela Balkanskog poluotoka. Termalna fronta na visini od 850 hPa pruža se u smjeru od jugozapada prema sjeveroistoku i paralelna je s mlaznom strujom te se nalazi na njenom jugoistočnom perifernom dijelu.

U najistočnijem promatranom području, oko postaje Peiraias, ekstremne epizode visokofrekventnih oscilacija se javljaju u uvjetima snažnih vjetrova u srednjoj troposferi koji dosežu prosječnu brzinu od 40 m/s. Ostale karakteristike (minimum tlaka zraka smješten iznad postaje ili prema sjeverozapadu i termalna fronta na visini od 850 hPa orijentirana u smjeru jugozapad-sjeveroistok te smještena na jugoistočnom dijelu mlazne struje) su slične kao i u drugim promatranim područjima.



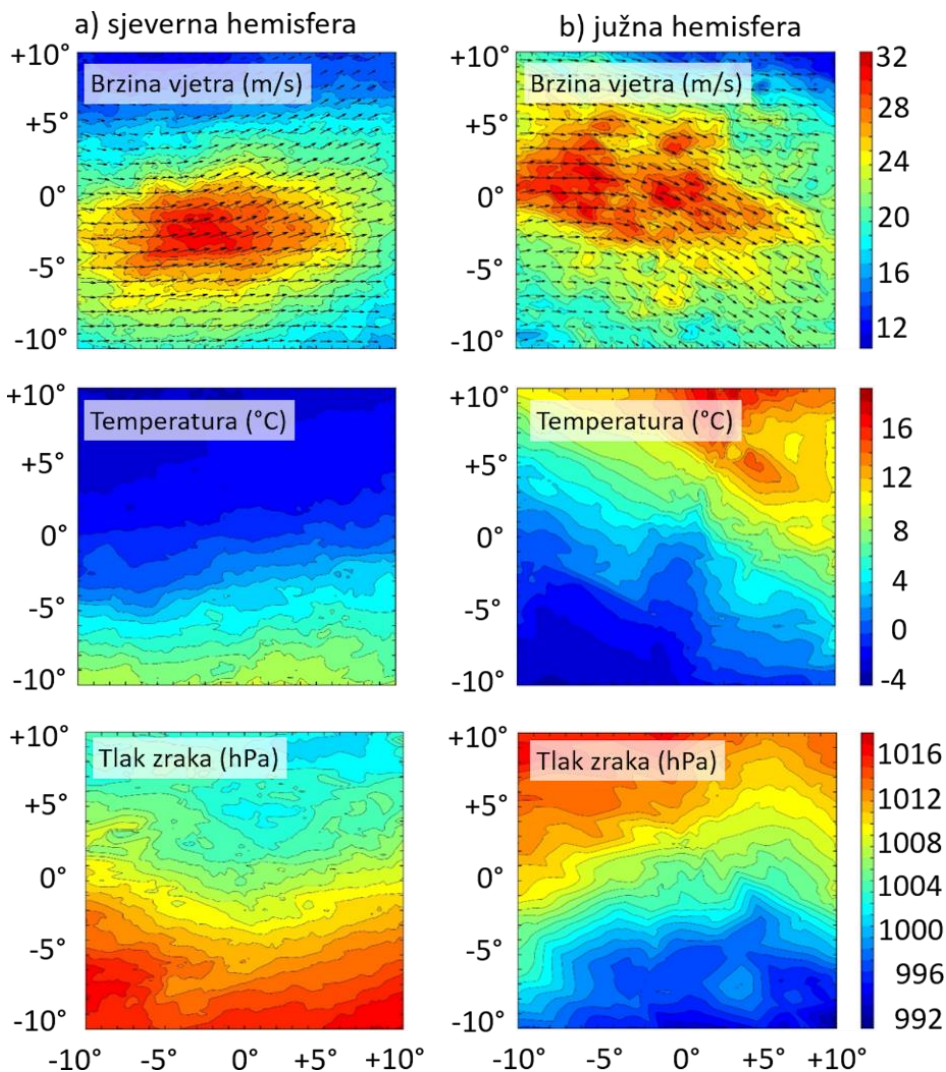
**Slika 30.** Brzina i smjer vjetra na visini od 550 hPa, temperatura na 850 hPa i tlak zraka usrednjeni po ekstremnim epizodama visokofrekventnih oscilacija razine mora na postajama u Sredozemnom moru: Almeria (Španjolska), Formentera (Španjolska), Vela Luka (Hrvatska) i Peiraias (Grčka).

Analiza sinoptičkih situacija na područjima oko postaja u Sredozemnom moru pokazuje da se brzine mlaznih struja u srednjoj troposferi tijekom meteoroloških tsunamija razlikuju. Ova razlika proizlazi iz činjenice da se rezonantni prijenos energije iz atmosfere u more događa na različitim dubinama ispred obala i stoga brzine valova koje su izjednačene s brzinama mlaznih

struja u teoriji zarobljavanja valova mogu varirati (Lindzen i Tung, 1976; Monserrat i Thorpe, 1996). Unatoč razlici u brzini vjetra u srednjoj troposferi, sinoptički uzorci tijekom ekstremnih epizoda su vrlo slični diljem Sredozemnog mora i razlikuju se samo u intenzitetu i preciznoj lokaciji središta mlaznih struja i ciklona, što je u skladu s prethodnim studijama regionalnih meteoroloških tsunamija u Sredozemnom moru (Šepić i sur., 2015b).

Postavlja se pitanje pojavljuju li se ovakvi sinoptički uzorci tijekom meteoroloških tsunamija u ostatku svijeta. Pokušavajući odgovoriti na ovo pitanje, proučavana je – odvojeno na sjevernoj i na južnoj hemisferi - prosječna sinoptička situacija tijekom ekstremnih visokofrekventnih oscilacija za postaje koje imaju korelaciju između raspona oscilacija i brzine vjetra u srednjoj troposferi veću od 0.4. Ovaj kriterij je odabran jer je vjetar u srednjoj troposferi prepoznat kao ključni faktor pri generiranju visokofrekventnih oscilacija i sugerira mehanizam zarobljavanja valova kao dominantni proces za propagiranje atmosferskih poremećaja koji pogoduju nastanku takvih oscilacija (Tanaka i sur., 2010; Šepić i sur., 2015a, b; Vilibić i Šepić, 2017). Oko 20 % postaja zadovoljava definirani kriterij, i to 27.1 % od svih postaja sa sjeverne hemisfere i 11.3 % od postaja s južne hemisfere. Slika 31 prikazuje mlazne struje u srednjoj troposferi prisutne tijekom ekstremnih visokofrekventnih oscilacija razine mora na obje hemisfere, koje se protežu u smjeru od zapada-jugozapada do istoka-sjeveroistoka na sjevernoj hemisferi te od sjeverozapada do jugoistoka na južnoj hemisferi. Prosječna brzina vjetra na svim postajama i tijekom svih epizoda doseže 32 m/s, s maksimumom odmaknutim prema zapadu od referentne postaje. Na obje hemisfere sustavi niskog tlaka zraka su smješteni u smjeru polova od referentnih postaja, odnosno sjevernije od postaje na sjevernoj hemisferi i južnije od postaje na južnoj hemisferi. Nadalje, termalne fronte u donjoj troposferi smještene su na perifernom dijelu mlaznih struja i snažnije su na južnoj hemisferi (slika 31b). Intenzitet ciklona i povezanih hladnih fronti je veći na južnoj hemisferi, u odnosu na sjevernu.





**Slika 31.** Brzina i smjer vjetra na visini od 550 hPa, temperatura na 850 hPa i tlak zraka usrednjeni po ekstremnim epizodama visokofrekventnih oscilacija razine mora na postajama koje imaju korelaciju između brzine vjetra u srednjoj troposferi i raspona visokofrekventnih oscilacija veću od 0.4 na a) sjevernoj i b) južnoj hemisferi.

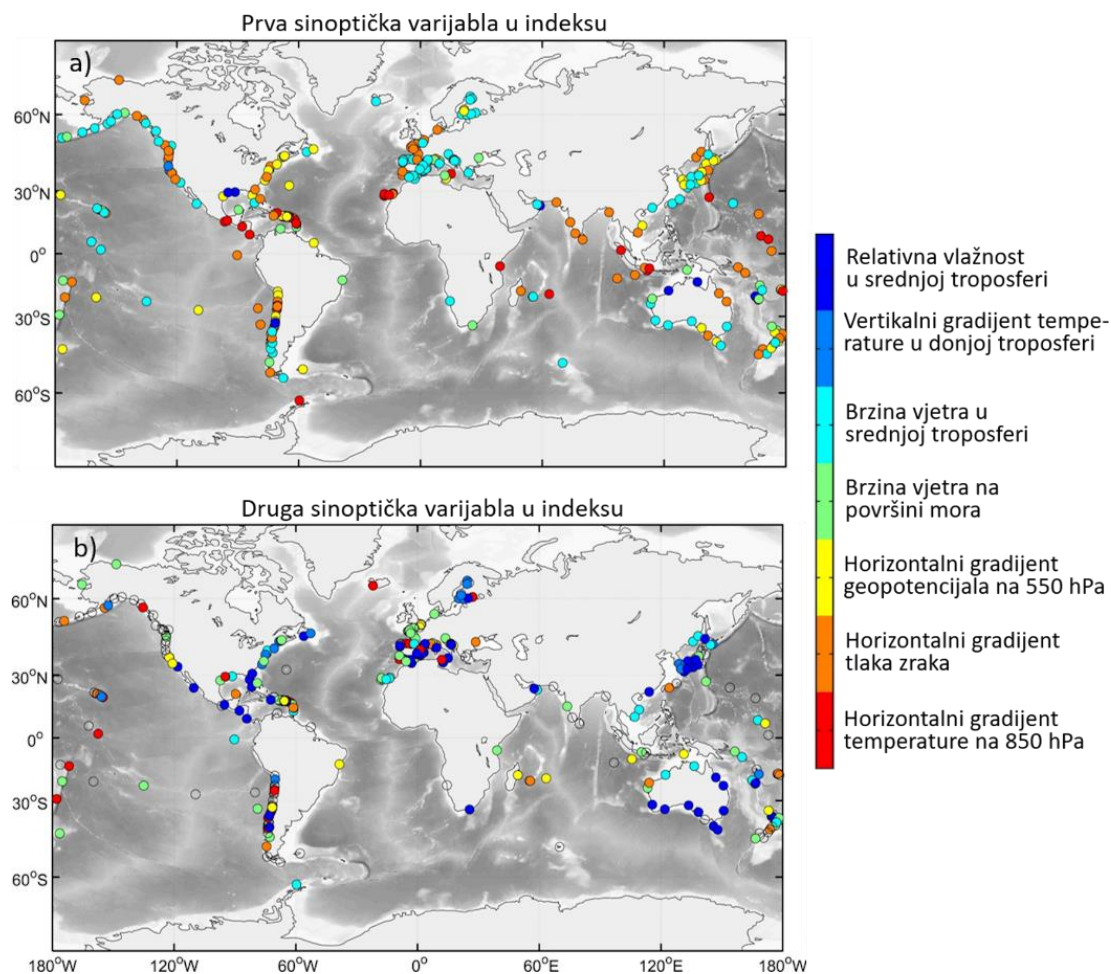
### 5.3. Sinoptički indeks

U ovom poglavlju prezentiran je i analiziran sinoptički indeks te njegova korelacija s visokofrekventnim oscilacijama razine mora na pojedinim postajama. Slika 32 prikazuje prvu i drugu sinoptičku varijablu koje su izabrane za konstrukciju globalnog sinoptičkog indeksa  $\mu$ . Vidljivo je da je brzina vjetra u srednjoj troposferi najčešći izbor za prvu varijablu u indeksu, na otprilike trećini svih postaja, jer ima najveću korelaciju s rasponima visokofrekventnih oscilacija razine mora od svih promatranih sinoptičkih varijabli. Osobito je dominantan na zapadnoj obali Sjeverne Amerike, u većem dijelu Sredozemnog i Baltičkog mora i u južnim dijelovima Japana, Australije i Čilea. Sva područja se nalaze u umjerenim pojasovima u kojima

je korelacija ove varijable s rasponom oscilacija generalno najveća. Sljedeća varijabla koja je najviše puta izabrana kao prva varijabla u sinoptičkom indeksu je horizontalni gradijent tlaka zraka koji opisuje površinske ciklone u okolini postaje sa zabilježenim oscilacijama. Ova varijabla je uglavnom izabrana u umjerenom i ekvatorijalnom pojasu na ukupno 28 % postaja.

Interesantno je da pojedine postaje u sjevernoj Europi, sjevernom Japanu, Čileu i ponajviše na zapadnoj obali Sjeverne Amerike imaju samo jednu varijablu u sinoptičkom indeksu (slika 32), jer dodavanje druge varijable ne povećava korelaciju s rasponom visokofrekventnih oscilacija za više od 0.01. Ukupno 32 % postaja ima samo jednu varijablu u indeksu. Na preostalim postajama najčešće izabrana druga varijabla u sinoptičkom indeksu je relativna vlažnost u srednjoj troposferi (slika 32b). Štoviše, među postajama kojima je prva varijabla u indeksu brzina vjetra u srednjoj troposferi, njih 57 % ima relativnu vlažnost srednje troposfere izabranu za drugu varijablu. Dakle, nestabilna mlazna struja u srednjoj troposferi je povezana s visokofrekventnim oscilacijama razine mora na velikom broju postaja, što može ukazivati na dominaciju mehanizma zarobljavanja atmosferskih težinskih valova u donjoj troposferi.

Sumarno, brzina vjetra u srednjoj troposferi je uključena u sinoptički indeks na više od pola postaja (tablica 6), najviše od svih varijabli. Slijede je horizontalni gradijent tlaka zraka i brzina vjetra na površini mora. Nadalje, indeks uključuje varijable relativne vlažnosti u srednjoj troposferi te horizontalnog gradijenta geopotencijala u srednjoj troposferi, kao i horizontalnog gradijenta temperature u donjoj troposferi – navedene varijable se koriste na otprilike podjednakom broju postaja, nešto manje od trećine ukupnog broja. Vertikalni gradijent temperature u donjoj troposferi je najrjeđe korištena varijabla u sinoptičkom indeksu, na svega 12 % postaja.



**Slika 32.** Prostorna razdioba a) prve i b) druge sinoptičke varijable izabrane za konstrukciju sinoptičkog indeksa. Postaje koje imaju samo jednu sinoptičku varijablu u indeksu označene su praznim kružićem na b).

**Tablica 6.** Postotak korištenja sinoptičkih varijabli u sinoptičkom indeksu.

Sinoptička varijabla	% korištenja u $\mu$
<i>Brzina vjetra u srednjoj troposferi</i>	53.75 %
<i>Horizontalni gradijent tlaka zraka</i>	42.02 %
<i>Brzina vjetra na površini mora</i>	32.25 %
<i>Relativna vlažnost u srednjoj troposferi</i>	30.94 %
<i>Horizontalni gradijent geopotencijala na 550 hPa</i>	30.29 %
<i>Horizontalni gradijent temperature na 850 hPa</i>	27.69 %
<i>Vertikalni gradijent temperature u donjoj troposferi</i>	12.05 %

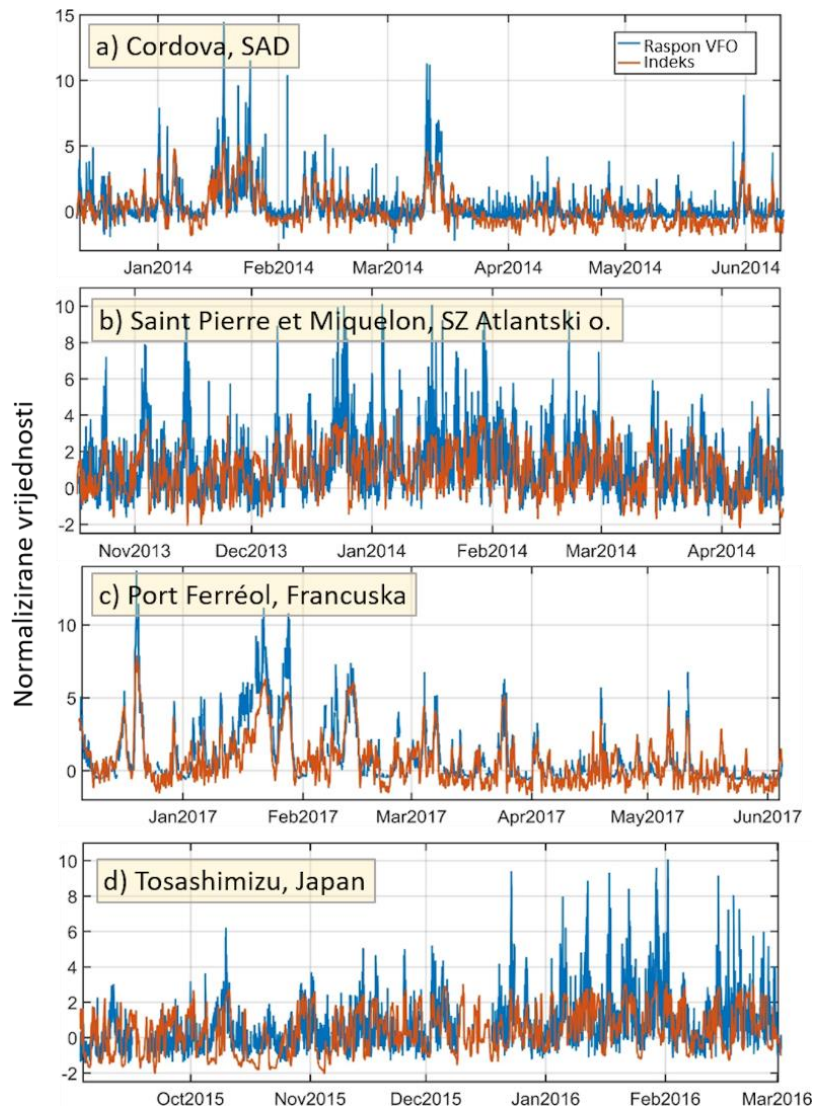
Kako je već navedeno, približno trećina sinoptičkih indeksa na postajama je konstruirana koristeći samo jednu varijablu (tablica 7). Dvije varijable su uključene u indeks na otprilike četvrtini postaja, dok tri varijable sačinjavaju indeks na nešto više od četvrtine postaja. Nadalje,

četiri varijable su korištene na 39 postaja, dok samo pet, odnosno dvije postaje imaju indeks sastavljen od pet, odnosno šest varijabli. Zanimljivo je da nijedna postaja nema indeks koji je sačinjen od svih sedam promatranih sinoptičkih varijabli, što ukazuje na to da kombinacija svih varijabli nije potrebna za opisivanje pojava visokofrekventnih oscilacija na moru.

**Tablica 7.** Postotak korištenja indeksa  $\mu_1$  do  $\mu_7$  kao sinoptičkog indeksa.

$\mu_n$	% od $\mu_n$ u $\mu$
$\mu_1$	31.60 %
$\mu_2$	25.73 %
$\mu_3$	27.69 %
$\mu_4$	12.70 %
$\mu_5$	1.63 %
$\mu_6$	0.65 %
$\mu_7$	0 %

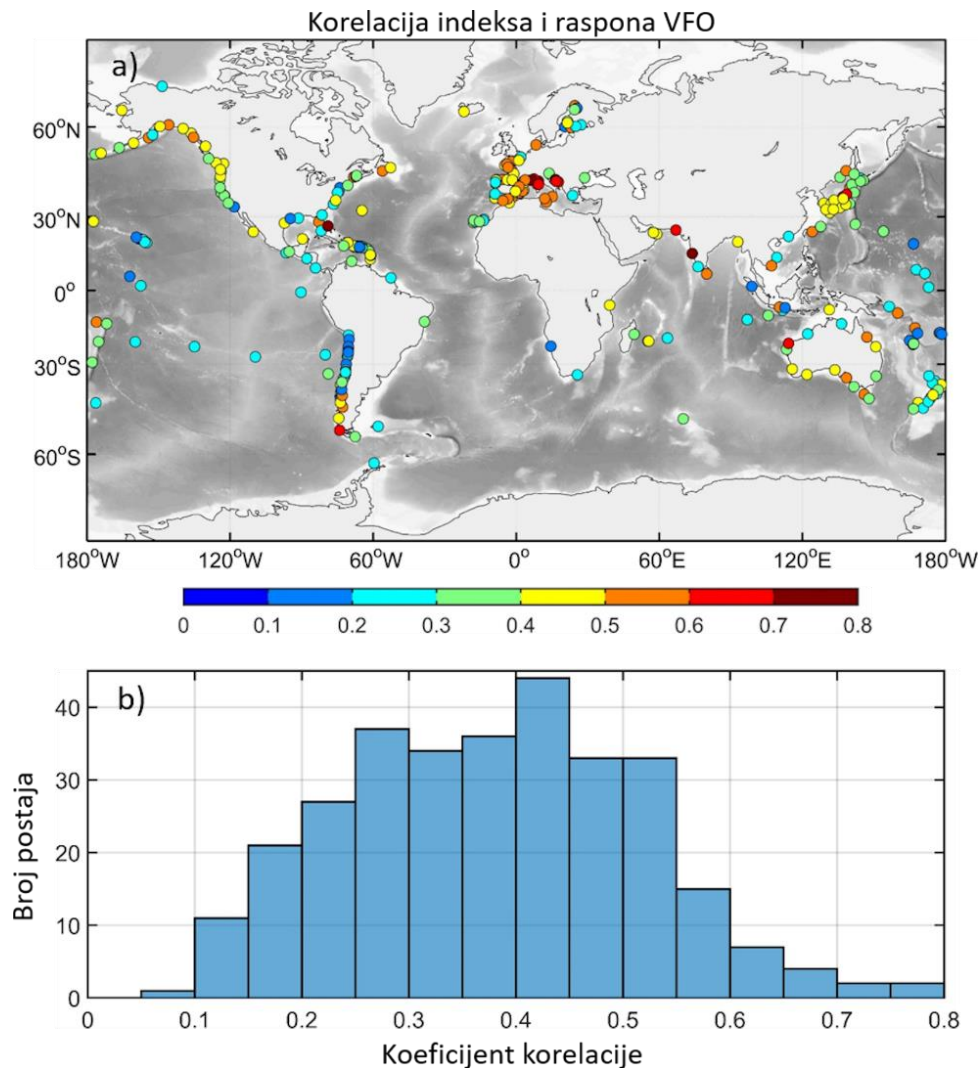
Kako bi se kvantificirala povezanost sinoptičkog indeksa s visokofrekventnim oscilacijama razine mora te utvrdilo reproducira li definirani indeks situaciju na moru napravljena je usporedba njihovih vremenskih nizova te je izračunata korelacija između njih. Slika 33 pokazuje normalizirane vremenske nizove (vrijednostima je oduzet medijan i ta razlika je podijeljena s medijanom apsolutne devijacije) raspona visokofrekventnih oscilacija i sinoptičkog indeksa za razdoblje od šest mjeseci na četiri izabrane postaje koje se nalaze na sljedećim lokacijama: (i) Cordova, zapadna obala SAD-a, (ii) Saint Pierre et Miquelon, sjeverozapadna obala Atlantskog oceana, (iii) Port Ferréol, južna obala Francuske, te (iv) Tosashimizu, južna obala Japana. Nizovi sinoptičkog indeksa i raspona visokofrekventnih oscilacija imaju slični oblik krivulja na sve četiri postaje, no na nekim postajama krivulje se bolje prate, odnosno odstupanja među njima su manja. Primjerice, na postaji Port Ferréol, koja ima jednu od najvećih korelacija između indeksa i visokofrekventnih oscilacija razine mora (0.76), krivulje se relativno dobro podudaraju tijekom promatranog razdoblja, no lokalni maksimumi visine razine mora nisu pravilno popraćeni vrijednostima indeksa. Ovo je još izraženije na ostalim postajama, osobito na postajama Saint Pierre et Miquelon i Tosashimizu, gdje su ostvarene umjerene korelacije između nizova tijekom cijelog razdoblja aktivnosti postaja (0.51 odnosno 0.46).



**Slika 33.** Vremenski nizovi normaliziranog raspona visokofrekventnih oscilacija (VFO) razine mora i normaliziranog sinoptičkog indeksa tijekom razdoblja od jednog mjeseca na postajama (a) Cordova, zapadna obala SAD-a, (b) Saint Pierre et Miquelon, sjeverozapadna obala Atlantskog oceana, (b) Port Ferréol, južna obala Francuske, te (d) Tosashimizu, južna obala Japana.

Korelacija između sinoptičkog indeksa i raspona visokofrekventnih oscilacija razine mora je prikazana na slici 34. Najveće vrijednosti korelacije su postignute na postajama u Sredozemnom moru, gdje uglavnom prelaze 0.5 i dosežu 0.76. Vrijednosti korelacije na zapadnoj obali Sjeverne Amerike i u Japanu su uglavnom homogene i umjerene, između 0.3 i 0.5. Veća varijabilnost korelacija je zastupljena duž istočne obale Sjeverne Amerike te na obalama Čilea i Baltičkog mora. Medijan korelacije na svim postajama iznosi 0.38, no vrijednosti variraju od područja do područja, te od postaje do postaje, i kreću se u intervalu od 0.09 do 0.76. Dakle, različiti iznosi korelacija između definiranog indeksa i visokofrekventnih

oscilacija prisutni su diljem svjetskih obala. Stoga, sinoptički indeks nije optimalno definiran na svih 307 postaja razmatranih u ovoj studiji, a razlozi za to su diskutirani u sljedećem poglavlju.



**Slika 34.** a) Karta postaja i b) distribucija koeficijenta korelacije između raspona visokofrekventnih oscilacija i sinoptičkog indeksa.

#### 5.4. Diskusija

Povezanost između meteoroloških tsunamija i ostalih visokofrekventnih oscilacija razine mora sa specifičnim sinoptičkim uvjetima je u ovoj disertaciji demonstrirana u kvantitativnom smislu za područje cijelog svijeta, dok je do sada ova veza kvantificirana samo za područje Balearskog otočja (Šepić i sur., 2016a). Ustanovljena je povezanost u području cijelog Sredozemnog mora, Japanskog mora, australske obale, južne obale Čilea i zapadne obale Sjeverne Amerike. Štoviše, korelacije visokofrekventnih oscilacija sa sinoptičkim varijablama,

osobito s brzinom vjetra u srednjoj troposferi i na površini mora te s tlakom zraka, su najveće u umjerenom pojasu. Područje s najvećim korelacijama je Sredozemno more. Ovi rezultati su u skladu s prethodnim studijama Sredozemnog mora koje opisuju slične atmosferske uvjete tijekom meteoroloških tsunamija (Belušić i Strelec Mahović, 2009; Šepić i sur., 2009b, 2015a). Stoga, metodologija korištena u ovoj disertaciji je prigodna za globalne studije, no za preciznije rezultate i eventualno njihovo korištenje u operativne svrhe potrebno je provesti detaljnije analize na pojedinim lokacijama, zbog toga što razlike u intenzitetu visokofrekventnih oscilacija i atmosferskim uvjetima variraju od područja do područja. U tropskim područjima su dobivene slabije korelacije visokofrekventnih oscilacija sa sinoptičkim varijablama i definiranim indeksom, što sugerira da metodologija nije pogodna za ova područja, no kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, visokofrekventne oscilacije tamo imaju manji intenzitet.

Potrebno je naglasiti da se izbor sinoptičkih varijabli korištenih u ovoj disertaciji uglavnom oslanja na sinoptičke varijable koje opisuju atmosferske uvjete prethodno utvrđene i prepoznate tijekom pojava meteoroloških tsunamija u Sredozemnom moru. Navedeno se može smatrati nedostatkom metodologije zato što se atmosferski uvjeti tijekom meteoroloških tsunamija mogu razlikovati od područja do područja. Primjerice, mehanizam koji je prepoznatljiv tijekom meteoroloških tsunamija u Sredozemnom moru je zarobljavanje valova ispod nestabilne mlazne struje u srednjoj troposferi, čime se omogućava propagiranje poremećaja bez slabljenja njegovog intenziteta. No, mlazna struja se može nalaziti na različitim visinama srednje troposfere u različitim područjima, stoga izbor visine na kojoj se proučava brzina vjetra može biti ključan. Zbog ove činjenice testirane su korelacije visokofrekventnih oscilacija sa sinoptičkim varijablama na različitim visinama i pokazano je da promjene u visini ne mijenjaju značajno korelacije. Jedan od razloga za to je što mehanizam zarobljavanja valova oblikuje cijeli profil vjetra, od površine do srednje troposfere (Lindzen i Tung, 1976; Monserrat i Thorpe, 1996). No, postoje drugi mehanizmi, kao što su udvajanje atmosferskog vala i konvektivnog oblaka, fronte ili kvazi-linearni konvektivni sustavi, koji su također povezani s pojavom visokofrekventnih oscilacija u nekim područjima (npr. Velika jezera, Bechle i sur., 2016; obala Čilea, Vilibić i Šepić, 2017; sjeverozapadna Europa, Williams i sur., 2021a). Nadalje, procesi koji generiraju poremećaje pogodne za pobudu meteoroloških tsunamija se i dalje istražuju, a osobito čimbenici orografije i konvekcije. Osim studije autora Denamiel i sur. (2022), koja pokazuje da orografija ne utječe na intenzitet meteoroloških tsunamija u Jadranskom moru, ni jedna studija do sada nije kvantificirala utjecaj orografije na ovu vrstu oscilacija razine mora. Konvekcija također može biti rezultat tropskih ciklona i uragana, čije

periferne oluje i kiše mogu također izazvati meteorološke tsunamije (Shi i sur., 2020). Međutim, tropske ciklone su karakterizirane drugačijim sinoptičkim uvjetima od onih koji su prisutni tijekom meteoroloških tsunamija u umjerenom pojasu. Naime, sinoptički uvjeti zabilježeni tijekom tropskih ciklona su vertikalno smicanje vjetra i odsustvo mlaznih struja (Frank i Ritchie, 1999; Emanuel i sur., 2004). Stoga, ovako definirani sinoptički indeks nije prikladan za određena područja, kao što su na primjer tropski pojasevi.

Još jedan način za unaprjeđenje konstrukcije sinoptičkog indeksa, koji je dosta pojednostavljen - linearna kombinacija sinoptičkih varijabli s koeficijentima procijenjenima metodom najmanjih kvadrata - je uvođenje i korištenje naprednih metoda kao što su Bayesovo zaključivanje (engl. *Bayesian inference*, Cheng i sur., 2014) i strojno učenje (engl. *machine learning*, Leuenberger i Kanevski, 2016). Neki od algoritama strojnog učenja koji bi se mogli koristiti za identificiranje meteoroloških tsunamija su neuronske mreže (engl. *neural networks*, Cannon, 2012), samo-organizirajuće mape (engl. *Self-Organising Maps*, Cassano i sur., 2016) i duboko učenje (engl. *deep learning*, Yu i Ma, 2021). Ove metode se inače koriste za prepoznavanje ekstrema u geoznanostima.

Utvrđena povezanost između sinoptičkih uvjeta i ekstremnih visokofrekventnih oscilacija može se primijeniti u operativne svrhe na nekoliko načina. Jedna od primjena vezana je za sustave upozorenja na meteorološke tsunamije. Naime, sustav se može konstruirati na način da izdaje upozorenje na nadolazeću opasnost od meteorološkog tsunamija na temelju prepoznavanja pogodnih sinoptičkih uvjeta za do tjedan dana unaprijed, uz uvjet da određene vrijednosti sinoptičkih varijabli impliciraju pojavu meteoroloških tsunamija (Zhou i sur., 2019). Slična metoda je temelj prognoze balearske *rissage* koju izdaje Španjolska meteorološka agencija (engl. *Spanish State Meteorological Agency*) još od 1980-ih, a bazira se na kvalitativnoj procjeni valnih visina na temelju sinoptičkih uvjeta od strane prognostičara (Jansà i Ramis, 2021). Objektivniju metodu uveli su Vich i Romero (2021) koji koriste neuronske mreže za predikcije amplituda *rissagi* putem izmjerenih ili prognoziranih atmosferskih podataka, no ova metoda još nije operativna. Ovakav pristup se može primijeniti i na drugim lokacijama u svijetu, osobito u umjerenom pojasu, što bi iziskivalo automatiziranje predikcija uz korištenje numeričkih procjena. Primjerice, kriteriji za određene sinoptičke parametre i sinoptički indeks se mogu uspostaviti na temelju promatranja meteoroloških tsunamija tijekom određenog razdoblja (npr. jedno desetljeće), te se zatim u narednom razdoblju ispituje koliko su predikcije uspješne, odnosno jesu li kriteriji dobro odabrani. Ovakav pristup bi mogao unaprijediti procjene rizika u obalnim područjima podložnima

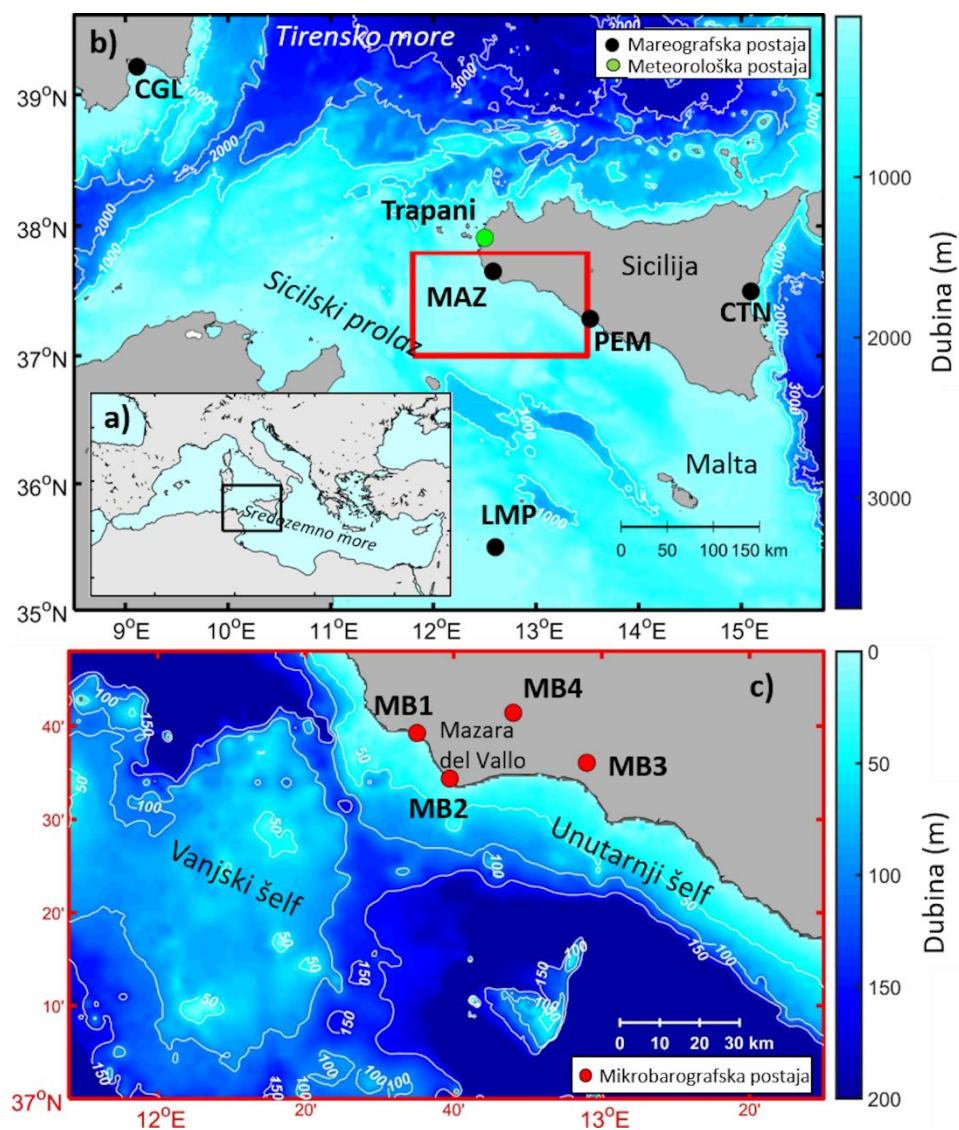


naglim promjenama razine mora koje ugrožavaju rad u lukama (Pattiaratchi i Wijeratne, 2015), sigurnost navigacije (Goring i sur., 2009), obalnu infrastrukturu (Huang i sur., 2022), turizam (Šepić i sur., 2018b; Linares i sur., 2019), sigurnost uzgajališta (Vilibić i sur., 2004) i slično.

Sljedeća primjena sinoptičkog indeksa vezana je uz klimatologiju meteoroloških tsunamija na globalnoj skali, koja je do danas načinjena samo regionalno i na vremenskim nizovima duljine do nekoliko desetaka godina (npr. Dusek i sur., 2019; Kim i sur., 2021; Williams i sur., 2021a). Primjer takve primjene je studija Šepić i sur. (2016a) u kojoj je uz pomoć sličnog sinoptičkog indeksa načinjena procjena međugodišnje varijabilnosti i sezonskih promjena intenziteta meteoroloških tsunamija na Balearskom otočju za cijelo (tada dostupno) razdoblje reanalize ERA-Interim (1979. - 2015., <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>) Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena. Sinoptički indeks kreiran u ovoj disertaciji mogao bi se primijeniti za procjenu obalnih rizika na globalnoj i regionalnoj skali, u područjima u kojima je indeks ostvario visoku korelaciju s rasponima visokofrekventnih oscilacija. Te procjene zatim se mogu proučavati u odnosu na ukupne procjene rizika od ekstremnih visina razine mora, jer ekstremne visokofrekventne oscilacije u nekim područjima mogu doprinijeti do 50 % ukupnim oscilacijama razine mora, primjerice u Sredozemnom moru (Šepić i sur., 2015b; Vilibić i Šepić, 2017). U sadašnjoj eri klimatskih promjena sljedeći korak je kvantificiranje promjena visokofrekventnih oscilacija u budućoj klimi, što je već napravljeno za Balearsko otočje. Naime, studija Vilibić i sur. (2018) sugerira da, u nekim klimatskim scenarijima, intenzitet meteoroloških tsunamija može znatno narasti, za otprilike 30 % do 2100. godine u scenariju RCP 8.5 emisije stakleničkih plinova. Proširivanjem ove studije na globalnu skalu, važna komponenta ukupne bilance razine mora – visokofrekventne oscilacije atmosferskog uzroka – koja još uvijek nije uključena u studije procjena obalnih rizika (Stephens i sur., 2021), bi se konačno mogla koristiti za obalno planiranje.

## 6. VISOKOFREKVENTNE OSCILACIJE RAZINE MORA I FENOMEN *MARROBBIO* NA JUGOZAPADNOJ OBALI SICILIJE

Batimetrija oko otoka Sicilije i na Sicilskom prolazu je vrlo kompleksna i povoljna za nastanak meteoroloških tsunamija, poznatijih pod lokalnim imenom *marrobbio*. Sicilski prolaz (slika 35) razdvaja dva duboka bazena u Sredozemnom moru: Tirensko more s dubinama od 2000 do 3000 m i Jonsko more s dubinama od 3000 do 5000 m.



**Slika 35.** a) Geografski položaj i b) batimetrija Sicilskog prolaza te c) područja ispred grada Mazara del Vallo s naznačenim mareografskim postajama CGL (Cagliari), CTN (Catania), LMP (Lampedusa), MAZ (Mazara del Vallo) i PEM (Porto Empedocle), mikrobarografskim postajama od MB1 do MB4 i radio-sondažnom postajom Trapani. Područje označeno crnim pravokutnikom na grafu a) je prikazano na grafu b), a područje označeno crvenim pravokutnikom na grafu b) je prikazano na grafu c).

Istočni i zapadni dio Sicilskog prolaza su relativno plitki, dubine do 300 m, a razdvaja ih kanal koji se pruža središnjim dijelom prolaza. U središnjem dijelu kanal doseže dubinu od oko 1500 m te se dalje širi s dubinom oko 500 m prema jugozapadnoj obali Sicilije. Batimetrija jugozapadne obale Sicilije, ispred grada Mazara del Vallo, ima nekoliko interesantnih obilježja. Uski unutarnji šelf, širine oko 20 km i dubine oko 50 m, prostire se ispred obale grada te je svojim vanjskim rubom povezan s vanjskim šelfom koji se pruža otprilike 80 km prema jugozapadu i ima dubinu od 40 do 90 m. Vanjski šelf okružen je morem dubine oko 500 m sa svih strana, osim prema obali Sicilije. Unutarnji i vanjski šelf odvojeni su kanalom širine nekoliko kilometara i dubine oko 150 m koji se pruža od sjeverozapada prema jugoistoku. Uvjeti Produmanove rezonancije zadovoljeni su kada je brzina atmosferskih poremećaja iznad vanjskog šelfa između 20 i 30 m/s, što je slično brzini poremećaja iznad šelfa Balearskog otočja za vrijeme pojave fenomena *rissage* (Ličer i sur., 2017). Iznad unutarnjeg šelfa brzina poremećaja treba biti manja od 20 m/s za pojavu rezonancije.

Analizom mareografskih zapisa iz razdoblja 1. travnja do 31. listopada 2007. godine s pet postaja diljem obala Sicilije, Lampeduse i Sardinije detektirano je šest meteoroloških tsunamija umjerenog i slabijeg intenziteta (Zemunik i sur., 2021c). Slika 36 pokazuje satelitske snimke luka u kojima se nalazi pet mareografskih postaja. U narednim poglavljima provedena je statistička analiza vremenskih nizova visine razine mora i tlaka zraka za cijelo promatrano razdoblje, izdvojenih epizoda meteoroloških tsunamija, te sinoptičkih varijabli dobivenih iz reanalize kao i visinskih mjerenja tijekom tih epizoda.



**Slika 36.** Satelitske snimke luka u kojima se nalazi pet mareografskih postaja a) Cagliari (CGL), b) Catania (CTN), c) Lampedusa (LMP), d) Mazara del Vallo (MAZ) i e) Porto Empedocle (PEM).

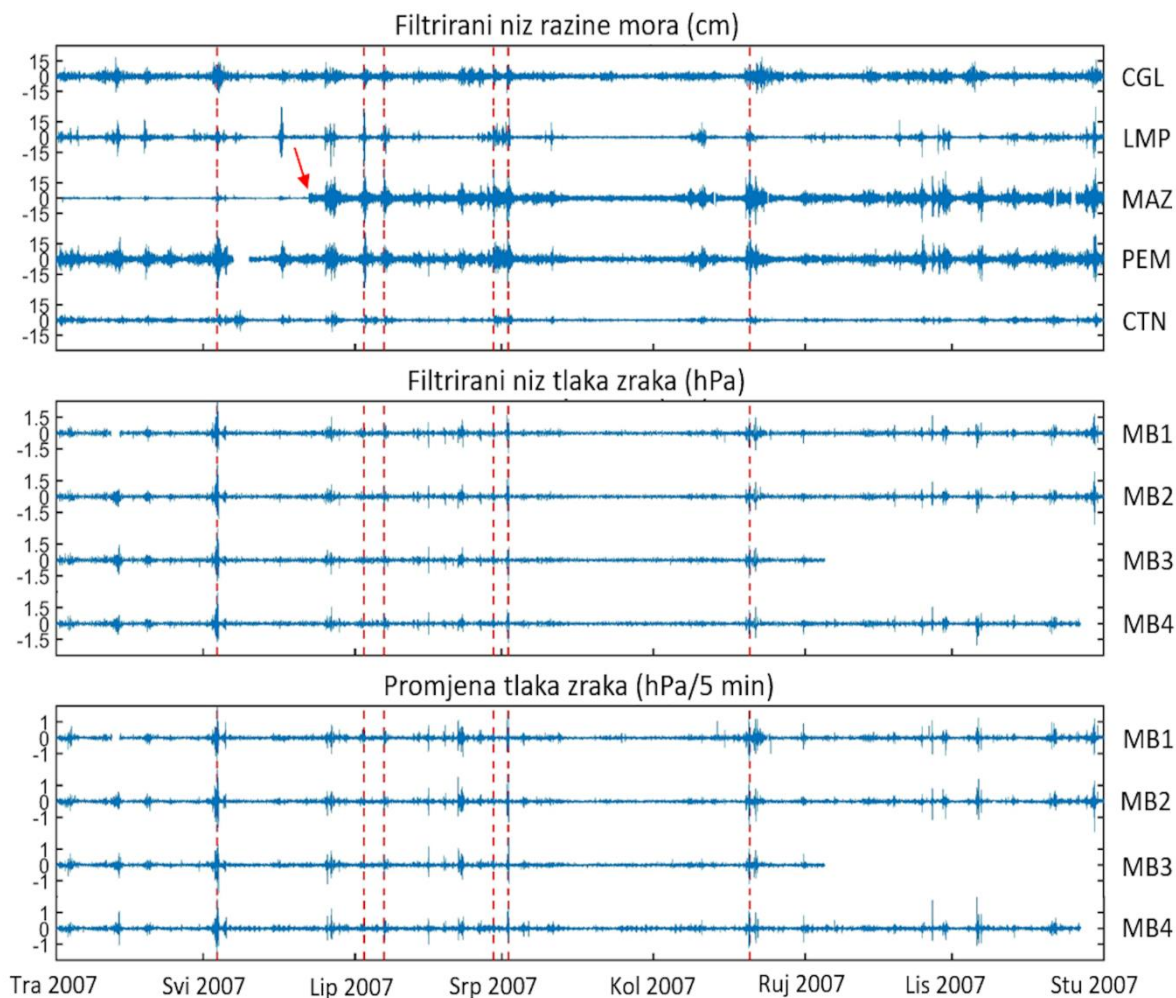
### 6.1. Mjerenja visine razine mora i tlaka zraka

Kako bi se izdvojile visokofrekventne oscilacije čiji period odgovara periodima valova fenomena *marrobbio*, vremenski nizovi visine razine mora i tlaka zraka filtrirani su visokopropusnim Kaiser-Bessel filtrom s periodom odsijecanja 4 h. Filtrirani nizovi prikazani su na slici 37 za cijelo razdoblje mjerenja, od 1. travnja do 31. listopada 2007. godine. Oscilacije većih raspona vidljive su na postajama MAZ, CGL i PEM, dok su manje oscilacije zabilježene na postajama LMP i CTN. No, treba napomenuti da sve postaje, osim postaje MAZ, imaju interval uzorkovanja od 10 min, s kojim oscilacije na minutnim skalama ne mogu biti pravilno zabilježene (Tsimplis i sur., 2009). Ovo osobito vrijedi ako je instrument postavljen unutar manje luke koja ima period seša kraći od 20 min, odnosno period kraći od Nyquistovog perioda pri 10-minutnim mjerenjima, kao što je slučaj za LMP i MAZ postaje. Usrednjavanje niza visokofrekventnih oscilacija na interval od 60 min na postaji MAZ za razdoblje od 22.

svibnja do 31. listopada 2007. godine rezultiralo je smanjenjem raspona oscilacija tijekom pojave meteorološkog tsunamija za otprilike 55 % njihove vrijednosti. Stoga je razumno pretpostaviti da su visokofrekventne oscilacije zabilježene tijekom izabranih epizoda podcijenjene na svim postajama, osim na postaji MAZ koja ima minutnu razlučivost mjerenja.

Visokofrekventne oscilacije razine mora imaju veće raspone od travnja do ranog srpnja, a potom manje raspone od srpnja do sredine kolovoza (slika 37). Nadalje, izraženije oscilacije su zabilježene i u kasnom rujnu i listopadu. Ovakva godišnja razdioba nalikuje dokumentiranoj razdiobi fenomena *marrobbio* koja ima maksimume tijekom proljeća i jeseni (Colucci i Michelato, 1976), iako snažnije oscilacije mogu biti zabilježene i u ljetnoj sezoni (Šepić i sur., 2018a). Većina izraženih visokofrekventnih oscilacija podudara se u vremenu na različitim postajama, osobito na postajama LMP, MAZ i PEM koje se nalaze na Sicilskom prolazu, što sugerira da postoji zajednički mehanizam generiranja oscilacija iznad cijelog Sicilskog prolaza. No, oscilacije se razlikuju u amplitudi, pa njihov raspon može višestruko varirati tijekom različitih epizoda.

Nadalje, sinkronicitet između visokofrekventnih oscilacija razine mora i oscilacija tlaka zraka u Mazari del Vallo je jasno vidljiv (slika 37). Omjeri njihovih amplituda tijekom epizoda su različiti, što vrlo vjerojatno ovisi o brzini i smjeru atmosferskog poremećaja, zbog čega količina energije prenesene iz atmosfere u more putem rezonancije može varirati. Visokofrekventne oscilacije tlaka zraka postižu raspone od 5.6 hPa, a 5-minutna promjena tlaka zraka – koja se pokazala kao ključni faktor za generiranje meteoroloških tsunamija (Šepić i Vilibić, 2011) – ima maksimalnu vrijednost od 3.3 hPa. Također, lokalni maksimumi visokofrekventnih oscilacija tlaka zraka se javljaju istovremeno s lokalnim maksimumima 5-minutnih promjena tlaka zraka.



**Slika 37.** Vremenski nizovi visine razine mora (gore), tlaka zraka (sredina) (oba filtrirana visokopropusnim filterom s periodom odsijecanja od 4 h) i 5-minutne promjene tlaka zraka (dolje). Crvena strelica pokazuje na vrijeme kada se mjerenje na postaji MAZ promijenilo sa 60-minutnog usrednjavanja na 1-minutno mjerenje, a crne isprekidane linije pokazuju izdvojene događaje *marrobbia*. Sve mareografske postaje osim MAZ imaju interval mjerenja od 10 minuta.

Među svim potencijalnim događajima meteoroloških tsunamija, detaljno je analizirano šest događaja koji imaju ili bi trebali imati (prije 22. svibnja su valne visine podcijenjene zbog usrednjavanja) valnu visinu (raspon oscilacija) veću od 40 cm na postaji MAZ, te se pojavljuju između travnja i ranog rujna 2007. godine kada su svi mikrobarografi bili aktivni (tablica 8). Tijekom odabranih *marrobbia* (osim događaja 3. svibnja) valni periodi na postaji MAZ iznosili su od 10 do 40 minuta, a valne visine od 40 do 54 cm. Maksimalne valne visine od 30, 69, 54, 59 i 14 cm su zabilježene redom na postajama CGL, LMP, MAZ, PEM i CTN. Razlika između pojedinih epizoda je očita – iako su valne visine bile znatno veće na obali Sicilije nego na

Lampedusi tijekom epizode 3. svibnja (59 cm na PEM i 17 cm na LMP), mjesec dana kasnije, 2. lipnja, oscilacije su bile snažnije na Lampedusi (59 cm na PEM i 69 cm na LMP). Razlika u intenzitetu oscilacija je vidljiva i tijekom istih događaja na susjednim postajama, primjerice 7. lipnja kada su zabilježene upola manje valne visine na postaji PEM (24 cm) u odnosu na one izmjerene na postaji MAZ (51 cm).

**Tablica 8.** Datumi i najveće zabilježene visine visokofrekventnih oscilacija razine mora (u cm) na mareografskim postajama. Raspon prvog *marrobbia* na postaji MAZ (prije 22. svibnja dok su vrijednosti usrednjavane na satnoj skali) je označen podebljano.

Datum	CTN	LMP	PEM	MAZ	CGL
03.05.2007	11	17	59	<b>16</b>	29
02.06.2007.	14	69	59	54	16
07.06.2007.	9	29	24	51	19
29.06.2007.	11	20	31	52	16
02.07.2007.	10	29	42	45	27
20.08.2007.	7	15	42	47	30

## 6.2. Analiza izdvojenih događaja *marrobbia*

U ovom poglavlju šest izabranih događaja *marrobbia* je detaljno analizirano, osobito vremenske, prostorne i spektralne karakteristike mjerenih visina razine mora i tlaka zraka. Ovi događaji imaju karakteristike koje su nalik specifičnim i prepoznatljivim karakteristikama *marrobbia* (Candela i sur., 1999, Šepić i sur., 2018a) pa se, usprkos tome što nisu ekstremni i imaju valne visine manje od 60 cm u luci Mazara del Vallo, mogu klasificirati kao meteorološki tsunamiji. U ovoj disertaciji su za događaje *marrobbio* izabrani oni tijekom kojih su rasponi visokofrekventnih oscilacija na postaji MAZ veći od 40 cm, slijedeći pristup iz studije Rabinovich i Monserrat (1996) primijenjen na Balearsko otočje, dok su ostale postaje (LMP, CGL, PEM i CTN) analizirane kako bi se ispitalo ponašanje visokofrekventnih oscilacija na većem području. Naime, Candela i sur. (1999) su pokazali da poremećaji tlaka zraka koji propagiraju nad istim područjem mogu pobuditi seše Sicilskog prolaza. Ovisno o karakteristikama atmosferskog procesa (dimenzije, brzine i smjera propagiranja), *marrobbio* se energičnije manifestira na specifičnim lokacijama, osobito u Mazari del Vallo zbog njenih batimetrijskih obilježja i oblika luke.

### 6.2.1. Vremenski nizovi visine razine mora

Slika 38 prikazuje visokofrekventne oscilacije razine mora tijekom šest odabranih događaja *marrobbia* na pet promatranih postaja. Nekoliko zanimljivih značajki vidljivo je u nizovima i diskutirano je u nastavku. Primjerice, pozadinske oscilacije su izraženije i traju duže na postajama MAZ i PEM, dok su kraćeg vijeka na postaji LMP i slabijeg intenziteta na postajama CGL i CTN. Nadalje, oscilacije tijekom pojedinih epizoda, primjerice 2. - 3. lipnja, su većeg intenziteta u odnosu na pozadinske i kratkog su vijeka, dok su tijekom drugih epizoda dugotrajnije i s ponavljajućim maksimumima, primjerice 28. - 30. lipnja i 20. - 22. kolovoza 2007. godine. Oscilacije se obično pojavljuju prvo na zapadnim postajama, a zatim se bilježe redom na postajama prema istoku.

Visokofrekventne oscilacije koje su zabilježene tijekom događaja 3. - 4. svibnja jačale su postupno na svim postajama, osim na postaji MAZ. Jačanje oscilacija započelo je 2. svibnja oko 21 h (u nastavku se podrazumijeva srednjoeuropsko vrijeme) na postajama CGL i PEM, dok je na postaji LMP prva pojava izraženih oscilacija zabilježena u poslijepodnevnim satima 3. svibnja. Na postaji MAZ primjetne oscilacije su zabilježene u razdoblju od večernjih sati 3. svibnja (oko 21 h) do ranog jutra 4. svibnja (oko 3 h), a vrhunac je opažen na početku događaja, s valnom visinom od 16 cm. Treba napomenuti da su minuti podaci s postaje MAZ tijekom ovog događaja usrednjeni na satnim intervalima, zbog čega su oscilacije razine mora zasigurno podcijenjene, no ne može se utvrditi u kojem omjeru su podcijenjene. Stoga je meteorološki tsunami 3. svibnja potencijalno jedan od najjačih u razdoblju od travnja do listopada 2007. godine, jer je za vrijeme te epizode zabilježen najveći intenzitet oscilacija tlaka zraka, s brzinom propagiranja pogodnom rezonantnim uvjetima na šelfu i smjerom propagiranja prema Mazari del Vallo. Nadalje, visokofrekventne oscilacije razine mora na obližnjoj postaji PEM imaju najveće raspone od svih epizoda (59 cm). Postaja CTN posljednja je zabilježila povećanje oscilacija koje je trajalo od kasne večeri 3. svibnja (23 h) do popodnevnih sati 4. svibnja (14 h). Dakle, tijekom prvog promatranog događaja, pojava izraženih oscilacija napredovala je od zapadnog prema istočnom Sredozemnom moru, što je u skladu s rezultatima studije Šepić i sur. (2015a) koja je razmatrala nekoliko desetaka događaja diljem Sredozemnog mora.

Događaj 2. - 3. lipnja obilježila je nagla pojava izraženih oscilacija na većini promatranih mareografskih postaja. Izražene oscilacije su započele na postaji MAZ 2. lipnja oko 16 h, dok su na postajama LMP i PEM oscilacije zabilježene gotovo u istom vremenu, od 2. lipnja u 21



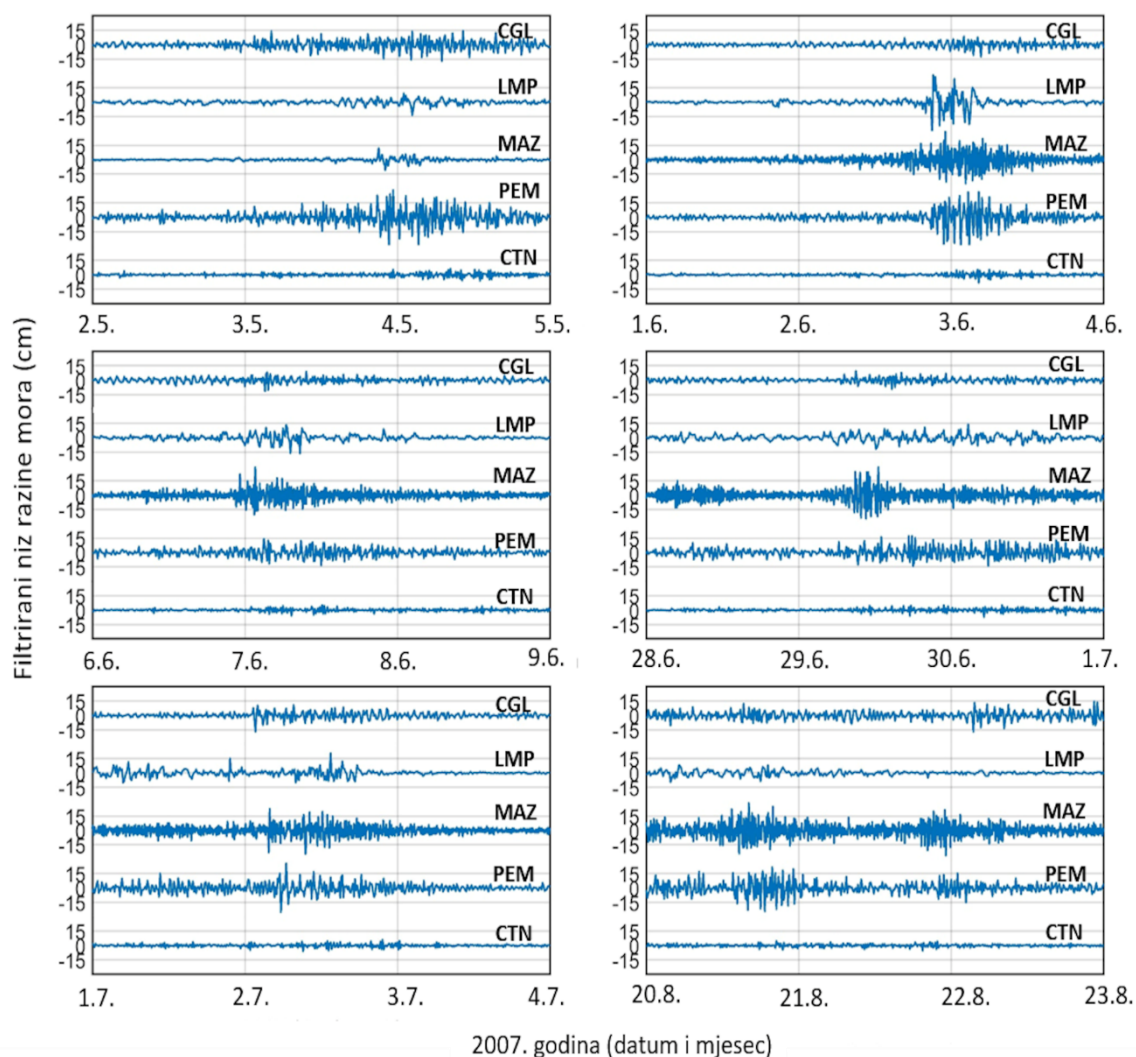
h do 3. lipnja u 9 h. Primjetne visokofrekventne oscilacije na postajama CGL i CTN opažene su nešto kasnije, s početkom 2. lipnja oko 23 h.

Događaj 7. lipnja je bio slične naravi, no s nešto manjim intenzitetom oscilacija na svim postajama, izuzev dva skoka zabilježena 6. lipnja u 23:15 te 7. lipnja u 1:38. Potonji je bio dio oscilacije koja je na MAZ imala raspon od 51 cm.

Tijekom događaja 29. lipnja izražene visokofrekventne oscilacije razine mora pojavile su se u rano jutro gotovo simultano na svim postajama, osim na CTN. Na postaji CTN oscilacije su započele otprilike 6 h kasnije. Na postaji MAZ oscilacije su se razvijale postupno tijekom jutra, između 4 i 9 h, kada su dosegle maksimalni raspon od 52 cm. Izražene oscilacije nastavile su svoj tijek narednih 24 h nakon postizanja maksimuma. Interesantno je da na obližnjoj postaji PEM nije bilo jasnog maksimuma, već su umjerene oscilacije imale relativno konstantan intenzitet od ranog jutra 29. lipnja do kraja sljedećeg dana. Na postaji CGL primjetne oscilacije trajale su 29. lipnja od 6 do 22 h. Za razliku od CGL, postaja CTN, slično kao i PEM, bilježila je dugotrajnije oscilacije umjerenog intenziteta, od sredine dana 29. lipnja do noći 30. lipnja. Oscilacije na postaji LMP su bile slabijeg intenziteta, ali dužeg vijeka. Trajale su gotovo dva puna dana, od 29. do 30. lipnja. Dakle, oscilacije su bile izraženije u zapadnom dijelu Sicilskog prolaza, a slabije u istočnom dijelu.

Događaj 2. srpnja je započeo na postajama CGL, MAZ i PEM. Primjetne oscilacije su izmjerene na postaji CGL 2. srpnja u 1:20, zatim na postaji MAZ u 3:40, na postaji PEM u 5:30 te na postaji LMP u 13:30. Ovakav raspored pojavljivanja drugačiji je od uobičajenog (oscilacije na LMP su prethodile oscilacijama na MAZ i PEM tijekom drugih epizoda) i ukazuje na različitu prostornu strukturu atmosferskog forsiranja tijekom pojedinih događaja. No, forsiranje je vjerojatno, kao i inače, propagiralo prema istoku jer su se prve oscilacije pojavile na postaji CGL.

Posljednji promatrani događaj odvio se od 20. do 22. kolovoza i karakteriziran je dvostrukom pojavom primjetnih visokofrekventnih oscilacija na postaji MAZ. Prva izražena aktivnost zabilježena je 20. kolovoza od 12 do 22 h, a druga od 21. kolovoza u 20 h do 22. kolovoza u 2 h. Oscilacije na postaji PEM su slične po trajanju i rasponu, ali su se pojavile s odmakom od 3 h. Postaja LMP zabilježila je izražene oscilacije tijekom prve pojave, 20. kolovoza, ali je imala znatno slabije oscilacije u drugom navratu, tijekom 21. i 22. kolovoza. Oscilacije na postaji CGL su bile veće, s rasponima do 30 cm, dok je postaja CTN bilježila slabije oscilacije, raspona oko 7 cm.



**Slika 38.** Vremenski nizovi visokofrekventnih oscilacija razine mora tijekom šest promatranih događaja *marrobbia*.

### 6.2.2. Atmosferski poremećaji i njihovo propagiranje

Vremenski nizovi tlaka zraka izmjereni na četiri mikrobarografa tijekom šest promatranih događaja *marrobbia* analizirani su kako bi se dokumentirale karakteristike poremećaja atmosferskog tlaka i njihovo podudaranje s izraženim visokofrekventnim oscilacijama razine mora. Procijenjene su brzine i smjerovi propagiranja poremećaja te su za svaki događaj izračunate njihove srednje vrijednosti i standardne devijacije od četiri moguća trokuta mikrobarografskih postaja (MB1-MB2-MB3, MB1-MB2-MB4, MB1-MB3-MB4, MB2-MB3-MB4) (tablica 9).

**Tablica 9.** Brzina i smjer propagiranja atmosferskih poremećaja povezanih s izdvojenim događajima *marrobbia*. Također je naznačeno vrijeme vrhunca događaja izmjerenog na postaji MB1.

Datum i vrijeme	Brzina (m/s)	Smjer propagiranja (° od sjevera)
03.05.2007. 21:39	23.6 ± 3.3	73.1 ± 13.6
02.06.2007. 19:15	41.5 ± 17.1	46.4 ± 25.6
07.06.2007. 01:05	16.5 ± 11.7	62.5 ± 28.2
29.06.2007. 09:58	21.6 ± 3.8	52.6 ± 12.6
02.07.2007. 09:08	19.5 ± 0.9	75.5 ± 5.3
20.08.2007. 13:20	21.7 ± 2.8	76.5 ± 12.0

Najsnažnije oscilacije tlaka zraka zabilježene su tijekom događaja 3. svibnja, kada je raspon oscilacija od 5.9 hPa (na MB1) opažen oko 21 h (slika 39). Raspon oscilacija opadao je prema istočnijim postajama i dosegao minimum od 4.6 hPa na MB3. Odgovarajuća 5-minutna promjena tlaka zraka iznosila je između 1.4 i 2 hPa u 5 minuta. Na svim mikrobarografima zabilježen je niz od četiri izražene oscilacije tlaka zraka koje se podudaraju u vremenu s oscilacijama razine mora zabilježenim na postaji MAZ (slika 37). Oscilacije tlaka zraka, kao i razine mora, smanjile su se u ranojutarnjim satima 4. svibnja. Brzina i smjer propagiranja poremećaja iznosili su  $23.6 \pm 3.3$  m/s odnosno  $73.1 \pm 13.6^\circ$  (tablica 9), što implicira da su rezonantni uvjeti bili omogućeni na šelfu dubine oko 56 m. Upravo vanjski šelf, iznad kojeg je poremećaj vjerojatno propagirao, na pojedinim dijelovima ima ovu dubinu.

Događaj 2. lipnja bio je karakteriziran dugotrajnim pozadinskim oscilacijama tlaka zraka, koje su imale raspone do 1 hPa u trajanju od 3 dana. Interesantno je da se oscilacije razine mora ne podudaraju s najsnažnijim oscilacijama tlaka zraka, već s blagim padom tlaka, oko 0.5 hPa, koji je zabilježen na MB1 u 19:30, u isto vrijeme kada su započele primjetne oscilacije razine mora na MAZ. Slični intenzitet oscilacija tlaka zraka zabilježen je na MB2 i MB3, dok je MB4 bilježio niže amplitude. Poremećaj je karakteriziran umjerenom promjenom tlaka zraka, do 0.4 hPa u 5 minuta. Procijenjeno je propagiranje poremećaja prema sjeveroistoku ( $46.4 \pm 25.6^\circ$ ) brzinom od  $41.5 \pm 17.1$  m/s (tablica 9), no s prilično velikom standardnom devijacijom za oba parametra. Ova relativno velika odstupanja u brzini i smjeru propagiranja procijenjenima na različitim kombinacijama triju mikrobarografa triangulacijskom metodom mogu biti posljedica slabog intenziteta poremećaja, koji može utjecati na procjene parametara i umanjiti preciznost izračuna. Sljedeći poremećaj vidljiv je 3. lipnja oko 2:30, s rasponom oscilacije oko 0.7 hPa na

MB1, koji opada na 0.3 hPa na MB2 i zatim iščezava na MB3 i MB4. Vrhunac raspona oscilacija razine mora na postaji MAZ podudara se s navedenim poremećajem (slika 37). Dakle, ovaj poremećaj je bio najintenzivniji iznad šelfa ispred Mazare del Vallo, a njegova energija je zatim rezonancijom prenesena u more, što je kreiralo meteorološki tsunami.

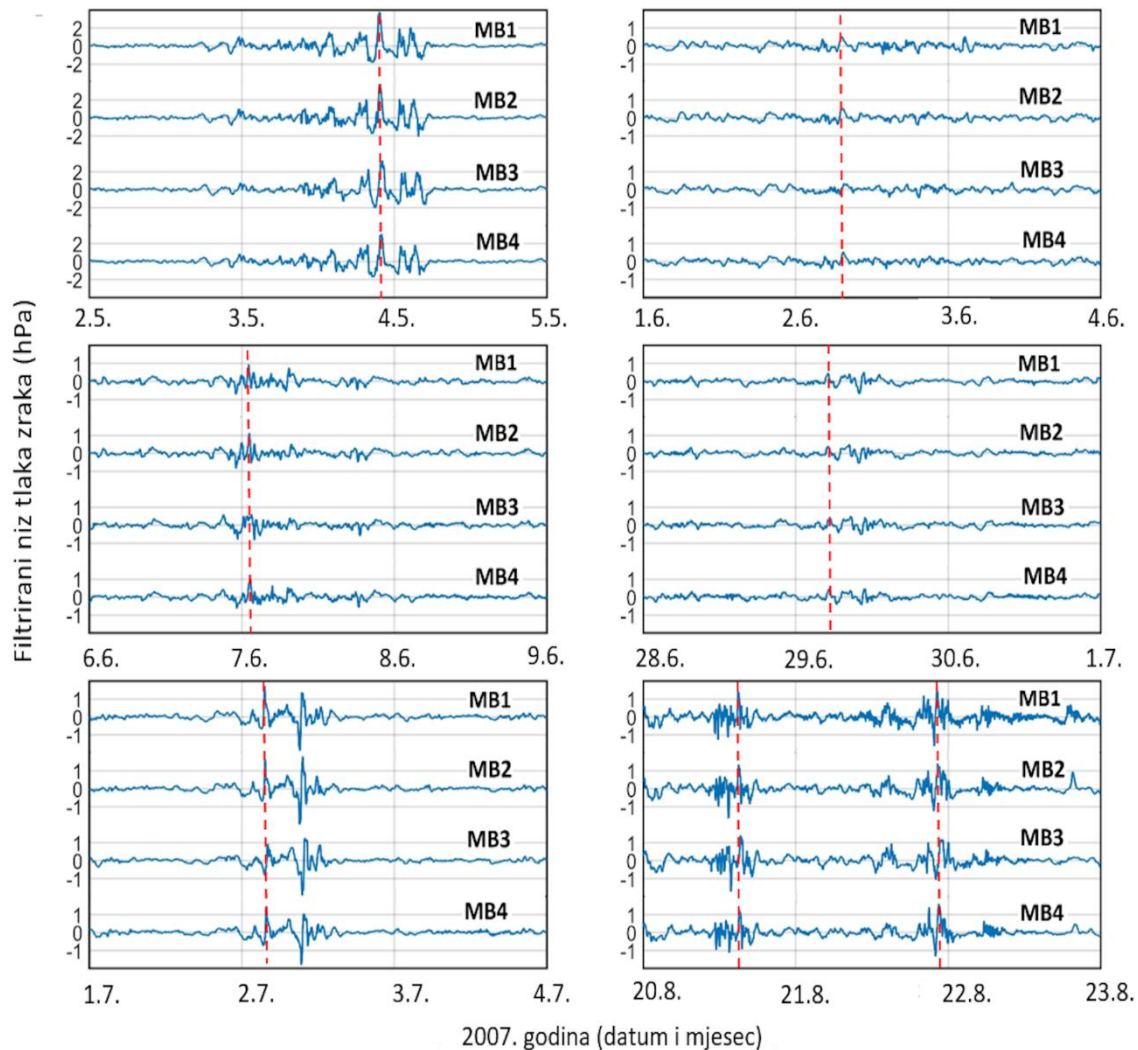
Treći promatrani događaj, koji se odvio 6. - 7. lipnja, bio je karakteriziran primjetnim oscilacijama tlaka zraka zabilježenima na svim mikrobarografima (slika 39). Intenzivan skok tlaka od 1 hPa vidljiv je 7. lipnja oko 1 h na svim postajama, osim na MB3. Skoku je prethodio pad tlaka zraka od 0.1 hPa u 0:20, otprilike u vrijeme pojave najvećih oscilacija razine mora na postaji MAZ. Još jedan, malo manje intenzivan, poremećaj tlaka zraka vidljiv je na svim mikrobarografima oko 18 h, no ne podudara se s oscilacijama razine mora. Brzina i smjer propagiranja jutarnjeg poremećaja procijenjeni su na  $16.5 \pm 11.7$  m/s odnosno  $62.5 \pm 28.2^\circ$ . Poremećaj nije imao potencijal da uzrokuje veće oscilacije razine mora na vanjskom šelfu zbog razlike u brzinama atmosferskog poremećaja i valova u plitkom moru koja nije dopustila stvaranje rezonantnih uvjeta. No, podudaranje dviju brzina je bilo omogućeno na unutarnjem šelfu koji ima manje dubine. Na dubini od 30 m unutarnjeg šelfa, brzina atmosferskog poremećaja od oko 17 m/s može se ujednačiti s brzinom valova u plitkom moru i tako zadovoljiti rezonantne uvjete.

Nekoliko atmosferskih poremećaja je prolazilo nad gradom Mazara del Vallo tijekom prijepodnevnih sati 29. lipnja (slika 39), no nijedan od njih nije bio karakteriziran velikom 5-minutnom promjenom tlaka zraka (slika 37). Unatoč tome, visokofrekventne oscilacije na postaji MAZ dosegle su raspone od 52 cm. Amplitude atmosferskih poremećaja bile su slične na svim mikrobarografima. Brzina i smjer propagiranja su procijenjeni na  $21.6 \pm 3.8$  m/s odnosno  $52.6 \pm 12.6^\circ$ , što ukazuje na to da se rezonancija potencijalno odvijala na vanjskom šelfu.

Meteorološki tsunami 2. srpnja bio je karakteriziran izraženim oscilacijama tlaka zraka, s maksimalnim rasponom od 4 hPa (slika 39) i promjenom tlaka zraka većom od 1 hPa na 5 minuta (slika 37). No, valne visine su bile manje nego za vrijeme događaja 29. lipnja. Razlog tome može biti manja brzina propagiranja, procijenjena na  $19.5 \pm 0.9$  m/s, slična kao za vrijeme događaja 7. lipnja, zbog koje se nisu mogli zadovoljiti rezonantni uvjeti na vanjskom šelfu.

Tijekom višestrukog događaja 20. - 22. kolovoza očito je podudaranje visokofrekventnih oscilacija tlaka zraka (slika 39) i razine mora (slika 37). Tijekom popodneva 20. kolovoza i kasne večeri 21. kolovoza nekoliko atmosferskih poremećaja propagiralo je nad promatranim

područjem, s maksimalnim rasponom oscilacija od 3 hPa i promjenom tlaka zraka do 1.5 hPa na 5 minuta (slika 37). Brzina propagiranja poremećaja 20. kolovoza slična je kao pri događaju 29. lipnja i iznosi  $21.7 \pm 2.8$  m/s, dok je smjer procijenjen na  $76.5 \pm 12.0^\circ$ .

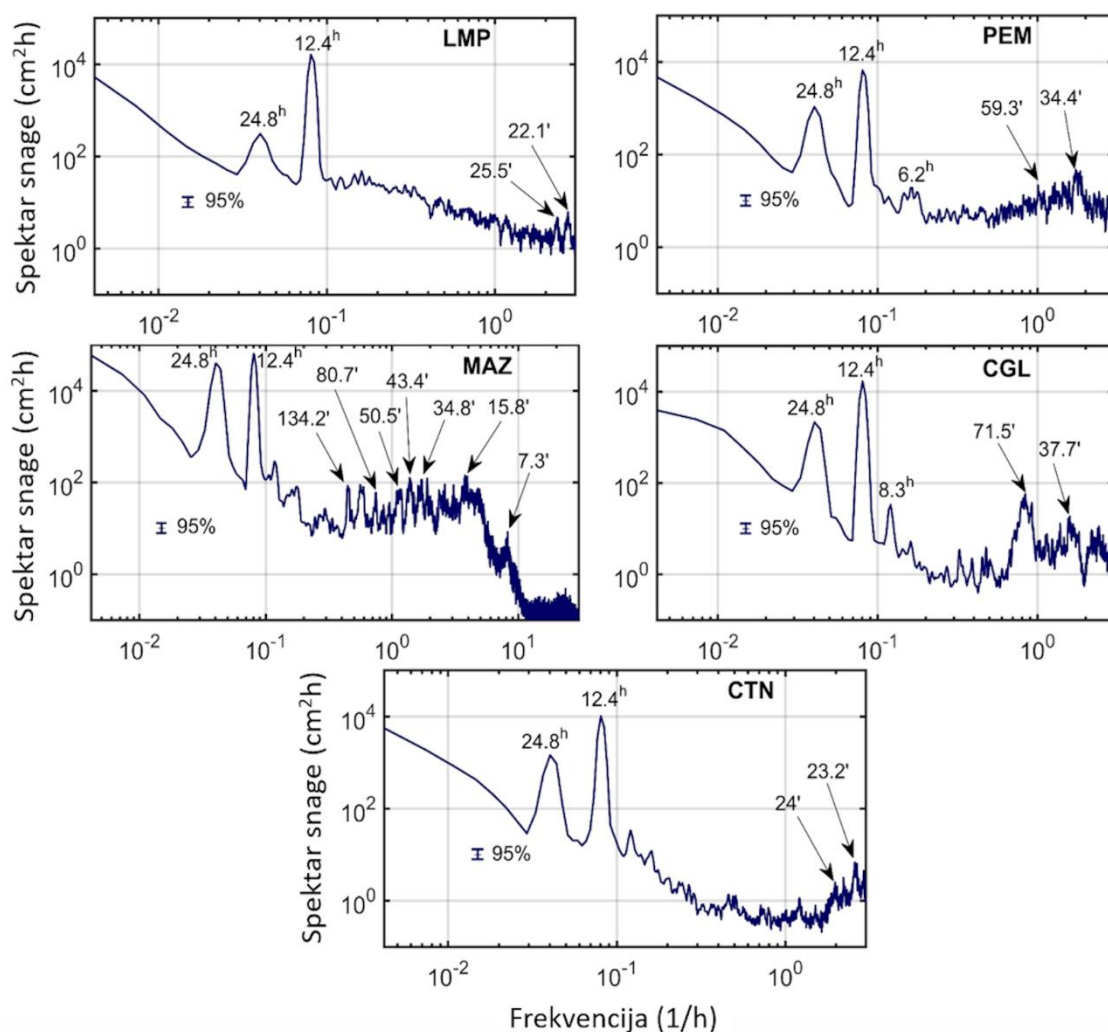


**Slika 39.** Vremenski nizovi visokofrekventnih oscilacija tlaka zraka tijekom šest promatranih događaja *marrobbia*. Propagiranje atmosferskih poremećaja označeno je crvenim isprekidanim linijama. Valja primjetiti da je skala na grafu prvog događaja različita u odnosu na grafove ostalih događaja.

### 6.2.3. Spektralna svojstva

Veza između oscilacija tlaka zraka i razine mora može se procijeniti i spektralnom analizom njihovih nizova. Iz tog razloga prvo su procijenjeni spektri nizova visine razine mora iz cijelog razdoblja mjerenja, a zatim pojedinačno - za svaki promatrani događaj - spektri nizova tlaka zraka i visine razine mora. Spektri nizova visine razine mora za razdoblje od 22. svibnja do 31.

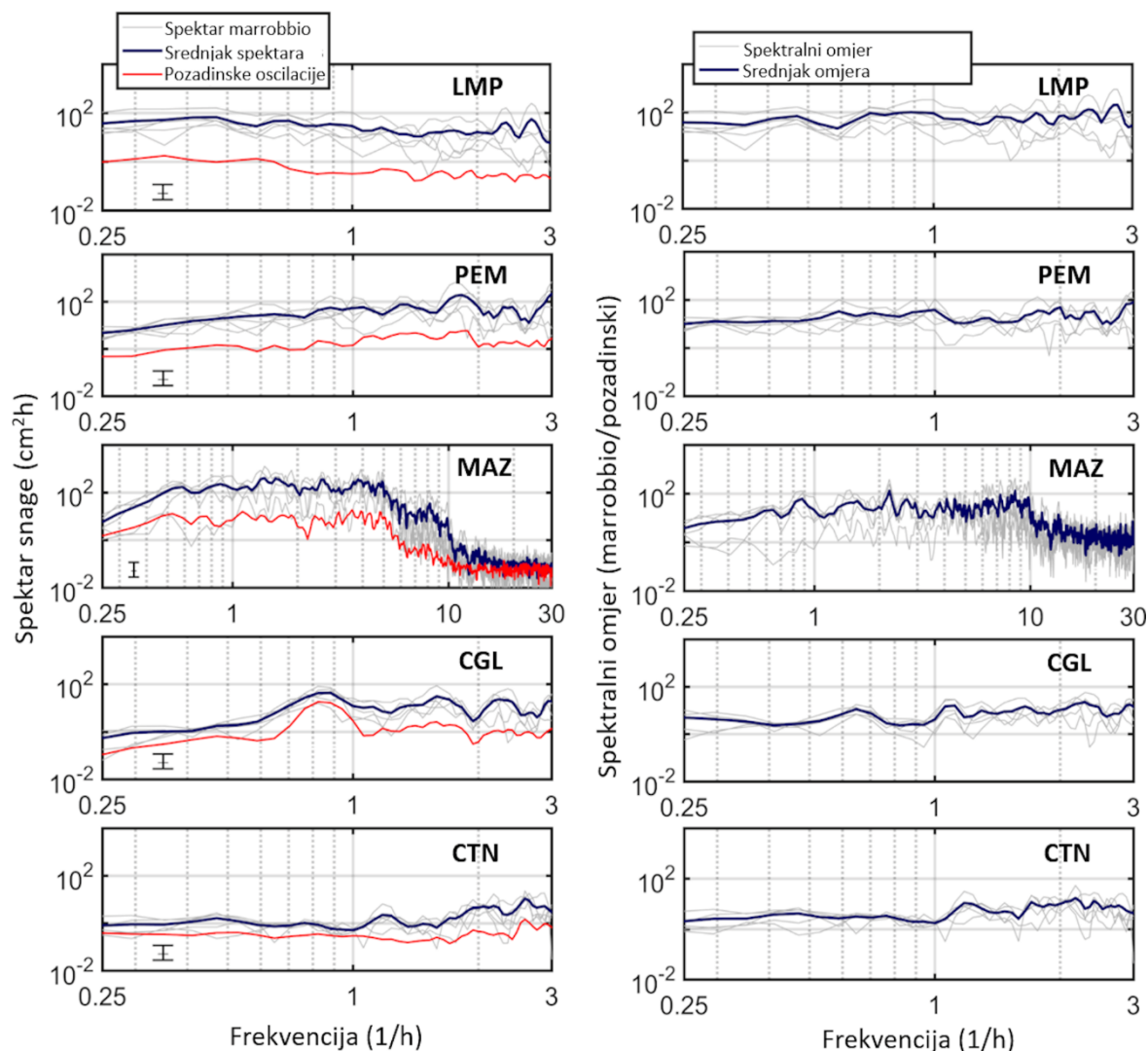
listopada 2007. godine izračunati su Welchovom metodom korištenjem Kaiser-Besselovih prozora širine 11 dana s 50 % preklapanja. Na slici 40 je uočeno nekoliko zanimljivih karakteristika spektara koje su diskutirane u nastavku. Poludnevna plimna komponenta ima kvazi-konstantnu spektralnu snagu na svim postajama, dok dnevna komponenta varira od postaje do postaje te ima najmanju snagu na postaji LMP, koja se nalazi u blizini amfidromijske točke (Tsimplis i sur., 1995). Nadalje, postaje PEM i MAZ imaju veću spektralnu snagu na periodima od 20 do 60 min (što odgovara frekvencijama od 3 i  $1 \text{ h}^{-1}$ ) u odnosu na ostale tri postaje. Postaja CTN ima najnižu spektralnu snagu od svih postaja, s nekoliko izraženih spektralnih šiljaka na periodima između 20 i 30 min. Izraženi šiljci, osobito vidljivi na postaji CGL, potencijalno ukazuju na seše zaljeva. Primjerice, šiljak na postaji CGL na periodu od 71.5 minuta predstavlja osnovni mod seša Caglijarskog zaljeva, dok šiljak na 37.7 minuta odgovara njegovom prvom modu (Fais i Michelato, 1980). Interesantno je da na postaji LMP nema značajnih spektralnih šiljaka na periodima od 30 min do 10 h, iako je snaga u prosjeku veća nego na CGL. Ovaj rezultat sugerira direktni prijenos energije iz atmosfere u more na širem rasponu frekvencija na šelfu koji se proteže jugozapadno od postaje LMP, a koji ima dubine od 30 do 50 m i širok je oko 150 km. Amplifikacija energije vidljiva je na periodima od 22.1 i 25.5 min, a očekivano povećanje energije na periodu seša luke Lampedusa od 13 min nije moguće razlučiti zbog nedovoljno malog intervala uzorkovanja (10 minuta). Postaja PEM ima veću energiju na periodima od 30 do 60 minuta nego na višesatnim periodima. Spektralni šiljak na periodu od 34.5 minute vidljiv je na susjednim postajama MAZ i PEM, što sugerira da se potencijalno radi o obalnim valovima koji propagiraju uz rub šelfa. Najveća snaga spektra postaje MAZ postignuta je na periodu od 15.8 minuta, a vidljiv je i nešto manji spektralni šiljak na periodu od 7.3 minuta. Ovi periodi vjerojatno odgovaraju periodima osnovnog i prvog moda seša luke, tim više što nisu pronađeni u spektrima mjerenja izvan luke (Candela i sur., 1999). Također, veliki broj šiljaka nalazi se u spektru na periodima od 7 minuta do 2 h, koji mogu biti povezani s procesima na vanjskom šelfu. Interesantno je da snaga naglo opada na periodima kraćim od 10 minuta, zbog toga što se viši modovi seša obično ne kreiraju u pravokutnim lukama kao što je luka Mazara del Vallo (Rabinovich, 2009).



**Slika 40.** Spektar snage izračunat na postajama LMP, PEM, MAZ, CGL i CTN za nizove visine razine mora od 22. svibnja do 31. listopada 2007. godine. Spektar na postaji MAZ ima drugačiji frekvencijski raspon od ostalih postaja, zbog različite razlučivosti mjerenja.

Za šest izabranih događaja *marrobbia*, spektar snage načinjen je na nizovima visokofrekventnih oscilacija razine mora duljine 34 h centriranim na pojedine događaje, koristeći preklapajuće (50 %) Kaiser-Besselove prozore širine 17 h. Slika 41 pokazuje da je spektralna snaga tijekom *marrobbia* veća za oko jedan red veličine na postajama CGL i CTN, te za oko dva reda veličine na postajama PEM, MAZ i LMP, u odnosu na spektralnu snagu pozadinskih epizoda. Ovi omjeri ukazuju na efikasnost prijenosa energije iz atmosfere u more, koji ovisi o svojstvima atmosferskog poremećaja i batimetrijskim svojstvima područja nad kojim poremećaj propagira. Šelf najveće površine nalazi se ispred postaje LMP, zbog čega se tu ostvaruje najveći prijenos energije te LMP posljedično ima najveći omjer snage spektara *marrobbia* i pozadinskih epizoda. Nešto manji šelf je ispred postaja MAZ i PEM, koje stoga

imaju nešto manji prijenos energije na šelfu. Amplifikacija se blago povećava s povećanjem frekvencije na svim postajama do perioda od 20 minuta.

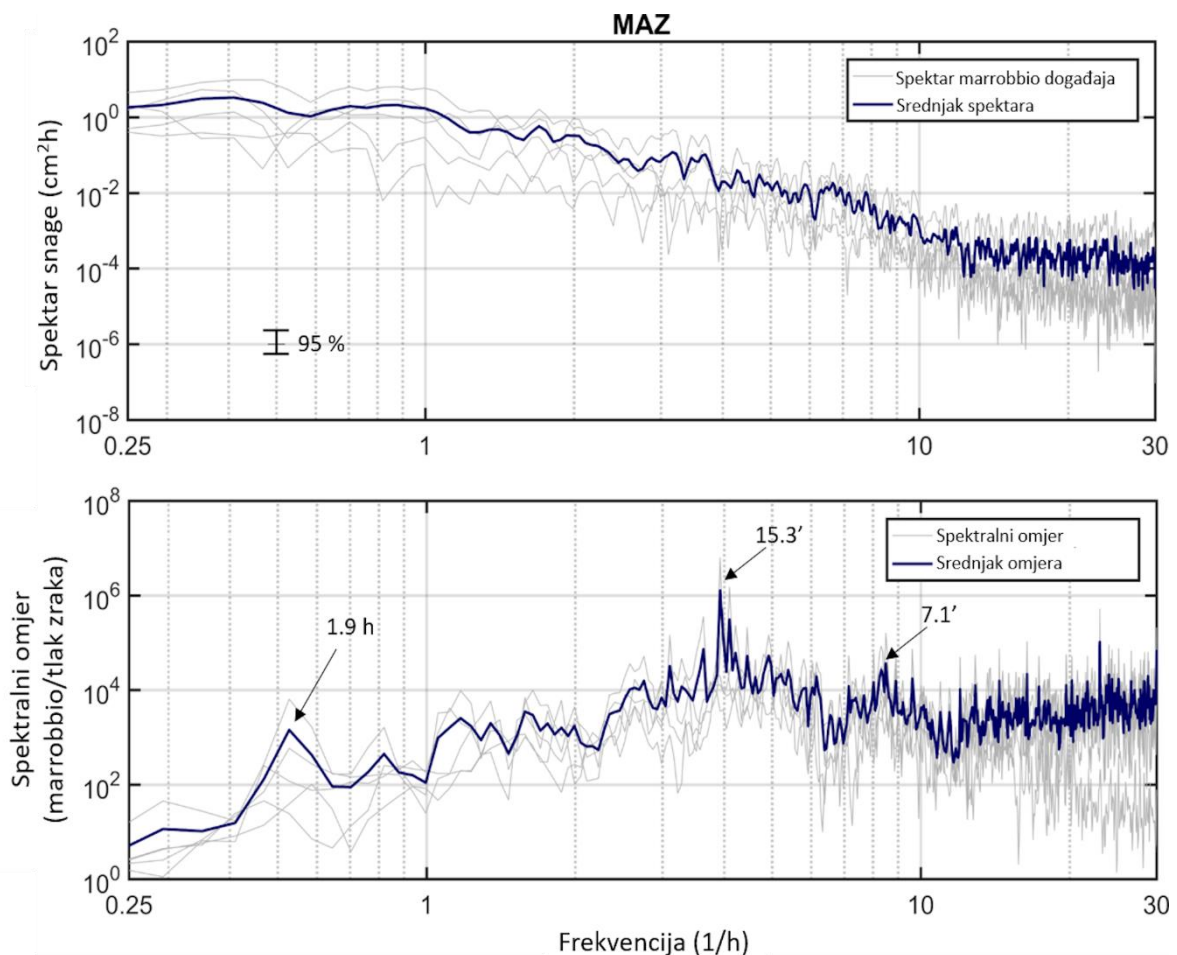


**Slika 41.** Spektar snage izračunat za promatrane događaje *marrobbia*, osim za događaj 3. svibnja 2007. godine (sivo), njihov srednjak (plavo) i pozadinski spektar usrednjen na 5 pozadinskih epizoda (crveno) (lijevo). Omjer između spektra *marrobbia* i pozadinskog spektra, procijenjen za svaki događaj posebno (sivo) i njihov srednjak (plavo) (desno). Spektar na postaji MAZ ima drugačiji frekvencijski raspon od ostalih postaja, zbog različite razlučivosti mjerenja.

Prijenos energije iz atmosfere u more na postaji MAZ je najveći na periodu od otprilike 16 minuta, koji odgovara periodu seša luke Mazara del Vallo (slika 42). Nadalje, efikasan prijenos energije događa se na svim periodima manjim od 30 minuta. Stoga se period od 30 minuta može smatrati kritičnom granicom za efikasan prijenos energije nad šelfom. Ako atmosferskom



poremećaju koji propagira brzinom od 25 m/s treba otprilike sat vremena da prijeđe 100 km širok šelf ispred Mazare del Vallo, tada period poremećaja, uz pretpostavku da je njegova valna duljina tri puta manja od širine šelfa, iznosi oko 20 minuta. Dakle, atmosferski poremećaji manjih perioda i s većom minutnom promjenom tlaka zraka imaju veći potencijal da generiraju *marrobbio*.



**Slika 42.** Spektar snage tlaka zraka izračunat za MB1 za sve događaje *marrobbia*, osim za događaj 3. svibnja 2007. godine (sivo) i njihov srednjak (plavo) (gore). Omjer između spektra snage tlaka zraka na MB1 i spektra snage visine razine mora na MAZ procijenjen za svaki *marrobbio* posebno (sivo) i njihov srednjak (plavo) (dolje).

### 6.3. Atmosferski uvjeti tijekom izdvojenih događaja *marrobbia*

#### 6.3.1. Analiza sinoptičkih varijabli iz reanalize ERA5

U ovom poglavlju analizirani su podaci atmosferske reanalize ERA5 za šest izabranih događaja *marrobbia*. Slika 43 prikazuje sinoptička polja za izdvojene događaje koji uvelike

nalikuju karakterističnoj sinoptičkoj situaciji tijekom meteoroloških tsunamija u Sredozemnom moru.

Tijekom prvog događaja 3. svibnja, površinski minimum tlaka zraka dio je većeg sustava niskog tlaka zraka koji se prostire nad sjevernim dijelom afričkog kontinenta. Istovremeno, slabija površinska ciklona pruža se u sjeverozapadnom dijelu Sredozemnog mora, u blizini Balearskog otočja. Polje vjetra na visini od 500 hPa otkriva prisutnost snažne mlazne struje koja se rasprostire od Gibraltarskih vrata do zapadne Italije. Brzine jugozapadnih vjetrova u mlaznoj struji premašuju 32 m/s zapadno od Sicilskog prolaza, a zatim naglo opadaju nad prolazom. Polje temperature na visini od 850 hPa otkriva prodor toplog zraka u donjoj troposferi koji se pruža u smjeru sjeveroistoka te je smješten ispod nestabilnog sloja srednje troposfere, jugozapadno od Sicilije.

Slabija površinska ciklona prisutna je nad Tirenskim morem tijekom događaja 2. lipnja, s minimumom tlaka zraka položenim nad jugoistočnom obalom Sardinije. Mlazna struja u srednjoj troposferi nalazi se na obodu površinske ciklone, s brzinama vjetra koje dosežu maksimalnih 24 m/s nad Sicilskim prolazom. Polje temperature u donjoj troposferi otkriva izraženu temperaturnu frontu položenu nad istočnim dijelom Sicilskog prolaza koja odvaja topli afrički zrak od hladnijeg europskog zraka. Fronta ima smjer pružanja jugozapad-sjeveroistok. Srednja troposfera je nestabilna nad kopnom Afrike. Treba napomenuti da su ovi sinoptički uzorci dobiveni korištenjem reanalize koja zbog svoje vremenske i prostorne razlučivosti nije u mogućnosti u potpunosti reproducirati mezoskalne poremećaje koji su odgovorni za nastanak meteoroloških tsunamija. Stoga intenzitet atmosferskih poremećaja koji uzrokuju *marrobbio* može biti podcijenjen, osobito kada su u pitanju umjereni događaji.

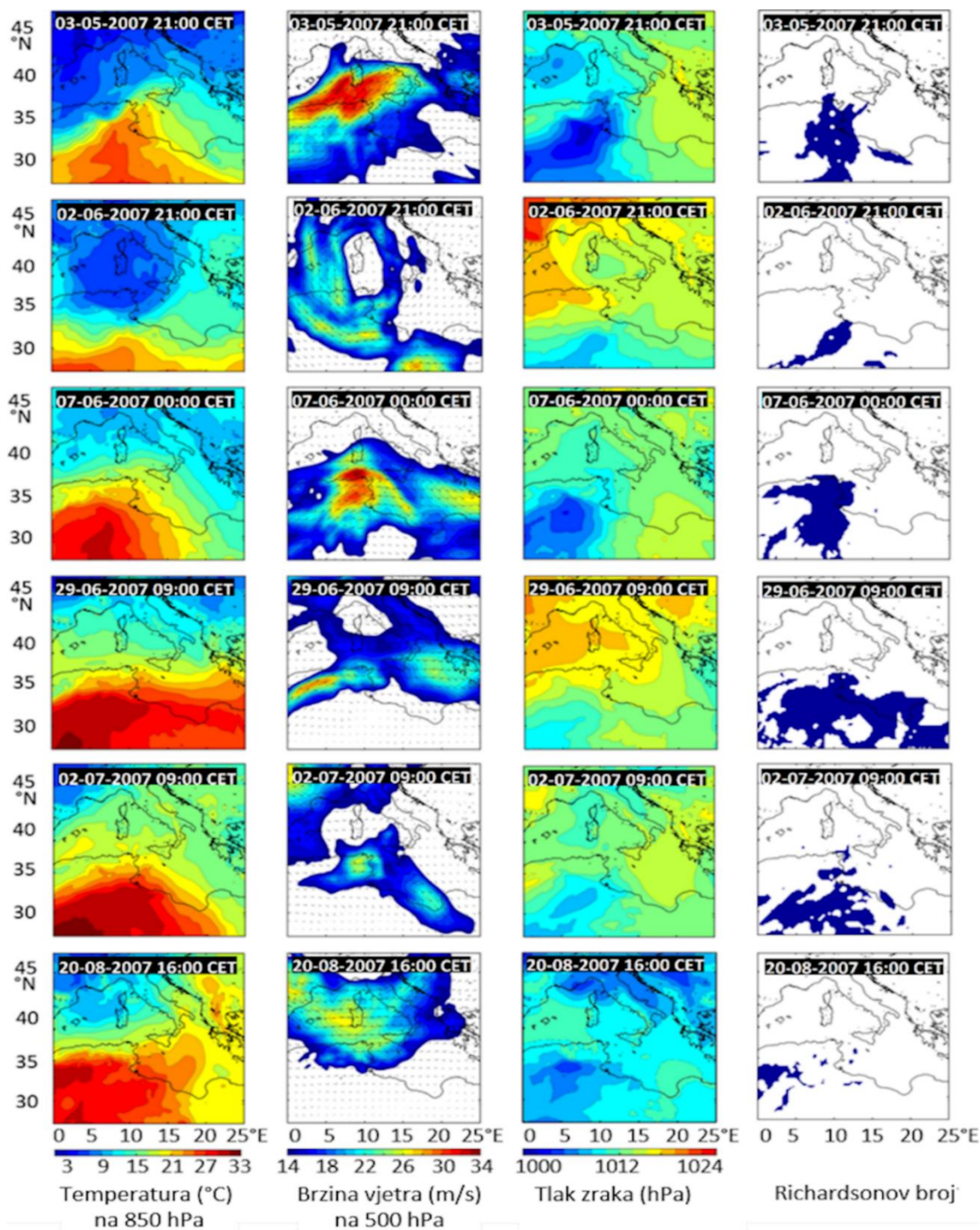
Tijekom događaja 7. - 8. lipnja mlazna struja je snažnija nego tijekom prethodnog promatranog događaja. Brzina zapadnih-jugozapadnih vjetrova doseže maksimum iznad zapadnog dijela Sicilskog prolaza i iznosi oko 28 m/s. Nestabilni slojevi srednje troposfere pružaju se nad obalom Tunisa i dalje prema središtu Afrike. Prodor toplog zraka u donjoj troposferi prema sjeveroistoku vidljiv je sve do središnjeg dijela Sredozemnog mora, što je dublje nego u prethodnim događajima. Sustav niskog tlaka zraka pruža se nad zapadnim dijelom Sredozemnog mora i postiže minimum od 1002 hPa nad kopnom sjeverne Afrike.

Nešto drugačija sinoptička situacija vidljiva je tijekom događaja 29. lipnja. Naime, mlazna struja u srednjoj troposferi je vrlo uska i linijskog oblika, za razliku od cirkularnih oblika u ostalim događajima. Karakterizirana je zapadnim vjetrovima brzine do 30 m/s s maksimumom

postignutim na kopnom Alžira. Tlak zraka je viši nego u ostalim promatranim događajima, a termalna fronta u donjoj troposferi orijentirana je u smjeru zapad-istok. Srednja troposfera je nestabilna na cijeloj južnoj polovici promatranog područja, što obuhvaća najveću površinu od svih događaja.

Sinoptički uzorci tijekom događaja 2. srpnja nalik su na uzorke u drugom promatranom događaju (2. lipnja). Slaba površinska ciklona pruža se nad otocima Sardinijom i Korzikom. Sjeverozapadni vjetrovi u srednjoj troposferi dosežu maksimalnu brzinu od 26 m/s ispred jugozapadne obale Sicilije. Na prednjem dijelu mlazne struje vidljive su nestabilnosti.

Posljednji promatrani događaj, 20. kolovoza, karakteriziran je zapadnim vjetrovima u srednjoj troposferi, brzine do 26 m/s. Maksimum brzine je smješten iznad središnjeg dijela Sredozemnog mora, gdje je mlazna struja bila najšira. Tlak zraka na cijelom promatranom području ne prelazi 1014 hPa, a sustav niskog tlaka zraka nalazi se iznad sjeverne Italije i Jadranskog mora, te je na jugozapadnom rubu okružen mlaznom strujom. Prodor toplog zraka na 850 hPa proteže se prema sjeverozapadu, sve do Balkanskog poluotoka, a termalna fronta se pruža preko otoka Sicilije.



**Slika 43.** Temperatura na 850 hPa (lijevo), brzina i smjer vjetra na 500 hPa (srednje lijevo), tlak zraka (srednje desno) i najmanji Richardsonov broj na visinama od 400 do 800 hPa (osjenčano ako je manji od 0.5) (desno) za sve promatrane događaje *marrobbia*.

### 6.3.2. Analiza radio-sondažnih mjerenja

Kako bi se dodatno analizirala situacija u atmosferi tijekom *marrobbia*, osim podataka reanalize ERA5 analizirana su i radio-sondažna mjerenja. Meteorološka postaja s radio-

sondažnim mjerenjima koja je najbliža promatranim mareografskim i mikrobarografskim postajama je postaja Trapani, s koje su preuzeti podaci vertikalnih profila temperature zraka, temperature rosišta, brzine vjetra i Richardsonovog broja. Za prvi događaj podaci brzine vjetra nisu dostupni kroz 24 h prije ili poslije vrhunca događaja (3. svibnja 21 h), zbog čega on ovdje nije analiziran.

Vertikalni profil temperature 3. lipnja u 2 h ukazuje na to da je većina atmosferskog profila zasićena, osim dijela između površine i visine od 840 hPa te između 630 i 520 hPa, gdje su prevladavale suhe nezasićene zračne mase. Vjetrovi na površini su bili slabi, ali su postupno jačali s visinom, do visine od 300 hPa (9 km), gdje su dosegli brzinu od 37 m/s. Vjetar je veće brzine i smjera zakrenutog više prema jugu (smjer nije pokazan na slici) u odnosu na vjetar iz reanalize ERA5 (slika 44). Richardsonov broj otkriva nekoliko nestabilnih slojeva između 250 i 500 hPa.

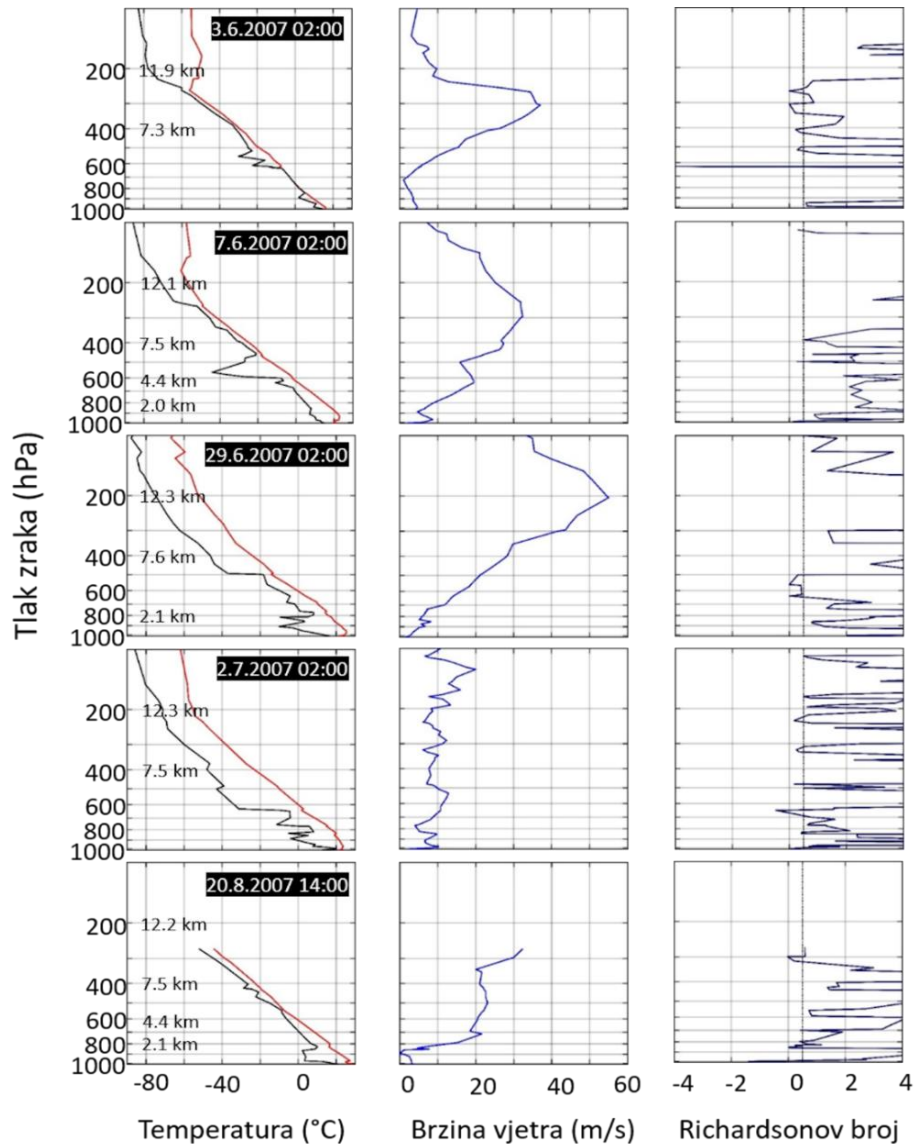
Vertikalni profili temperature i vjetra zabilježeni tijekom događaja 7. lipnja su bili nešto drugačiji nego u prošlom promatranom događaju, sa zapadnim vjetrovima kojima postupno raste brzina od površine do visine od 300 hPa, na kojoj doseže 31 m/s. Sloj najmanje stabilnosti je između 400 i 500 hPa visine. Suha zračna masa prisutna je na visini između 500 i 600 hPa, a vidljiva je i temperaturna inverzija na površini.

Zapadni vjetrovi i suha zračna masa na visini od 650 i 950 hPa su bili prisutni 29. lipnja u 2 h, neposredno prije nastupanja meteorološkog tsunamija. Nad njima se nadvio nestabilni sloj zraka do visine od 500 hPa.

Relativno slabi vjetrovi (brzine do 12 m/s) u srednjoj troposferi su zabilježeni 2. srpnja u 2 h, prije vrhunca sljedećeg događaja. Nestabilni slojevi prožimali su se cijelom troposferom. Vertikalna struktura vjetra stoga je bila drugačija u odnosu na ostale događaje, a brzina nije prelazila 20 m/s. No, izražena prostorna varijabilost vjetra je uočena u podacima reanalize, što može ukazivati na varijabilnosti u mlaznoj struji koje mogu biti neopažene u radio-sondažnim mjerenjima.

Vertikalna struktura temperature i vjetra iznad postaje Trapani na početku posljednjeg višestrukog meteorološkog tsunamija, 20. kolovoza u 14 h, tipična je za meteorološke tsunamije u Sredozemnom moru. Vertikalni profili imaju sljedeće karakteristike: (i) zapadne-jugozapadne vjetrove kojima brzina raste s visinom i doseže maksimum od 22 m/s na 550 hPa, zatim stagniraju te ponovno rastu u gornjem dijelu troposfere, na visini od 300 hPa, (ii) nestabilne slojeve na cijelom profilu, osim na visinama stagnacije vjetra, (iii) suhi zrak afričkog

porijekla u donjoj troposferi, između 850 i 970 hPa, te (iv) temperaturnu inverziju na 970 hPa. Slična vertikalna struktura s nestabilnim slojevima između 450 i 600 hPa, suhom zračnom masom i temperaturnom inverzijom uočena je i tijekom drugog maksimuma događaja, 22. kolovoza u 2 h (nije pokazano na slici). Podaci vjetra u navedenom vremenu nisu bili dostupni. Ovakva sličnost profila na 36 h odmaka ukazuje na to da su sinoptički uvjeti povoljni za nastanak meteorološkog tsunamija bili prisutni nad područjem tijekom duljeg razdoblja (20. - 22. kolovoza).



**Slika 44.** Vertikalni profili temperature (crveno), temperature rosišta (crno) (lijevo), brzine vjetra (sredina) i Richardsonovog broja (desno) izmjereni na postaji Trapani 3.6.2007. u 02:00, 7.6.2007 u 02:00, 29.6.2007. u 02:00, 2.7.2007. u 02:00 i 20.8.2007. u 14:00.

Isprekidane crne linije na desnim grafovima označavaju vrijednost Richardsonovog broja od 0.5.

#### 6.4. Diskusija

Kako bi se bolje razumjeli mehanizmi nastanka i učinci fenomena *marrobbia* na jugozapadnoj obali Sicilije, 2007. godine proveden je eksperiment tijekom kojeg su postavljena četiri mikrobarografa u okolini grada Mazara del Vallo i jedan mareograf u luci. Tijekom istraživanog razdoblja opaženi su slabiji i umjereni meteorološki tsunamiji, s maksimalnim rasponom oscilacija na postaji MAZ od 54 cm.

Analiza sinoptičkih polja tijekom izabranih epizoda otkriva situaciju prepoznatljivu tijekom destruktivnih meteoroloških tsunamija (Ramis i Jansà, 1983) i drugih visokofrekventnih oscilacija razine mora (Šepić i sur., 2015b) u Sredozemnom moru. Ovi sinoptički uvjeti su pogodni za nastanak i propagiranje oscilacija tlaka zraka koje rezonantno generiraju visokofrekventne oscilacije razine mora. Svi osim jednog izdvojenog događaja su popraćeni nestabilnostima u srednjoj troposferi, što sugerira da je mehanizam zarobljavanja valova ključan za pojavu ovog fenomena (Lindzen i Tung, 1976; Monserrat i Thorpe, 1996). Malo drugačiji sinoptički uvjeti prisutni su za vrijeme događaja 2. lipnja, za kojeg nije zabilježen prodor toplog i suhog zraka u donjoj troposferi, što daje naslutiti da je neki drugi mehanizam bio zaslužan za meteorološki tsunami, primjerice udvajanje atmosferskog vala i konvektivnog oblaka, kvazi-linearni konvektivni sustav ili drugi (Churchill i sur., 1995; Belušić i sur., 2007; Olabarrieta i sur. 2017; Rabinovich 2020).

Sinoptički uvjeti mogu ukazati na mehanizme koji su odgovorni za meteorološki tsunami, no ne mogu omogućiti kvantitativnu procjenu jačine atmosferskog poremećaja. Korak naprijed u toj namjeri moglo bi biti reproduciranje mezoskalnih procesa atmosferskim modelima visoke razlučivosti (Renault i sur., 2011, Horvath i Vilibić, 2014, Horvath i sur., 2018). Na ovaj način moglo bi se vidjeti jesu li atmosferski procesi relevantni za *marrobbio* nalik atmosferskim procesima tijekom meteoroloških tsunamija na drugim lokacijama u Sredozemnom moru. No, navedeni modeli i dalje nemaju kapacitet za pravilnu reprodukciju mjerenja na vremenskim i prostornim skalama meteoroloških tsunamija (Denamiel i sur., 2019). Reprodukcijska valova *marrobbia* je napravljena u studiji Candela i sur. (1999) forsiranjem oceanskog modela sintetiziranim atmosferskim poremećajem, no razlučivost modela je bila nedovoljna (20 km) da bi se potpuno reproducirao fenomen. Povećanje razlučivosti u obalnim područjima bi moglo biti put ka rješenju, no problem bi mogao predstavljati nedostatak batimetrijskih podataka visoke razlučivosti. Nedovoljna razlučivost modela u obalnim područjima može rezultirati podcjenjivanjem valnih visina (Renault i sur., 1983; Denamiel i sur., 2019). To bi se osobito

odrazilo na području Mazare del Vallo koja ima nagle promjene dubine na šelfu, primjerice kanal širine nekoliko kilometara i dubine veće za oko 100 m od ostatka šelfa. Ovakve promjene batimetrije na malim prostornim skalama mogu utjecati na dinamiku valova koji se približavaju obali. Slično je i na drugim lokacijama na kojima se učestalo javljaju meteorološki tsunamiji, primjerice u zaljevu Nagasaki u Japanu (Hibiya i Kajiura, 1982), mjestu pojave fenomena *abiki*, u kojem je kanal širine 100 km s dubinama većim od 200 m smješten ispred šelfa širine 50 km.

Preostaje pitanje na kojem mjestu se generira većina energije *marrobbia* koji se javlja u luci Mazara del Vallo. Za očekivati je da se energija prenosi iz atmosfere u more na vanjskom šelfu ispred obale, jer je širina šelfa od 80 km nekoliko puta veća od valne duljine atmosferskog poremećaja (nekoliko desetaka km). U takvim slučajevima valne visine mogu se povećati i do nekoliko puta (Vilibić, 2008a; Williams i sur., 2021b). Ličer i sur. (2017) su pokazali da je šelf širine 40 km ispred luke Ciutadella na Menorci mjesto gdje se stvara najveći dio energije meteoroloških tsunamija, dok ostatak šelfa doprinosi manje od 25 % ukupnoj valnoj visini u Ciutadelli. Dakle, pitanje je koliko je energije *marrobbia* generirano na vanjskom, a koliko na unutarnjem šelfu ispred Mazare del Vallo, te koliki je doprinos topografskih efekata za koje je pokazano da mogu biti značajni (Liu i sur., 2002).



## 7. ZAKLJUČCI

Mjerenja visine razine mora nužna su za razumijevanje, kvantificiranje i detekciju oscilacija razine mora. Zbog tehnoloških ograničenja u prošlosti, tadašnjih mehanizama mareografskih postaja i manjih kapaciteta pohrane podataka, podaci visine razine mora su do nedavno mjereni sa satnom razlučivosti te se stoga ne mogu koristiti za istraživanja procesa na minutnim periodima. Naime, za istraživanje takvih procesa nužno je koristiti podatke s razlučivosti od jedne minute ili manje. S razvojem tehnologije pojavili su se napredniji instrumenti za mjerenje visine razine mora, koji u stvarnom vremenu pohranjuju podatke visoke razlučivosti u digitalnom obliku. No, kvaliteta podataka i dalje predstavlja izazov.

Kratkoperiodične oscilacije razine mora, njihove karakteristike, mehanizmi nastanka i učinci na obalama su i dalje nedovoljno istraženi u svim područjima svijeta. No, uslijed klimatskih promjena i općeg porasta razine mora, očekivan je porast magnitude i učestalosti ekstremnih visina razine mora (Hunter, 2010; Arns i sur., 2013; Calafat i Marcos, 2020), zbog čega broj njihovih istraživanja kontinuirano raste. S pojavom globalnih i regionalnih kontinuiranih i dugoročnih podataka visine razine mora u posljednjem desetljeću, omogućena su sustavna istraživanja visokofrekventnih oscilacija razine mora.

U sklopu ove disertacije kreiran je minutni skup podataka visine razine mora MISELA, koji je, do danas, jedini skup podataka koji omogućuje globalna istraživanja visokofrekventnih oscilacija. Za razliku od ostalih dostupnih baza i repozitorija podataka, MISELA je jedinstvena po tome što:

- sadrži podatke kontrolirane kvalitete koji se mogu koristiti za znanstvena istraživanja,
- u kontrolu kvalitete podataka uključen je vizualni pregled podataka koji je omogućio detaljno tretiranje podataka i individualan pristup postajama,
- sadrži mjerenja s 331 postaje diljem svijeta koja omogućuju globalna, regionalna i lokalna istraživanja atmosferski uzrokovanih visokofrekventnih oscilacija razine mora,
- ima mogućnost za nadogradnju nadopunjavanjem s novim dostupnim podacima i postajama i na taj način stimulira daljnji napredak u istraživanju ove vrste oscilacija razine mora.

Nakon inicijalne globalne studije autora Vilibić i Šepić (2017), ova doktorska disertacija predstavlja napredak u konstrukciji globalne klimatologije visokofrekventnih oscilacija razine mora s atmosferskim uzrokom. Neki od glavnih zaključaka koji su proizašli iz regionalnih i globalnih analiza podataka iz skupa MISELA su:

- Visokofrekventne oscilacije generalno nemaju velike raspone i u prosjeku značajno ne doprinose ukupnim oscilacijama razine mora.
- No, sposobnost amplificiranja raspona visokofrekventnih oscilacija do nekoliko desetaka puta u odnosu na prosječne vrijednosti može uzrokovati poplavljanje obala za vrijeme ekstremnih visina razine mora, osobito ako se pojavljuju u kombinaciji s visokim vodama ili olujnim usporima.
- Pojačavanje visokofrekventnih oscilacija razine mora u nekom području je posljedica (i) podobnosti obalne topografije i batimetrije da rezonantno poveća nadolazeće valove otvorenog mora, i/ili (ii) intenziteta, brzine i smjera propagiranja atmosferskih poremećaja koji generiraju valove otvorenog mora.
- Umjerene visokofrekventne oscilacije razine mora uglavnom postižu maksimalne vrijednosti zimi, a ekstremne oscilacije imaju slabije izraženi sezonski ciklus, kako u kojem dijelu svijeta, i javljaju se tijekom cijele godine, otprilike podjednako u toplom i hladnom dijelu godine.
- Ekstremne oscilacije razine mora se sinkrono pojavljuju na obližnjim postajama u umjerenom pojasu u 20-32% slučajeva, što upućuje na njihovu povezanost kroz zajedničke atmosferske poremećaje koji propagiraju područjem. Kako su takvi sinoptički sustavi odsutni u tropskim područjima, sinkronicitet tamo nije zabilježen.

Osim analize karakteristika visokofrekventnih oscilacija razine mora, u disertaciji je kvantificirana njihova povezanost sa sinoptičkim uvjetima. Sinoptički uvjeti su opisani varijablama za koje je prethodno utvrđena povezanost s meteorološkim tsunamijima. Sljedeći zaključci proizašli su iz analize:

- Varijabla koja je ostvarila najveću korelaciju s rasponima visokofrekventnih oscilacija je brzina vjetera u srednjoj troposferi. Ovaj rezultat upućuje da se generiranje atmosferskih poremećaja pogodnih za ekstremne oscilacije odvija u sklopu mlazne struje u srednjoj troposferi.
- Uz vjetar u srednjoj troposferi, sljedeća varijabla s najvećim korelacijama je relativna vlažnost u srednjoj troposferi, što odražava nestabilnosti u mlaznoj struji i upućuje na to da je mehanizam zarobljavanja valova dominantan za propagiranje atmosferskih poremećaja.

- Varijabla vertikalnog gradijenta temperature u donjoj troposferi ostvarila je najmanje korelacije s visokofrekventnim oscilacijama, što ukazuje na to da inverzija temperature nije učestalo povezana s ekstremnim oscilacijama razine mora.
- Ekstremni događaji diljem svijeta su u pravilu popraćeni specifičnim sinoptičkim poljima koji uključuju snažne vjetrove u srednjoj troposferi, termalne fronte u donjoj troposferi i površinske ciklone u blizini pogođene postaje, s ponekim razlikama između sjeverne i južne hemisfere.
- Sinoptički indeks, konstruiran korištenjem sinoptičkih varijabli, ostvario je najveće korelacije s visokofrekventnim oscilacijama u umjerenim geografskim širinama, osobito u Sredozemnom moru, što sugerira da je korištena metodologija najprimjerenija za ova područja. Sam indeks podcjenjuje visoke vrijednosti raspona oscilacija.

Osim globalne analize visokofrekventnih oscilacija razine mora, u disertaciji je zasebno, kao jedan tip ove vrste oscilacija u svijetu, analiziran i fenomen *marrobbio* koji se javlja na obalama otoka Sicilije i Lampeduse. Analize se temelje na mjerenjima iz 2007. godine tijekom koje je zabilježeno šest *marrobbia* s rasponom oscilacija većim od 40 cm u gradu Mazara del Vallo, lokaciji učestalog javljanja ovog fenomena. Zabilježeni događaji imaju sljedeće karakteristike:

- Svi izdvojeni događaji su slabijeg ili umjerenog intenziteta, s rasponom oscilacija na postaji u Mazara del Vallo do 54 cm.
- Sinoptički uvjeti tijekom izdvojenih događaja nalik su sinoptičkim uvjetima tijekom destruktivnih meteoroloških tsunamija na drugim lokacijama u Sredozemnom moru, a svi osim jednog događaja popraćeni su nestabilnostima u srednjoj troposferi, što sugerira da je mehanizam zarobljavanja atmosferskih težinskih valova relevantan za generiranje oscilacija razine mora.
- Procijenjeno je da atmosferski poremećaji putuju prema istoku brzinom koja odgovara pojavi rezonantnih uvjeta na šelfu.

Ova istraživanja otvaraju prostor za nastavak istraživanja visokofrekventnih oscilacija razine mora u budućnosti. Moguća istraživanja uključuju globalnu procjenu intenziteta i učestalosti meteoroloških tsunamija u budućoj klimi, pri različitim scenarijima emitiranja stakleničkih plinova, što je do sada napravljeno samo za područje Balearskog otočja (Vilibić i sur., 2018). Također, koristeći podatke iz skupa MISELA moguće je napraviti regionalna sustavna istraživanja u pojedinim područjima, koja su dobro pokrivena postajama i imaju duge

nizove podataka, primjerice Australija i Baltičko more. Na taj način bi se mogle utvrditi razlike u atmosferskim izvorima njihovih pojava u različitim područjima svijeta. Otvorene su mogućnosti i prognoze meteoroloških tsunamija temeljem (i) detekcija oscilacija na određenim obližnjim lokacijama prije njihovih pojava, ili (ii) detekcija specifičnih sinoptičkih uvjeta, podrazumijevajući pouzdanu vezu između sinoptičke situacije i meteoroloških tsunamija. Naposljetku, predikcija visokofrekventnih oscilacija i njihovih ekstremnih manifestacija - meteoroloških tsunamija - predstavlja izazov, no svakako je tema vrijedna budućih istraživanja.

## 8. EXTENDED ABSTRACT

Extreme sea levels have always represented a hazard in coastal zones and a potential danger to the coastal infrastructure and populations. Therefore, the understanding of extreme sea levels and estimation of their future appearances and hazardousness is essential for avoiding great damages and fatalities, as well as for the management of coastal zones in general. Among different types of sea level oscillations, those with longer periods, such as tides, storm surges, seasonal cycles of sea level and others, have a long tradition in research. However, sea-level oscillations with periods ranging from a few minutes to a few hours can also contribute to the sea-level extremes, yet, high-resolution data is required for their study. Following a few recent hazardous seismic tsunamis, many tide gauges worldwide have increased their sampling frequencies during the last decade, which has enabled research of short-period sea-level oscillations and significantly improved research of the sea-level extremes. In addition to the seismic tsunamis which are generated by earthquakes, volcanic eruptions or landslides and are very well known to the public, less recognized are meteorological tsunamis or meteotsunamis. Meteorological tsunamis are potentially destructive sea-level oscillations which occur on tsunami periods (from a few minutes to a few tens of minutes) and are generated by pronounced travelling atmospheric disturbances (Monserrat et al., 2006; Rabinovich, 2020). To create a meteorological tsunami, a specific combination of conditions is required, which is why they reach destructive strengths only in specific world's locations. Apart from hazardous meteorological tsunamis, moderate and weaker high-frequency sea-level oscillations are recorded by the world tide gauges. Vilibić and Šepić (2017) conducted a first global study which investigated total high-frequency sea-level signal on a global scale. An interesting result has arisen from this study, implying that the contribution of the high-frequency sea-level range to the total sea-level range can reach up to 50% during extreme episodes in the regions with low tidal range.

In this PhD research a global climatology of the atmospherically-induced high-frequency sea-level oscillations is created, documenting their characteristics such as variances, ranges, spectral energies and synchronicities of the extreme events, as well as their connection with synoptic variables and the synoptic setup during extreme events. However, up today, no quality-checked global sea-level datasets afford sufficiently high temporal resolution to investigate oscillations that act on periods up to a few hours. Therefore, a new global 1 min sea-level dataset – MISELA (MInute SEa-Level Analysis data) – is developed, encompassing quality-checked records of nonseismic sea-level oscillations at tsunami timescales ( $T < 2$  h)

obtained from 331 tide-gauge sites. The quality control procedures used in the construction of the MISELA dataset include (i) the removal of the tidal signal, (ii) automatic spike detection procedures that detect out-of-range values, (iii) the visual inspection of the detided series to remove low-quality data, (iv) the exclusions of the records observed during seismic tsunamis, (v) the linear interpolation of data gaps shorter than one week, and (vi) the filtering of the quality checked series to restrict to the high-frequency sea-level signal. The MISELA dataset has a satisfactory spatial distribution for the global research of atmospherically driven phenomena at tsunami timescales, however, in different areas of the World Ocean, data series vary in length, spanning from 2004 to 2019. The tide-gauge network is denser in the areas with a long history of sea-level monitoring, like the Mediterranean Sea, both the East and West coasts of the US and the coasts of Chile, Australia, Japan and New Zealand.

After the creation of the MISELA dataset, the data are analysed to determine the typical ranges, seasons and characteristics of moderate and extreme manifestations of nonseismic sea-level oscillations at tsunami timescales. Despite the rather low variance (up to  $6.6 \text{ cm}^2$  on average), the range of high-frequency sea-level oscillations may be large during extreme episodes, over half a meter in some regions on average and even more than one meter at certain stations. This emphasizes the ability of the oscillations to intensify, which is determined by the (i) capacity of coastal and shelf topography and bathymetry to resonantly amplify the incoming oscillations or oscillations generated at the shelf and (ii) intensity and frequency of atmospheric processes capable of generating long ocean waves. The spectral analysis confirms the dependence of amplification properties on the bathymetry, as the energy of extreme oscillations can be larger at lower frequencies at some stations and at higher frequencies at other stations. The oscillations are highest in the mid-latitudes and decrease towards polar and tropical regions. Moderate oscillations show clear winter maxima, while a less pronounced seasonal pattern is evident for the most extreme oscillations, which may occur throughout a year. Synchronicity in extreme events between neighbouring stations in mid-latitudes is detected for 20–32% of all episodes, suggesting possible connectivity between the episodes through the common atmospheric synoptic patterns propagating over a region.

Next, connections between nonseismic high-frequency sea-level oscillations and synoptic patterns are globally quantified. The patterns are represented by variables which have been documented locally to conjoin meteotsunamis. Mid-troposphere wind speed is the synoptic variable having the highest correlations at roughly one third of all sites, which emphasizes the importance of the jet streams in mid-troposphere for the generation and longevity of favorable

atmospheric disturbances. Further, extreme events are accompanied by a specific synoptic pattern, including strong mid-troposphere jet streams, low-troposphere thermal fronts and surface cyclones in the vicinity of the affected area, with some differences spotted between the Southern and Northern Hemisphere. This motivated the creation of the synoptic index that is constructed using a prescribed set of synoptic variables chosen at each station individually. The correlations between this index and the ranges of high-frequency oscillations vary between sites but are generally higher in mid-latitudes and particularly in the Mediterranean Sea where they reach 0.76, suggesting that the proposed methodology is most suitable for these areas. However, the maximum ranges of the sea-level oscillations tend to be underestimated by the index.

Lastly, the PhD research quantifies the atmospheric and oceanic conditions related to the phenomenon of *marrobbio*, a kind of meteotsunami that is frequently observed in the Strait of Sicily. Using the sea level and air pressure observations acquired during the experiment in 2007 carried out along the southwestern coast of Sicily, six events are analysed in detail to better understand the source and characteristics of *marrobbio* events. Rapid air pressure and sea level oscillations are measured simultaneously during *marrobbio* events and peaks are mostly observed in the city of Mazara del Vallo, a known hot-spot of *marrobbio* phenomena. All observed events are characterised by a weak or moderate intensity, having range of oscillations in Mazara del Vallo up to 54 cm. The synoptic setting observed during the selected events resembles synoptic setting observed during the destructive Mediterranean meteotsunamis. Atmospheric disturbances are estimated to propagate towards east-northeast with a speed that is conducive for resonant conditions on the outer shelf. Aside from several experiments when the sea level was measured, no long-term measurements are available for Mazara del Vallo, which is why a need for establishing long-term high-frequency observations at *marrobbio* hot-spots is emphasized in the doctoral study.

Finally, as tide gauge observations are relevant for the geosciences and their continuity and accuracy are essential for understanding, quantifying and detecting sea-level processes, the importance of financial and effortful investments for developing tide-gauge networks and providing research-quality data at minute timescales is emphasised throughout this thesis. Additionally, with climate change and accelerated sea-level rise, the impact of high-frequency oscillations on the coastal zones is expected to be enlarged, which is why they are coming to the center of attention of the scientific and coastal communities.

## 9. POPIS LITERATURE

Aarup, T., Wöppelmann, G., Woodworth, P.L., Hernandez, F., Vanhoorne, B., Schöne, T., Thompson, P.R., 2019. Comments on the article “Uncertainty and bias in electronic tide-gauge records: evidence from collocated sensors” by Stella Pytharouli, Spyros Chaikalis, Stathis C. Stiros in *Measurement* (Volume 125, September 2018). *Measurement*, 135, 613-616. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.007>

Abdennadher, J., Boukthir, M., 2006. Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian Shelf and the Strait of Sicily. *J. Mar. Syst.* 63(3-4), 162–182. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.07.001>

Airy, G.B., 1878. On the tides at Malta. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 169:123–138

Amato, A., 2020. Some reflections on tsunami Early Warning Systems and their impact, with a look at the NEAMTWS. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 61, 403-420. <https://doi.org/10.4430/bgta0329>

Arabelos, D.N., Papazachariou, D.Z., Contadakis, M.E., Spatalas, S.D., 2011. A new tide model for the Mediterranean Sea based on altimetry and tide gauge assimilation. *Ocean Sci.* 7, 429-444. <https://doi.org/10.5194/os-7-429-2011>

Arbic, B.K., St-Laurent, P., Sutherland, G., Garrett, C., 2007. On the resonance and influence of the tides in Ungava Bay and Hudson Strait. *Geophys. Res. Lett.* 34, L17606. <https://doi.org/10.1029/2007GL030845>

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I. D., Jensen, J., Pattiaratchi, C., 2013. Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise. *Coastal Eng.* 81, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003>

Bechle, A.J., Wu, C.H., Kristovich, D.A.R., Anderson, E.J., Schwab, D.J., Rabinovich, A.B., 2016. Meteotsunamis in the Laurentian Great Lakes. *Sci. Rep.* 6, 37832. <https://doi.org/10.1038/srep37832>

Belušić, D., Grisogono, B., Klaić, Z.B., 2007. Atmospheric origin of the devastating coupled air–sea event in the east Adriatic. *J. Geophys. Res.* 112, D17111. <https://doi.org/10.1029/2006JD008204>



- Belušić, D., Strelec Mahović, N., 2009. Detecting and following atmospheric disturbances with a potential to generate meteotsunamis in the Adriatic. *Phys. Chem. Earth* 34, 918–927. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.08.009>
- Calafat, F. M., Marcos, M., 2020. Probabilistic reanalysis of storm surge extremes in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 117, 1877-1883. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913049117>
- Camelo, J., Mayo, T. L., Gutmann, E. D., 2020. Projected climate change impacts on hurricane storm surge inundation in the coastal United States. *Front. Built Environ.*, 6, 588049. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.588049>
- Candela, J., Mazzola, S., Sammari, C., Limeburner, R., Lozano, C.J., Patti, B., Bonnano, A. 1999. The ‘mad sea’ phenomenon in the Strait of Sicily. *J. Phys. Oceanogr.* 29, 2210–2231. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2210:TMSPLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2210:TMSPLIT>2.0.CO;2)
- Cannon, A.J., 2012. Neural networks for probabilistic environmental prediction: Conditional Density Estimation Network Creation and Evaluation (CaDENCE) in R. *Comput. Geosci.* 41, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.023>
- Cassano, J.J., Cassano, E.N., Seefeldt, M.W., Gutowski, W.J., Glisan, J.M., 2016. Synoptic conditions during wintertime temperature extremes in Alaska. *J. Geophys. Res. Atmos.* 121(7), 3241–3262. <https://doi.org/10.1002/2015jd024404>
- Cheng, L., AghaKouchak, A., Gilleland, E., Katz, R.W., 2014. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Clim. Change* 127, 353–369. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1254-5>
- Chlieh, M., Avouac, J.P., Hjorleifsdottir, V., Song, T.R.A., Ji, C., Sieh, K., Sladen, A., Hebert, H., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Galetzka, J., 2007. Coseismic slip and afterslip of the great M<sub>w</sub> 9.15 Sumatra-Andaman earthquake of 2004. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97, S152-S173. <https://doi.org/10.1785/0120050631>
- Churchill, D.D., Hourston, S.H., Bond, N.A., 1995. The Daytona Beach wave of 3-4 July 1992: a shallow water gravity wave forced by a propagating squall line. *B. Am. Meteorol. Soc.* 76, 21-32. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0021:TDBWOJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0021:TDBWOJ>2.0.CO;2)
- Colucci, P., Michelato, A., 1976. An approach to the study of the “Marrubbio” phenomenon. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 19, 3–10.

- Cook, R.D., Su, Z., Yang, Y., 2015. envlp: A MATLAB toolbox for computing envelope estimators in multivariate analysis. *J. Stat. Softw.* 62(8), 1–20. <https://doi.org/10.18637/jss.v062.i08>
- de Jong, M.P.C., Holthuijsen, L.H., Battjes, J.A., 2003. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 108, 3117. <https://doi.org/10.1029/2002JC001422>
- de Jong, M.P.C., Battjes, J.A., 2004. Low-frequency sea waves generated by atmospheric convection cells. *J. Geophys. Res. Oceans* 109, C01011. <https://doi.org/10.1029/2003JC001931>
- Defant, A., 1961. *Physical Oceanography*. Pergamon Press, London.
- Denamiel, C., Šepić, J., Ivanković, D., Vilibić, I., 2019. The Adriatic Sea and coast modelling suite: Evaluation of the meteotsunami forecast component. *Ocean Model.* 135, 71-93. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.02.003>
- Denamiel, C., Tojčić, I., Vilibić, I., 2022. Meteotsunamis in orography-free, flat bathymetry and warming climate conditions. *J. Geophys. Res. Oceans* 127(1). <https://doi.org/10.1029/2021JC017386>
- Dodet, G., Melet, A., Ardhuin, F., Bertin, X., Idier, D., Almar, R., 2019. The contribution of wind-generated waves to coastal sea-level changes. *Survey Geophys.* 40, 1563-1601. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09557-5>
- Domingues, R., Goni, G., Baringer, M., Volkov, D., 2018. What caused the accelerated sea level changes along the United States East Coast during 2010–2015?. *Geophys. Res. Lett.* 45:13367–13376. <https://doi.org/10.1029/2018GL081183>
- Dragani, W.C., Mazio, C.A., Nuñez, M.N., 2002. Sea level oscillations in coastal waters of the Buenos Aires province, Argentina. *Cont. Shelf Res.* 22, 779-790. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00096-6)
- Drago, A.F., 2009. Sea level variability and the ‘Milghuba’ seiche oscillations in the northern coast of Malta, Central Mediterranean. *Phys. Chem. Earth* 34:948–970. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.002>

- Durrán, D.R., Klemp, J.B., 1982. On the effects of moisture on Brunt-Väisälä frequency. *J. Atmos. Sci.* 39:2152–2158. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<2152:OTEOMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<2152:OTEOMO>2.0.CO;2)
- Dusek G., DiVeglio C., Licate L., Heilman, L., Kirk, K., Paternostro, C., Miller, A., 2019. A meteotsunami climatology along the U.S. East Coast. *B. Am. Meteorol. Soc.* 100, 1329–1345. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0206.1>
- Emanuel, K., DesAutels, C., Holloway, C., Korty, R., 2004. Environmental control of tropical cyclone intensity. *J. Atmos. Sci.* 61(7), 834-858. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0843:ECOTCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0843:ECOTCI>2.0.CO;2)
- EuroGOOS DATA-MEQ working group, 2010. Recommendations for in-situ data Near Real Time Quality Control. Coriolis Data Centre, 23 pp. <https://doi.org/10.13155/36230>
- Ewing, M., Press, F., Donn, W.L., 1954. An explanation of the Lake Michigan wave of 26 June 1954. *Science* 120(3122), 684-686. <https://doi.org/10.1126/science.120.3122.684>
- Fais, S., Michelato, A., 1980. Surface seiches in the Gulf of Cagliari. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 22, 69-80.
- Farnbach, J.S., 1975. The complex envelope in seismic signal analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65, 951–962. <https://doi.org/10.1785/BSSA0650040951>
- Feng, X., Tsimplis, M.N., Marcos, M., Calafat, F.M., Zheng, J., Jorda, G., Cipollini, P., 2015. Spatial and temporal variations of the seasonal sea level cycle in the northwest Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 7091–7112. <https://doi.org/10.1002/2015JC011154>
- Frank, W.M., Ritchie, E.A., 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. *Mon. Weather Rev.* 127(9), 2044-2061. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2044:EOEFUT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2044:EOEFUT>2.0.CO;2)
- Goring, D.G., 2009. Meteotsunami resulting from the propagation of synoptic-scale weather systems. *Phys. Chem. Earth* 34 (17–18), 1009–1015. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.004>
- Greenspan, H.P., 1956. The generation of edge waves by moving pressure disturbances. *J. Fluid Mech.* 1, 574–592.
- Haigh, I.D., Pickering, M.D., Green, J.A.M., Arbic, B.K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D.F., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D.A., Jänicke, L., Lee, S.B., Müller, M.,

Schindelegger, M., Talke, S.A., Wilmes, S.-B., Woodworth, P.L., 2019. The tides they are a-changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. *Rev. Geophys.* 57, e2018RG000636. <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>

Haigh, I.D., Marcos, M., Talke, S.A., Woodworth, P.L., Hunter, J.R., Hague, B.S., Arns, A., Bradshaw, E., Thompson, P., 2021. GESLA Version 3: A major update to the global higher-frequency sea-level dataset. preprint. <https://doi.org/10.31223/X5MP65>

Hartmann, D.L., 2007. The atmospheric general circulation and its variability. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II.*, 85B, No. 0, 123-143. <https://doi.org/10.2151/jmsj.85B.123>

Haslett, S.K., Mellor, H.E., and Bryant, E.A., 2009. Meteo-tsunami hazard associated with summer thunderstorms in the United Kingdom. *Phys. Chem. Earth* 34, 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.005>

Heidarzadeh, M., Rabinovich, A.B., 2021. Combined hazard of typhoon-generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan. *Nat. Hazards* 106, 1639–1672. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04448-0>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hibiya, T., Kajiura, K., 1982. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 38(3), 172–182. <https://doi.org/10.1007/bf02110288>

Hill, D.F., 2016. Spatial and temporal variability in tidal range: evidence, causes, and effects. *Curr. Clim. Change Rep.* 2(4), 232–241. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0044-8>

Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S., Pugh, J., 2013. New data systems and products at

- the Permanent Service for Mean Sea Level. *J. Coastal. Res.* 288, 493–504. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-12-00175.1>
- Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y., Isitani, D., 1908. Secondary undulations of oceanic tides. *J. Coll. Sci. Imper. Univ. Tokyo* 24, 1–110
- Horvath, K., Vilibić, I., 2014. Atmospheric mesoscale conditions during the Boothbay meteotsunami: a numerical sensitivity study using a high-resolution mesoscale model. *Nat. Hazards* 74, 55-74. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1055-1>
- Horvath, K., Šepić, J., Telišman Prtenjak, M., 2018. Atmospheric forcing conducive for the Adriatic 25 June 2014 meteotsunami event. *Pure Appl. Geophys.* 175, 3817-3837. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1902-1>
- Huang, C., Anderson, E., Liu, Y., Ma, G., Mann, G., Xue, P., 2022. Evaluating essential processes and forecast requirements for meteotsunami-induced coastal flooding. *Nat. Hazards* 110, 1693–1718. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05007-x>
- Hunter, J., 2010. Estimating sea-level extremes under conditions of uncertain sea-level rise. *Clim. Change* 99(3-4), 331–350. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9671-6>
- Hunter, J.R., Woodworth, P.L., Wahl, T., Nicholls, R.J., 2017. Using global tide gauge data to validate and improve the representation of extreme sea levels in flood impact studies. *Global Planet. Change* 156, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.06.007>
- Hurt-Davis, M.G., Piccioni, G., Dettmering, D., Schwatke, C., Passaro, M., Seitz, F., 2021. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 3869–3884. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021>
- IOC, 1997. Global Sea Level Observing System (GLOSS) implementation plan -1997. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 50, 91 pp. & Annexes
- IOC, 2012. Global Sea Level Observing System (GLOSS) Implementation Plan – 2012. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission, 41 pp. 2012. IOC Technical Series No.100. GOOS Report No.194, JCOMM Technical Report No. 66. (English)
- Jansà, A., Monserrat, S., Gomis, D., 2007. The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami. *Adv. Geosci.* 12, 1–4. <https://doi.org/10.5194/adgeo-12-1-2007>

- Jansà, A., Ramis, C., 2021. The Balearic rissaga: from pioneering research to present-day knowledge. *Nat. Hazards* 106, 1269-1297. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04221-3>
- Johns, R.H., Hirt, W.D., 1987. Derechos: Widespread convectively induced windstorms. *Weather Forecast.* 2, 32-49. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2)
- Kazeminezhad, M.H., Vilibić, I., Denamiel, C., Ghafarian, P., Negah, S., 2021. Weather radar and ancillary observations of the convective system causing the northern Persian Gulf meteotsunami on 19 March 2017. *Nat. Hazards* 106, 1747–1769. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04208-0>
- Kim, J., Omira, R., 2021. The 6–7 July 2010 meteotsunami along the coast of Portugal: insights from data analysis and numerical modelling. *Nat. Hazards* 106, 1397–1419. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04335-8>
- Koch, S. E., Zhang, F., Kaplan, M. L., Lin, Y. -L., Weglarz, R., Trexler, C. M., 2001. Numerical simulations of a gravity wave event over CCOPE. Part III: The role of a mountain-plains solenoid in the generation of the second wave episode. *Mon. Weather Rev.* 129, 909 – 933. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0909:NSOAGW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0909:NSOAGW>2.0.CO;2)
- Lee, S., 1999. Why are the climatological zonal winds easterly in the equatorial upper troposphere?. *J. Atmos. Sci.* 56, 1353-1363. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1353:WATCZW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1353:WATCZW>2.0.CO;2)
- Leuenberger, M., Kanevski, M., 2015. Extreme Learning Machines for spatial environmental data. *Comput. Geosci.* 85, Part B, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.020>
- Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., Licata, L., 2013. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J. Exp. Soc. Psychol.* 49, 764-766. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>
- Ličer, M., Mourre, B., Troupin, C., Krietemeyer, A., Jansá, A., Tintoré, J., 2017. Numerical study of Balearic meteotsunami generation and propagation under synthetic gravity wave forcing. *Ocean Model.* 111, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.02.001>
- Lin, L.-C., Wu, C.H., 2021. Unexpected meteotsunamis prior to Typhoon Wipha and Typhoon Neoguri. *Nat. Hazards* 106, 1673–1686. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04313-0>

- Linares, Á., Wu, C.H., Bechle, A.J., Anderson, E.J., Kristovich, D.A.R., 2019. Unexpected rip currents induced by a meteotsunami. *Sci. Rep.* 9, 2105. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38716-2>
- Lindzen, R.S., Tung, K.-K., 1976. Banded convective activity and ducted gravity waves. *Mon. Weather Rev.* 104, 1602–1617. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104<1602:BCAADG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104<1602:BCAADG>2.0.CO;2)
- Liu, P.L.-F., Monserrat, S., Marcos, M., 2002. Analytical simulation of edge waves observed around the Balearic Islands. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1847. <https://doi.org/10.1029/2002GL015555>
- Lowe, J., Gregory, J., Flather, R., 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Clim. Dyn.* 18, 179–88. <https://doi.org/10.1007/s003820100163>
- Marcos, M., Monserrat, S., Medina, R., Orfila, A., Olabarrieta, M., 2009. External forcing of meteorological tsunamis at the coast of the Balearic Islands. *Phys. Chem. Earth* 34, 938-947. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.10.001>
- Medvedev, I.P., Vilibić, I., Rabinovich, A.B., 2020. Tidal resonance in the Adriatic Sea: Observational evidence. *J. Geophys. Res. Oceans* 125(8), e2020JC016168. <https://doi.org/10.1029/2020jc016168>
- Menéndez, M., Woodworth, P.L., 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *J. Geophys. Res. Oceans* 115, C10011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005997>
- Merrifield, M.A., Becker, J.M., Ford, M., Yao, Y., 2014. Observations and estimates of wave-driven water level extremes at the Marshall Islands. *Geophys. Res. Lett.* 41, 7245-7253. <https://doi.org/10.1002/2014GL061005>
- Miles, J., Munk, W., 1961. Harbor paradox. *J. Waterw. Harbor Div. ASCE*, 87, 111–132.
- Monserrat, S., Thorpe, A.J., 1996. Use of ducting theory in an observed case of gravity waves. *J. Atmos. Sci.* 53, 1724–1736. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<1724:UODTIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<1724:UODTIA>2.0.CO;2)

- Montserrat, S., Rabinovich, A.B., Casas, B., 1998. On the reconstruction of the transfer function for atmospherically generated seiches. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2197–2200. <https://doi.org/10.1029/98GL01506>
- Montserrat, S., Vilibić, I., Rabinovich, A.B., 2006. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Nat. Hazard Earth Sys.* 6(6), 1035–1051. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
- Muis, S., Apecechea, M.I., Dullaart, J., de Lima Rego, J., Skovgaard Madsen, K., Su, J., Yan, K., Verlaan, M., 2020. A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Front. Mar. Sci.* 7, 263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>
- Neale, J., Harmon, N., Srokosz, M., 2015. Source regions and reflection of infragravity waves offshore of the U.S.s Pacific Northwest. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 6474-6491. <https://doi.org/10.1002/2015JC010891>
- Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Hall, J.W., 2007. Assessing impacts and responses to global-mean sea-level rise. In: Schlesinger, M. (ed.), *Human-Induced Climate Change: An Interdisciplinary Assessment*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, pp. 119–134.
- Nomitsu, T., 1935. A theory of tsunamis and seiches produced by wind and barometric gradient. *Mem. Coll. Sci. Imp. Univ. Kyoto, Series A*, 18(4), 201–214.
- Odamaki, M., 1989. Co-oscillating and independent tides of the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 45, 217-232. <https://doi.org/10.1007/BF02123465>
- Olabarrieta, M., Valle-Levinson, A., Martinez, C.J., Pattiaratchi, C., Shi L, 2017. Meteotsunamis in the northeastern Gulf of Mexico and their possible link to El Niño Southern Oscillation. *Nat. Hazards* 88, 1325-1346. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2922-3>
- Orlić, M., 1980. About a possible occurrence of the Proudman resonance in the Adriatic. *Thalass. Jugosl.* 16, 79-88.
- Orlić, M., 2015. The first attempt at cataloguing tsunami-like waves of meteorological origin in Croatian coastal waters. *Acta Adriat.* 56(1), 83-96. <https://doi.org/10.32582/aa.56.1.424>
- Orlić, M., Belušić, D., Janeković, I., Pasarić, M., 2010. Fresh evidence relating the great Adriatic surge of 21 June 1978 to mesoscale atmospheric forcing. *J. Geophys. Res. Oceans* 115, C06011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005777>



- Ozsoy, O., Haigh, I.D., Wadey, M.P., Nicholls, R.J., Wells, N.C., 2016. High-frequency sea level variations and implications for coastal flooding: A case study of the Solent, UK. *Cont. Shelf Res.* 122, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.03.021>
- Pasquet, S., Vilibić, I., Šepić, J., 2013. A survey of strong high-frequency sea level oscillations along the U.S. East Coast between 2006 and 2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 473–482. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-473-2013>
- Pattiaratchi, C., Wijeratne, E.M.S., 2014. Observations of meteorological tsunamis along the south-west Australian coast. *Nat. Hazards* 74(1), 281–303. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1263-8>
- Pattiaratchi, C.B., Wijeratne, E.M.S., 2015. Are meteotsunamis an underrated hazard?. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 373, 20140377. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0377>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput. Geosci.* 28(8), 929–937. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(02)00013-4)
- Pellikka, H., Rauhala, J., Kahma, K.K., Stipa, T., Boman, H., Kangas, A., 2014. Recent observations of meteotsunamis on the Finnish coast. *Nat. Hazards* 74(1), 197–215. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1150-3>
- Pellikka, H., Laurila, T.K., Boman, H., Karjalainen, A., Björkqvist, J.-V., Kahma, K.K., 2020. Meteotsunami occurrence in the Gulf of Finland over the past century. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 2535–2546. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2535-2020>
- Platzman, G.W., 1965. The prediction of surges in the southern basin of Lake Michigan, Part I. The dynamical basis for prediction. *Mon. Weather Rev.* 93 (5), 275–281. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1965\)093<0275:TPOSIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0275:TPOSIT>2.3.CO;2)
- Powers, J.G., Reed, R.J., 1993. Numerical simulation of the large amplitude mesoscale gravity-wave event of 15 December 1987 in the central United States. *Mon. Weather Rev.* 121, 2285–2308. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2285:NSOTLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2285:NSOTLA>2.0.CO;2)
- Proudman, J., 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophys. Suppl. Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2, 197–209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1929.tb05408.x>

- Rabinovich, A.B., 2009. Seiches and harbour oscillations. In Y. C. Kim (Ed.), Handbook of coastal and ocean engineering (pp. 193–236). Singapore: World Scientific. [https://doi.org/10.1142/9789812819307\\_0009](https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009)
- Rabinovich, A.B., 2020. Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event. *Pure Appl. Geophys.* 177, 1193-1230. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02349-3>
- Ramis, C., Jansà, A., 1983. Condiciones meteorológicas simultáneas a la aparición de oscilaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria en el Mediterráneo occidental. *Revista e Geofísica* 39, 35–42.
- Renault, L., Vizoso, G., Jansà, A., Wilkin, J., Tintoré, J., 2011. Toward the predictability of meteotsunamis in the Balearic Sea using regional nested atmosphere and ocean models. *Geophys. Res. Lett.* 38, L10601. <https://doi.org/10.1029/2011GL047361>
- Rietbroek, R., Brunnabend, S.-E., Kusche, J., Schröter, J., Dahle, C., 2016. Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113(6), 1504-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519132113>
- Šepić, J., Vilibić, I., Belušić, D., 2009a. Source of the 2007 Ist meteotsunami (Adriatic Sea). *J. Geophys. Res. Oceans* 114, C03016. <https://doi.org/10.1029/2008JC005092>
- Šepić, J., Vilibić, I., Monserrat, S., 2009b. Teleconnections between the Adriatic and the Balearic meteotsunamis. *Phys. Chem. Earth* 34, 928-937. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.08.007>
- Šepić, J., Vilibić, I., 2011. The development and implementation of a real-time meteotsunami warning network for the Adriatic Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 83-91. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-83-2011>
- Šepić, J., Rabinovich, A.B., 2014. Meteotsunami in the Great Lakes and on the Atlantic coast of the United States generated by the “derecho” of June 29–30, 2012. *Nat. Hazards* 74, 75-107. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1310-5>
- Šepić, J., Vilibić, I., Rabinovich, A.B., Monserrat, S., 2015a. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Sci. Rep.* 5(1), 11682. <https://doi.org/10.1038/srep11682>

- Šepić, J., Vilibić, I., Lafon, A., Macheboeuf, L., Ivanović, Z., 2015b. High-frequency sea level oscillations in the Mediterranean and their connection to synoptic patterns. *Prog. Oceanogr.* 137, 284-298. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.005>
- Šepić, J., Vilibić, I., Monserrat, S., 2016a. Quantifying the probability of meteotsunami occurrence from synoptic atmospheric patterns. *Geophys. Res. Lett.* 43, 10377-10384. <https://doi.org/10.1002/2016GL070754>
- Šepić, J., Međugorac, I., Janeković, I., Dunić, N., Vilibić, I., 2016b. Multi-meteotsunami event in the Adriatic Sea generated by atmospheric disturbances of 25–26 June 2014. *Pure Appl. Geophys.* 173, 4117-4138. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1249-4>
- Šepić, J., Vilibić, I., Rabinovich, A.B., Tinti, S., 2018a. Meteotsunami ("Marrobbio") of 25–26 June 2014 on the southwestern coast of Sicily, Italy. *Pure Appl. Geophys.* 175, 1573–1593. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1827-8>
- Šepić, J., Rabinovich, A.B., Sytov, V.N., 2018b. Odessa tsunami of 27 June 2014: Observations and numerical modelling. *Pure Appl. Geophys.* 175, 1545–1572. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1729-1>
- Shao, D., Xing, Y., Zheng, Z.R., Jiang, G., 2020. Investigation of harbor oscillations originated from the vessel-induced bores using methods of autoregressive model and Mahalanobis distance. *Ocean Eng.* 207, 107385. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107385>
- Shi, L.M., Olabarrieta, M., Nolan, D.S., Warner, J.C., 2020. Tropical cyclone rainbands can trigger meteotsunamis. *Nat. Comm.* 11, 678. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14423-9>
- Sibley, A.M., Cox, D., Tappin, D.R., 2021. Convective rear-flank downdraft as driver for meteotsunami along English Channel and North Sea coasts 28–29 May 2017. *Nat. Hazards* 106, 1445–1465. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04328-7>
- Stephens, S.A., Paulik, R., Reeve, G., Wadhwa, S., Popovich, B., Shand, T., Haughey, R., 2021. Future changes in built environment risk to coastal flooding, permanent inundation and coastal erosion hazards. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 1011. <https://doi.org/10.3390/jmse9091011>
- Tanaka, K., 2010. Atmospheric pressure-wave bands around a cold front resulted in a meteotsunami in the East China Sea in February 2009. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.* 10(12), 2599–2610. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2599-2010>

Thomson, R.E., Emery, W.J., 2014. Data Analysis Methods in Physical Oceanography, Third and revised edition, Elsevier Science, Amsterdam, London, New York 2014

Thotagamuwage, D.T., Pattiaratchi, C.B., 2014. Influence of offshore topography on infragravity period oscillations in Two Rocks Marina, Western Australia. Coastal Eng. 91, 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.05.011>

Tsimplis, M.N., Proctor, R., Flather, R.A., 1995. A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea. J. Geophys. Res. 100, 16223-16239. <https://doi.org/10.1029/95JC01671>

Tsimplis, M.N., Marcos, M., Perez, B., Challenor, P., Garcia-Fernandez, M.J., Raicich, F., 2009. On the effect of the sampling frequency of sea level measurements on return period estimate of extremes-Southern European examples. Cont. Shelf Res. 29, 2214-2221. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.08.015>

Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., 2009. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. Theor. Appl. Clim. 96, 117–131. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0083-8>

UNESCO/IOC, 2020. Quality Control of in situ Sea Level Observations: A Review and Progress towards Automated Quality Control. Vol. 1. Paris, France, UNESCO, 70 pp. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-854>

Vaccaro, F., 2014. Marrobbio a Mazara del Vallo del 25 giugno 2014 IV video. <https://www.youtube.com/watch?v=7jSY1yyIPII>

Vafeidis, A.T., Nicholls, R.J., Mcfadden, L., Tol, R.S.J., Hinkel, J., Spencer, T., Grashoff, P.S., Boot, G., Klein, R.J.T., 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. J. Coastal. Res. 24(4), 917-924. <https://doi.org/10.2112/06-0725.1>

Vich, M.-M., Romero, R., 2021. Forecasting meteotsunamis with neural networks: the case of Ciutadella harbour (Balearic Islands). Nat. Hazards 106, 1299-1314. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04041-5>

Vilibić, I., Domijan, N., Orlić, M., Leder, N., Pasarić, M., 2004. Resonant coupling of a traveling air pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters. J. Geophys. Res. 109(C10). <https://doi.org/10.1029/2004jc002279>

Vilibić, I., 2008a. Numerical simulations of the Proudman resonance. Cont. Shelf Res. 28, 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.11.005>

Vilibić, I., Monserrat, S., Rabinovich, A.B., Mihanović, H., 2008b. Numerical modelling of the destructive meteotsunami of 15 June, 2006 on the coast of the Balearic Islands. *Pure Appl. Geophys.* 165, 2169-2195. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0426-5>

Vilibić, I., Šepić, J., 2009. Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: Overview. *Phys. Chem. Earth* 34, 904–917. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.08.004>

Vilibić, I., Monserrat, S., Rabinovich, A.B., 2014. Meteorological tsunamis on the US East Coast and in other regions of the World Ocean. *Nat. Hazards* 74, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1350-x>

Vilibić, I., Šepić, J., Rabinovich, A.B., Monserrat, S., 2016. Modern approaches in meteotsunami research and early warning. *Front. Mar. Sci.* 3, 57. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00057>

Vilibić, I., Šepić, J., 2017. Global mapping of nonseismic sea level oscillations at tsunami timescales. *Sci. Rep.* 7, 40818. <https://doi.org/10.1038/srep40818>

Vilibić I., Šepić J., Dunić N., Sevault F., Monserrat S., Jordà G., 2018. Proxy-based assessment of strength and frequency of meteotsunamis in future climate. *Geophys. Res. Lett.* 45, 10501–10508. <https://doi.org/10.1029/2018GL079566>

Vilibić I., Denamiel C., Zemunik P., Monserrat S., 2021. The Mediterranean and Black Sea meteotsunamis: an overview. *Nat. Hazards* 106, 1223-1267. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04306-z>

Vučetić, T., Vilibić, I., Tinti, S., Maramai, A., 2009. The Great Adriatic flood of 21 June 1978 revisited: an overview of the reports. *Phys. Chem. Earth* 34, 894–903. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.08.005>

Wang, X., Li, K., Yu, Z., Wu, J., 1987. Statistical characteristics of seiches in Longkou Harbour. *J. Phys. Oceanogr.* 17, 1963-1966. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017<1063:SCOSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017<1063:SCOSIL>2.0.CO;2)

Wilkinson, M.D., Dumontier, M., Jan Aalbersberg, I., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.W., da Silva Santos, L.B., Bourne, P.E., Bouwman, J., Brookes, A.J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C.T., Finkers, R., Gonzalez-Beltran, A., Gray, A.J.G., Groth, P., Goble, C., Grethe, J.S., Heringa, J., 't Hoen, P.A.C., Hooft, R., Kuhn, T., Kok, R., Kok, J., Lusher, S.J., Martone, M.E., Mons, A., Packer, A.L., Persson,

- B., Rocca-Serra, P., Roos, M., van Schaik, R., Sansone, S.A., Schultes, E., Sengstag, T., Slater, T., Strawn, G., Swertz, M.A., Thompson, M., van der Lei, J., van Mulligen, E., Velterop, J., Waagmeester, A., Wittenburg, P., Wolstencroft, K., Zhao, J., Mons, B., 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci. Data* 3, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Williams, J., Matthews, A., Jevrejeva, S., 2019a. Development of an automatic tide gauge processing system. National Oceanography Centre Research and Consultancy Report, 64, Southampton, National Oceanography Centre, 26 pp.
- Williams, D.A., Horsburgh, K.J., Schultz, D.M., Hughes, C.W., 2019b. Examination of generation mechanisms for an English Channel meteotsunami: combining observations and modeling. *J. Phys. Oceanogr.* 49, 103-120. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0161.1>
- Williams, D.A., Schultz, D.M., Horsburgh, K.J., Hughes, C.W., 2021a. An 8-yr meteotsunami climatology across Northwest Europe: 2010–17. *J. Phys. Oceanogr.* 1145-1161. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0175.1>
- Williams, D.A., Horsburgh, K.J., Schultz, D.M., Hughes, C.W., 2021b. Proudman resonance with tides, bathymetry and variable atmospheric forcings. *Nat. Hazards* 106, 1169-1194. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03896-y>
- Woodworth, P.L., Aman, A. and Aarup, T., 2007. Sea level monitoring in Africa. *African J. Mar. Sci.* 29, 321-330. <https://doi.org/10.2989/AJMS.2007.29.3.2.332>
- Woodworth, P.L., 2017. Seiches in the Eastern Caribbean. *Pure Appl. Geophys.* 174, 4283-4312. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1715-7>
- Yankovsky, A.E., 2009. Large-scale edge waves generated by hurricane landfall. *J. Geophys. Res. Oceans* 114, C04014. <https://doi.org/10.1029/2008JC005113>
- Yin, J., Zhao, M., 2021. Influence of the Atlantic meridional overturning circulation on the U.S. extreme cold weather. *Commun. Earth Environ.* 2, 218. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00290-9>
- Yu, S., Ma, J., 2021. Deep learning for geophysics: Current and future trends. *Rev. Geophys.* 59(3). <https://doi.org/10.1029/2021RG000742>
- Zemunik, P., Vilibić, I., Šepić, J., Pellikka, H., Čatipović, L., 2021a. MISELA: Minute Sea-Level Analysis, Marine Data Archive. <https://doi.org/10.14284/456>

- Zemunik, P., Vilibić, I., Šepić, J., Pellikka, H., Čatipović, L., 2021b. MISELA: 1-minute sea-level analysis global dataset. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 4121–4132. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4121-2021>
- Zemunik, P., Bonanno, A., Mazzola, S., Giacalone, G., Fontana, I., Genovese, S., Basilone, G., Candela, J., Šepić, J., Vilibić, I., Aronica, S., 2021c. Observing meteotsunamis (“Marrobbio”) on the southwestern coast of Sicily. *Nat. Hazards*, 106, 1337–1363. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04303-2>
- Zemunik, P., Denamiel, C., Šepić, J., Vilibić, I., 2022a. High-frequency sea-level analysis: Global distributions. *Glob. Planet. Change* 210, 103775. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103775>
- Zemunik, P., Denamiel, C., Williams, J., Vilibić, I., 2022b. High-frequency sea-level extremes: global correlations to synoptic atmospheric patterns. *Weather. Clim. Extremes* 38, 100516. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100516>
- Zhang, F., Koch, S.E., Kaplan, M.L., 2003. Numerical simulations of a large-amplitude mesoscale gravity event. *Meteorol. Atmos. Phys.* 84, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s00703-002-0594-2>
- Zhou, L., Lin, S.-J., Chen, J.-H., Harris, L.M., Chen, X., Rees, S.L., 2019. Toward convective-scale prediction within the next generation global prediction system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100(7), 1225-1243. <https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0246.1>

## 10. ŽIVOTOPIS

Petra Zemunik je diplomirala u ožujku 2018. godine na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer „Financijska i poslovna matematika“. Nedugo nakon toga zaposlila se u Institutu za oceanografiju i ribarstvo u Splitu na projektu Hrvatske zaklade za znanost „Jadranske dekadske i međugodišnje oscilacije: opažanja, modeliranje i posljedice“ pod vodstvom dr. sc. Ivice Vilibića, te upisala Interdisciplinarni doktorski studij Oceanologija na Sveučilištu u Zagrebu. Uz to je tri akademske godine za redom držala nastavu iz kolegija Matematika studentima preddiplomskog studija Sveučilišnog odjela za studije mora Sveučilišta u Splitu.

Njeno dosadašnje područje znanstvenog istraživanja uključuje analizu atmosferski uzrokovanih visokofrekventnih oscilacija razine mora i njihovih ekstremnih manifestacija – meteoroloških tsunamija. Uz ova istraživanja, Petra Zemunik se na početku svoje karijere bavila istraživanjem termohalinih svojstava u sjevernom Jadranskom moru te njihovim promjenama tijekom 40-godišnjeg razdoblja.

U dosadašnjoj znanstvenoj karijeri Petra Zemunik je objavila devet znanstvenih radova, od kojih osam indeksiranih u CC i jedan u zborniku radova. Od osam znanstvenih radova, na četiri je prvi autor, od kojih su tri u Q1 rangiranim svjetskim časopisima s visokim faktorima utjecaja. Svoja istraživanja je usmeno predstavila na pet međunarodnih znanstvenih konferencija kao prvi autor sažetka. Završila je tri međunarodne znanstvene škole te je ostvarila stipendiju British Scholarship Trust za stručnu specijalizaciju u Ujedinjenom Kraljevstvu, gdje je provela dva mjeseca (National Oceanography Centre, Liverpool).

Osim projekta na kojem je zaposlena, sudjelovala je u provedbi još dva projekta: ECOSS i CHANGE WE CARE (projekti programa Interreg Hrvatska-Italija).



## 11. POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

### Publicirani radovi:

1. **Zemunik, P.**, Denamiel, C., Williams, J., Vilibić, I., 2022. High-frequency sea-level extremes: Global correlations to synoptic atmospheric patterns. *Weather. Clim. Extremes*, 38, 100516. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100516>
2. **Zemunik, P.**, Denamiel, C., Šepić, J., Vilibić, I., 2022. High-frequency sea-level analysis: Global distributions. *Global Planet. Change*, 210, 103775. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103775>
3. **Zemunik, P.**, Šepić, J., Pellikka, H., Čatipović, L., Vilibić, I., 2021. Minute Sea-Level Analysis (MISELA): a high-frequency sea-level analysis global dataset. *Earth Sys. Sci. Data* 13, 8, 4121-4132. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4121-2021>
4. **Zemunik, P.**, Bonanno, A., Mazzola, S., Giacalone, G., Fontana, I., Genovese, S., Basilone, G., Candela, J., Šepić, J., Vilibić, I., Aronica, S., 2021. Observing meteotsunamis (“Marrobbio”) on the southwestern coast of Sicily. *Nat. Hazards* 106, 2, 1337-1363. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04303-2>
5. Vilibić, I., Denamiel, C., **Zemunik, P.**, Monserrat, S., 2021. The Mediterranean and Black Sea meteotsunamis: an overview. *Nat. Hazards* 106, 2, 1223-1267. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04306-z>
6. Ciglonečki, I., Vilibić, I., Dautović, J., Vojvodić, V., Čosović, B., **Zemunik, P.**, Dunić, N., Mihanović, H., 2020. Dissolved organic carbon and surface active substances in the northern Adriatic Sea: long-term trends, variability and drivers. *Sci. Total Environ.* 730, 139104, 14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139104>
7. Vilibić, I., **Zemunik, P.**, Dunić, N., Mihanović, H., 2020. Local and remote drivers of the observed thermohaline variability on the northern Adriatic shelf (Mediterranean Sea). *Cont. Shelf Res.* 199, 104110. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104110>
8. Vilibić, I., **Zemunik, P.**, Šepić, J., Dunić, N., Marzouk, O., Mihanović, H., Denamiel, C., Precali, R., Djakovac, T., 2019. Present climate trends and variability in thermohaline properties of the northern Adriatic shelf. *Ocean Sci.* 15, 5, 1351-1362. <https://doi.org/10.5194/os-15-1351-2019>

**Radovi u zbornicima:**

1. Stanivuk, T., Laušić, M., **Zemunik, P.**, Milat, P., 2019. Mathematics in the Ship's Rolling Mechanism Observed as a Set of Electronic Filters. Proceedings: VII International Symposium New Horizons 2019 of transport and communications, University of East Sarajevo, 29-30 November, 2019, Dobož, 492-498.