

# Karakteristike mediteranskog tsunamija izazvanog atmosferskim valovima nastalim uslijed erupcije Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkana

---

Sučević, Nela

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:693041>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno-matematički fakultet

**Karakteristike mediteranskog tsunamija  
izazvanog atmosferskim valovima nastalim  
uslijed erupcije Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai  
vulkana**

Završni rad

Nela Sučević

Split, rujan 2023.



## Temeljna dokumentacijska kartica

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

Završni rad

### Karakteristike mediteranskog tsunamija izazvanog atmosferskim valovima nastalim uslijed erupcije Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai vulkana

Nela Sučević

Sveučilišni prijediplomski studij Fizika

#### Sažetak:

Atmosferski val nastao uslijed erupcije Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai vulkana 15.1.2022. više je puta obišao Zemlju, pa je tako imao utjecaj i na mediteransko područje izazivajući meteorološki tsunami (tsunami izazvan promjenama u atmosferskom tlaku). Promatrani su podaci o razini mora i tlaku zraka za odabrane postaje u vremenskom periodu od 13.1.2022. do 19.1.2022., kako bi se odredila njihova povezanost. Pri crtanju originalnih i filtriranih nizova razine mora i tlaka zraka može se jasno primijetiti dolazak prvog i drugog vala za većinu odabranih postaja. Iz filtriranih nizova određena su vremena dolaska valova te pripadajuće amplitude. Promatrana je brzina dugih valova u moru koja je proporcionalna dubini mora, te je uspoređena s brzinom atmosferskog vala. Što su ove brzine bliže jedna drugoj po iznosu, veće je pojačavanje valova u moru (Proudmanova rezonancija). Omjer brzine dugih valova i atmosferskog vala (Freudov broj) slaže se s amplitudama razine mora na način da su amplitude razine mora najveće upravo tamo gdje je ovaj omjer što bliži jedinici.

**Ključne riječi:** Meteorološki tsunami, atmosferski val, razina mora, tlak zraka, Proudmanova rezonancija, Freudov broj

**Rad sadrži:** 18 stranica, 14 slika, 3 tablice, 11 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić

**Ocjenjivači:** izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić  
dr. sc. Petra Zemunik  
Krešimir Ruić, mag. phys.

**Rad prihvaćen:** 26. rujna 2023.

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

<b>Basic documentation card</b>
---------------------------------

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

Bachelor thesis

**Characteristics of the Mediterranean tsunami caused by atmospheric waves generated by Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai eruption**

Nela Sučević

University undergraduate study programme Physics

**Abstract:**

The atmospheric wave generated by the eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha‘apai volcano on January 15, 2022, circumnavigated the Earth multiple times, thereby impacting the Mediterranean region and triggering meteorological tsunamis (tsunamis induced by atmospheric pressure changes). Data on sea level and air pressure were observed for selected stations within the time frame from January 13, 2022, to January 19, 2022, to determine their correlation. When plotting the original and filtered time series of sea level and air pressure, the arrival of the first and second wave is prominently noticeable for most selected stations. From the filtered time series, wave arrival times and their corresponding amplitudes were determined. The speed of long ocean waves is proportional to water depth and is compared with the speed of the atmospheric wave. When these two speeds are close in magnitude, wave amplification occurs in the ocean, a phenomenon known as Proudman resonance. The ratio of the speed of long ocean waves and atmospheric wave (Froude number) corresponds to sea level amplitudes, with the sea level amplitudes being highest when this ratio approaches unity.

**Keywords:** Meteorological tsunami, atmospheric wave, sea level, air pressure, Proudman resonance, Froude number

**Thesis consists of:** 18 pages, 14 figures, 3 tables, 11 references. Original language: Croatian

**Supervisor:** Asoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić

**Reviewers:** Asoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić  
Dr. Petra Zemunik  
Krešimir Ruić, mag. phys.

**Thesis accepted:** September 26, 2023.

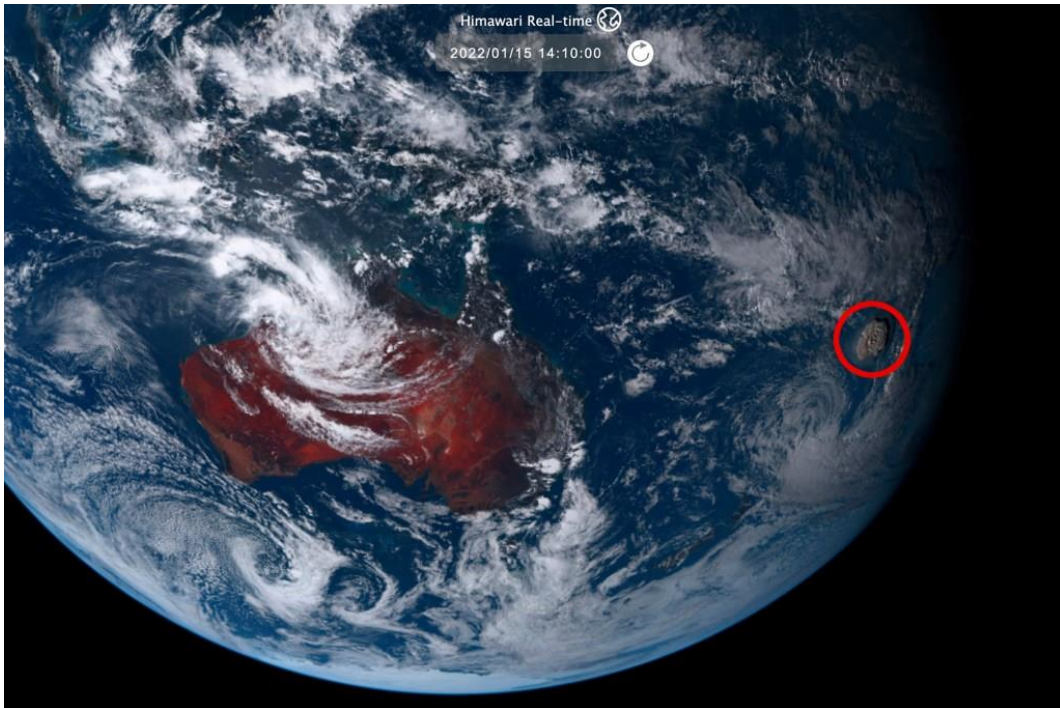
Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Materijali i metode.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Rezultati .....</b>	<b>7</b>
3.1	Mjerenja razine mora.....	7
3.2	Mjerenja tlaka zraka .....	9
3.3	Veza između tlaka zraka i razine mora.....	11
<b>4</b>	<b>Diskusija i zaključci .....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>18</b>

## 1 Uvod

Erupcija Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkana, smještenog usred Tihog oceana (*Slika 1*), koja je započela krajem prosinca 2021. godine, postala je izvanredan događaj u svijetu geoloških i znanstvenih istraživanja. U ovom su radu istraživane posljedice erupcije Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkana (dalje u tekstu „Hunga vulkan“), s posebnim naglaskom na formiranje tsunamija izazvanog atmosferskim valom na području Sredozemnog mora.

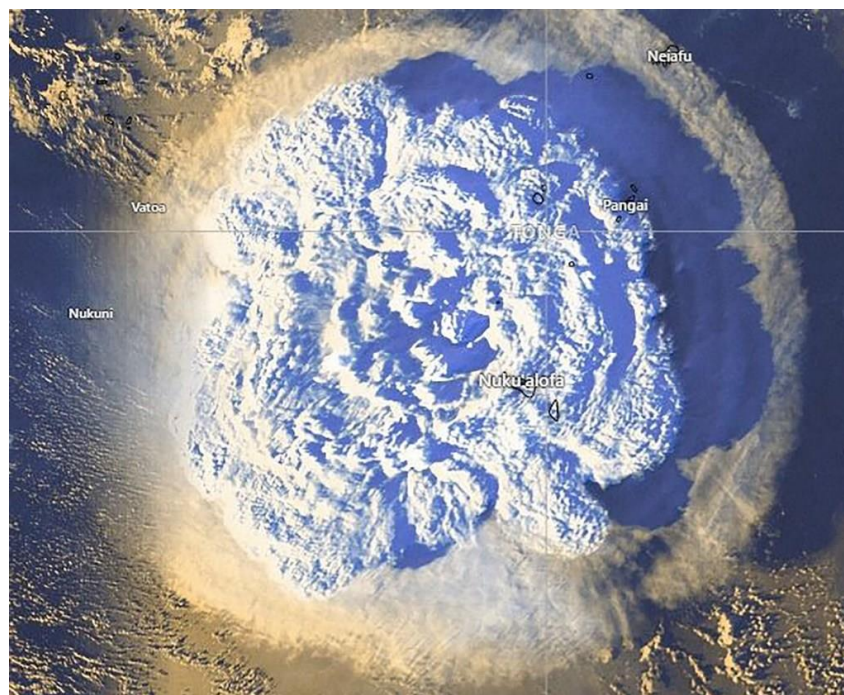


*Slika 1. Geografski položaj Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkana. [1]*

Erupcija Hunga vulkana, koja se dogodila 15. siječnja 2022. godine, izazvala je eksploziju u atmosferi kakva nije zabilježena barem od erupcije vulkana Krakatoa 20. svibnja 1883. godine. Erupcija Hunga vulkana generirala je široki spektar atmosferskih valova koji su zabilježeni diljem svijeta. Najistaknutiji su površinski Lambovi valovi (nastaju u sredstvu koje je dimenzije reda veličine valne duljine), koji su unutar 6 dana četiri puta obišli Zemlju. Erupcija je izazvala infrazvučne valove, zvučne valove, ionosferske perturbacije i niz meteotsunamija (tsunamiji izazvani promjenama u atmosferskom tlaku) [2].

Aktivnost vulkana zabilježena je još u prosincu 2021., dok je najveća erupcija započela oko 4:00 UTC 15.1.2022. iz njegovog podmorskog otvora. U okolinu je izbačena vrlo velika količina vulkanskog materijala i plinova. Ovaj je događaj također proizveo i najviši ikada zabilježeni oblak (*Slika 2*), koji se nalazio na približno 30 km iznad razine mora, ali je njegovo središte privremeno imalo visinu od čak 57 km i prodrlo u mezosferu. Brojni prizemni i

svemirski instrumentalni sustavi raspoređeni po cijelom svijetu zabilježili su širok spektar atmosferskih valova. Obradom signala zabilježenih na regionalnim barometrima te promatranjem vulkanskog oblaka, znanstvenici su došli do zaključka da se ipak radilo o složenoj sekvenciji erupcija koja su se događale između 4:00 i 4:40, a ne o samo jednoj izoliranoj eksploziji. Različiti mehanizmi širenja doveli su do različitih brzina širenja atmosferskih valova. Atmosferski težinski valovi (eng. *Atmospheric gravity wave – AGW*) su valovi koji pokazuju uzgonsko i tlačno gibanje. Lambovi valovi su AGW-ovi koji se šire duž Zemljine površine grupnim brzinama približnim srednjoj brzini zvuka u nižim slojevima atmosfere i povezani su s najvećim atmosferskim eksplozijama nastalim uslijed vulkanskih erupcija i nuklearnih pokusa, te imaju periode reda veličine od nekoliko minuta do više stotina minuta. Broj obilazaka Lambovih valova oko Zemlje za ovu erupciju otprilike je isti kao i za erupciju vulkana Krakatoa iz 1883. godine. Tlačni valovi erupcije Hunga imaju složene spektralne karakteristike koje su vjerojatno povezane i s izvorom i sa širenjem. Također su zabilježeni i iznimni dalekometni infrazvučni valovi frekvencije od 0.01 Hz do 20 Hz. Amplitude infrazvučnih valova koji su slijedili dolazak prvog Lambovog vala imaju red veličine od nekoliko paskala, te je opaženo njihovo smanjivanje nakon svakog obilaska oko Zemlje. Zvučni valovi zabilježeni su na udaljenostima od čak 10000 km od same erupcije, dok ta udaljenost za erupciju vulkana Krakatoa iznosi oko 4800 km. U Sredozemnom je moru hidrofon postavljen na dubinu od oko 50 m u blizini vulkana Stromboli, a udaljen od Hunga vulkana skoro 18000 km, zabilježio signal Lambovog vala. Atmosferski valovi širili su se čak i do ionosfere [3].



Slika 2. Oblak nastao uslijed erupcije, iz ptičje perspektive. [1]



Jedna od najznačajnijih posljedica erupcije Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkana bila je formiranje tsunamija izazvanog atmosferskim valom. Atmosferski val je nastao kada su se oblaci plina i pepela uzdigli visoko u stratosferu, stvarajući snažan vrtlog koji je utjecao na okolni zračni pritisak. Taj vrtlog u stratosferi stvorio je valove koji su se širili preko Tihog oceana [2].

Kako bismo bolje razumjeli fenomen tsunamija i njihove različite izvore, valja se prisjetiti povijesne erupcije Krakatoa vulkana iz 1883. godine. Krakatoa, vulkan smješten u Indoneziji, doživio je jednu od najrazornijih erupcija u povijesti. Eksplozija je bila toliko snažna da je stvorila tsunami (nastao zbog inicijalnog pomaka razine mora) koji je odnio više od 36 000 života i uzrokovao globalne klimatske promjene zbog emisije velike količine sumporovog dioksida u atmosferu [3].

Erupcija Krakatoa i erupcija Hunga Tonga-Hunga Ha'apai ukazuju na raznolikost izvora tsunamija. Dok se erupcije vulkana poput Krakatoe i Hunga Tonga-Hunga Ha'apai često povezuju s ovim prirodnim katastrofama, tsunamiji se također mogu izazvati potresima na dnu oceana, podvodnim klizanjima stijena ili čak udarom asteroida u ocean.

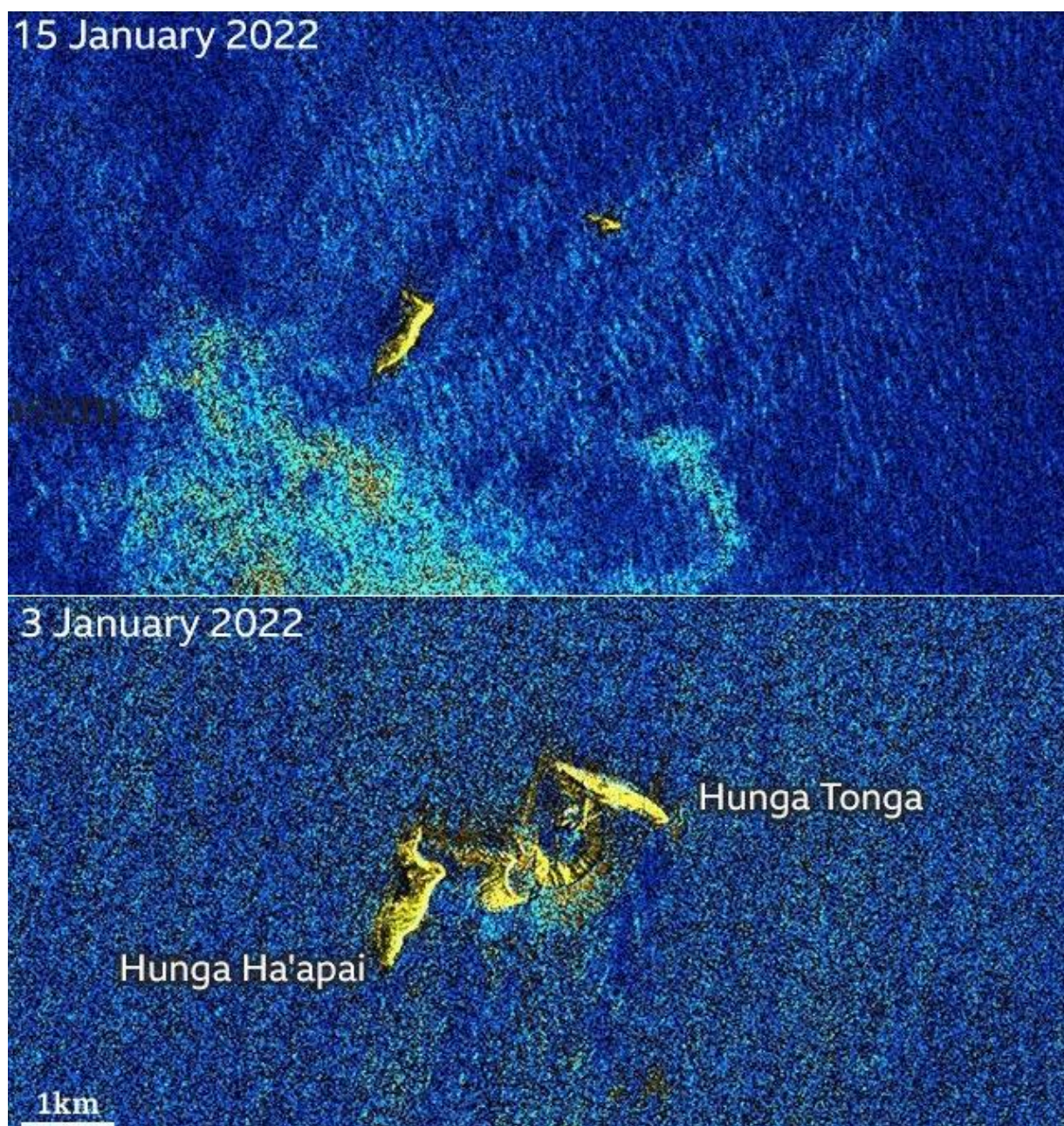
Seizmički tsunamiji su najčešći i najpoznatiji tip tsunamija. Nastaju kao posljedica potresa na dnu oceana. Ti potresi mogu biti posljedica tektonskih pomicanja, subdukcije tektonskih ploča ili drugih geoloških aktivnosti. Kada dođe do pomicanja morskog dna uslijed potresa, velika količina vode se diže prema površini, stvarajući ogromne valove koji se šire po oceanu brzinom koja može dostići stotine kilometara na sat. Tsunamiji izazvani potresima mogu biti izuzetno razorni i nanijeti velike štete obalnim zajednicama [4].

Vulkanski tsunamiji, s druge strane, nastaju kao posljedica vulkanske aktivnosti. Kada vulkan izbije ili eksplodira u podmorju ili blizu obale, to može izazvati naglo pomicanje vode i stvaranje tsunamija. Vulkan može izbaciti velike količine materijala u more, stvoriti podvodno klizište ili uzrokovati stvaranje vodene pare i plinova, što sve zajedno može dovesti do stvaranja tsunamija. Ovi tsunamiji često imaju izrazito lokalni učinak i obično su manje razorni od seizmičkih tsunamija, ali i dalje predstavljaju ozbiljnu prijetnju obalnim područjima [3].

Meteorološki tsunamiji, poznati i kao "meteo-tsunamiji" ili "atmosferski tsunamiji", razlikuju se od seizmičkih i vulkanskih tsunamija po tome što njihov glavni uzrok nije potres na dnu oceana, već atmosferski faktori. Ovi tsunamiji nastaju kada se određeni meteorološki uvjeti i atmosferski događaji kombiniraju na način koji uzrokuje brzo povećanje razine mora i stvaranje tsunamija. Glavni uzroci nastanka i amplifikacije meteoroloških tsunamija uključuju atmosferski tlak, brze vjetrove i rezonanciju u zaljevima. Promjene u atmosferskom tlaku, obično uzrokovane ili jakim olujama ili atmosferskim težinskim valovima, mogu izazvati povećanje razine mora. Jaki vjetrovi tijekom oluja mogu stvoriti površinske struje koje guraju vodu prema obali. Kada se ti vjetrovi naglo smire, voda koja se gurala prema obali može se vratiti i stvoriti tsunamije. U nekim slučajevima, prirodni oblik obale i geografski položaj

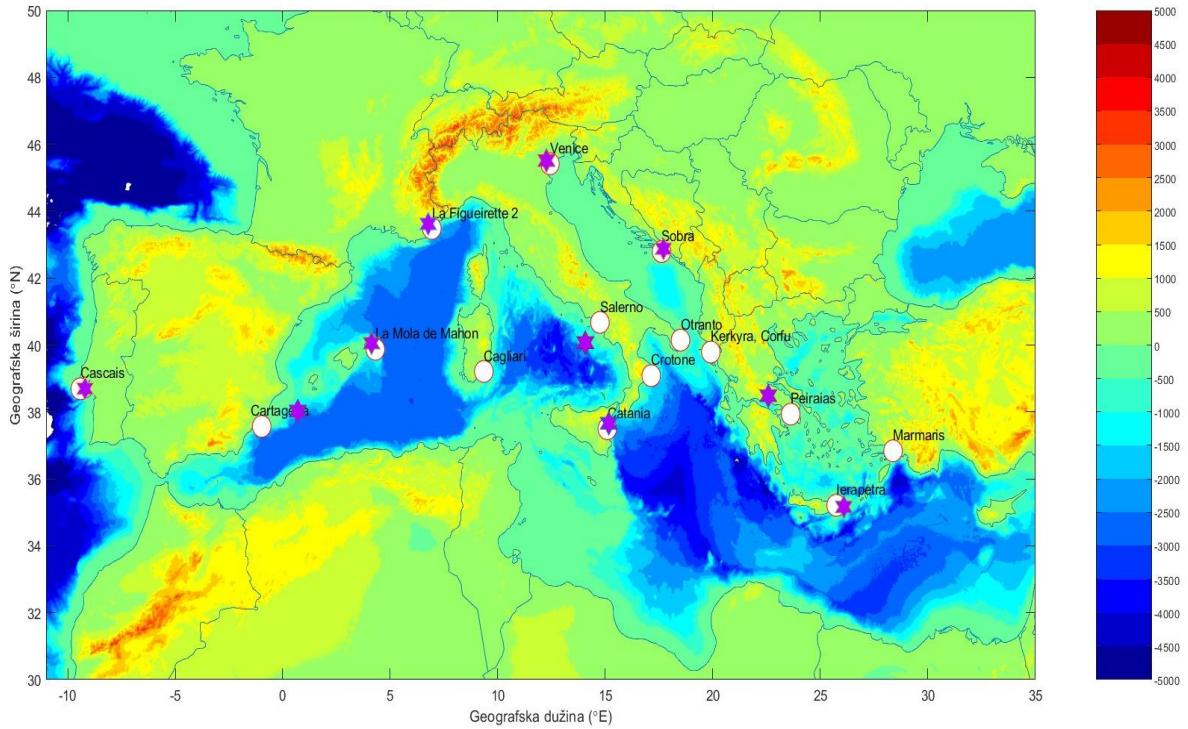
zaljeva ili uvale mogu pojačati učinak meteorološkog tsunamija, stvarajući velike amplitude valova [5].

Uvid u Hunga Tonga-Hunga Ha'apai znanstvenici su prvi put imali u subotu nakon erupcije, kada je satelit Sentinel-1A EU preletio iznad vulkana. Na *Slici 3* se vidi razorenost kratera i nestanak gotovo cijelog kopna što govori o jačini eksplozije [6].



*Slika 3. Hunga Tonga-Hunga Ha'apai nakon i prije eksplozije. [6]*

Kako je atmosferski težinski val nastao uslijed ove erupcije obišao cijelu Zemlju, imao je utjecaj i na mediteransko područje, a postaje na kojima je taj utjecaj promatran u ovom radu prikazane su na *Slici 4*.



*Slika 4. Područje Sredozemnog mora s naznačenim mareografskim (bijeli krug) i meteorološkim (ljubičasta zvijezda) postajama.*

## 2 Materijali i metode

Prvo je bilo potrebno odabrati mareografske postaje na području Mediterana za koje postoje podaci za razinu mora u periodu od 13.1.2022. do 19.1.2022. [7]. Ove su postaje navedene u **Tablici 1**. Nakon toga su odabrane meteorološke postaje koje se nalaze što bliže mareografskim postajama za koje postoje podaci o tlaku zraka za isto vremensko razdoblje [8]. Za neke mareografske postaje nije bilo odgovarajućih meteoroloških postaja, što je također naznačeno u **Tablici 1**. Nakon odabira postaja i preuzimanja odgovarajućih podataka, nizovi za razinu mora i za tlak zraka interpolirani su te grafički prikazani kako bi se vidjelo kada je na koju postaju stigao poremećaj. Zatim sam za filtriranje nizova podataka razine mora i tlaka zraka iskoristila dvosatni Kaiser-Bessel filter [9]. Iz prethodno spomenutih podataka odredila sam vremena dolaska prvog i drugog atmosferskog vala te njihove amplitude. Na isti sam način odredila i vremena dolaska prvog i drugog vala tsunamija kao i pripadne amplitude. Za područje Mediterana izračunala sam brzinu dugih valova u moru kao i omjer brzine dugih valova u moru i brzine širenja atmosferskog vala.

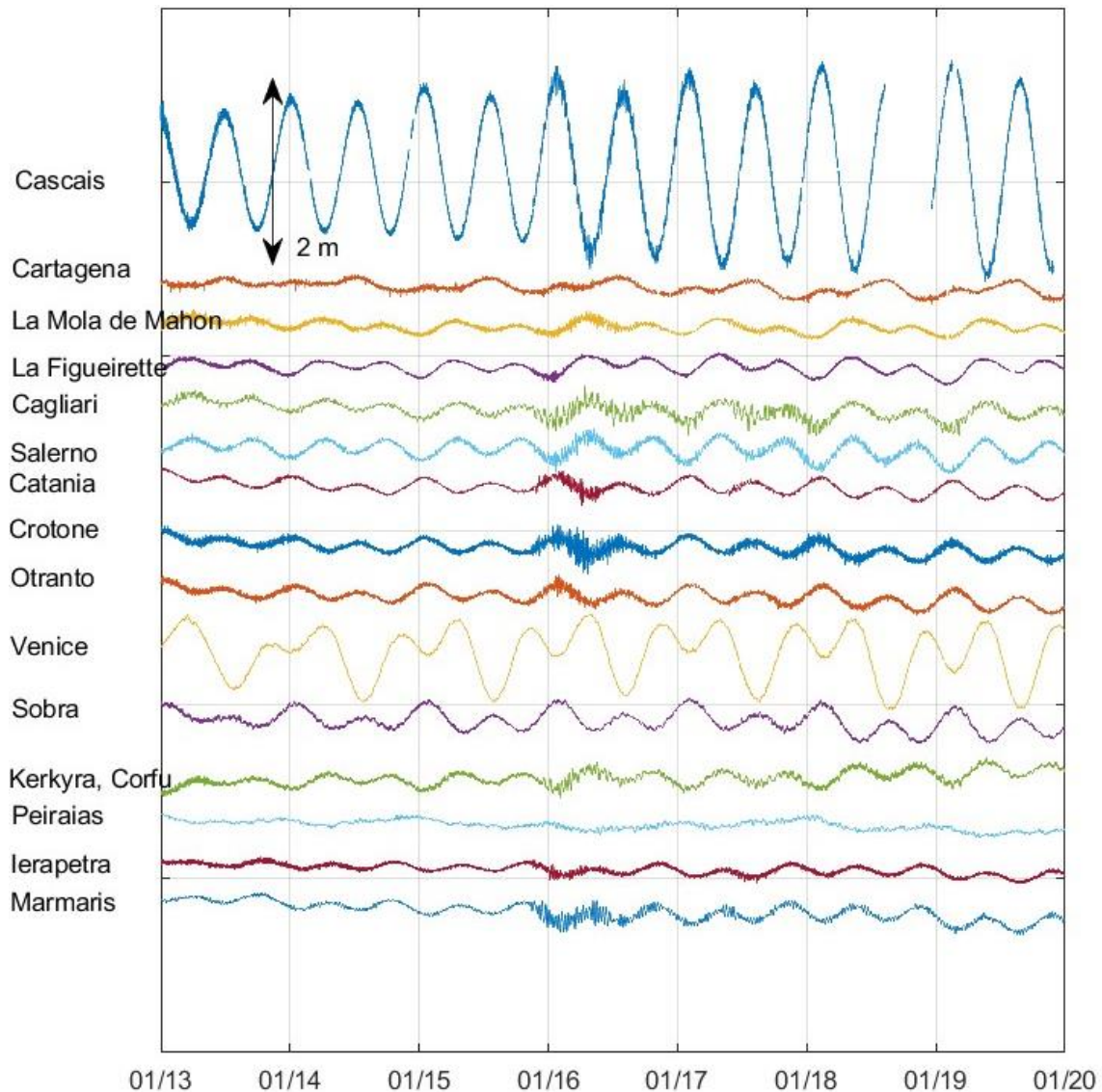
*Tablica 1. Popis mareografskih postaja s kojih su uzeti podaci za razinu mora te njihove koordinate. Popis meteoroloških postaja koje se nalaze u blizini mareografskih postaja s kojih su uzeti podaci za tlak zraka te njihove koordinate.*

Mareografske postaje	Geografska širina	Geografska dužina	Meteorološke postaje	Geografska širina	Geografska dužina
Cascais	38.693	-9.415	Lisboa	38.696	-9.194
Cartagena	37.570	-0.980	Elche	38.027	0.7
La Mola de Mahon	39.872	4.308	Fornells	40.056	4.131
La Figueirette 2	43.484	6.934	Montauroux	43.619	6.764
Cagliari	39.210	9.114	-	-	-
Salerno	40.677	14.751	Cava de'Tirreni	40.07	14.07
Catania	37.498	15.094	Guardia	37.661	15.165
Crotone	39.084	17.137	-	-	-
Otranto	40.146	18.497	-	-	-
Venice	45.418	12.427	Carpenido	45.513	12.263
Sobra	42.793	17.620	Bistrina	42.878	17.707
Kerkyra, Corfu	39.790	19.910	-	-	-
Peiraias	37.935	23.621	Arachova	38.483	22.583
Ierapetra	35.210	25.740	Sitia	35.162	26.096
Marmaris	36.838	28.385	-	-	-

### 3 Rezultati

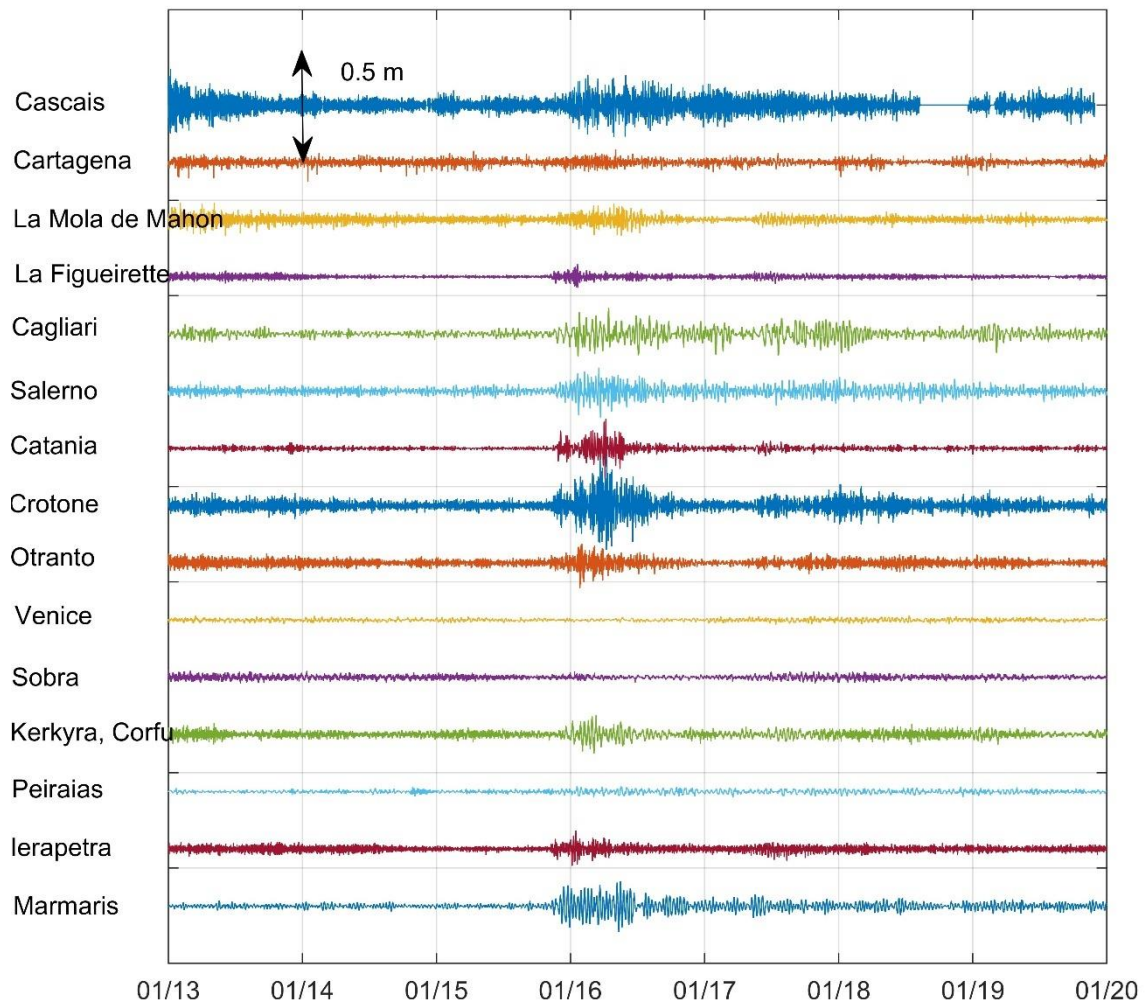
#### 3.1 Mjerenja razine mora

Na *Slici 5* prikazani su originalni nizovi razine mora za sve postaje. Vidljivo je da postaja Cascais, koja se nalazi na obalama Atlantskog oceana, ima jači plimni signal od ostalih postaja – ovo je očekivano jer je amplituda plimnih oscilacija značajno veća u Atlantskom oceanu nego u Sredozemnom moru. U Sredozemnom moru plimne oscilacije su najjače u Tuniškom zaljevu i na sjevernom Jadranu. Potonje je vidljivo iz *Slike 5* jer od prikazanih mediteranskih postaja upravo Venecija pokazuje najviše oscilacije. Postaje na kojima se već s originalnih nizova može primijeti dolazak tsunamija u prelasku s 15.1. na 16.1. su Cagliari, Crotone te Marmaris. Tsunami se prepoznaje kao intenzivne kratko-periodičke oscilacije razine mora. Jadranske postaje Venecija i Sobra te postaja Peiraias ne pokazuju gotovo nikakve dodatne kratko-periodičke oscilacije razine mora u navedenom razdoblju.



Slika 5. Originalni nizovi razine mora za sve postaje.

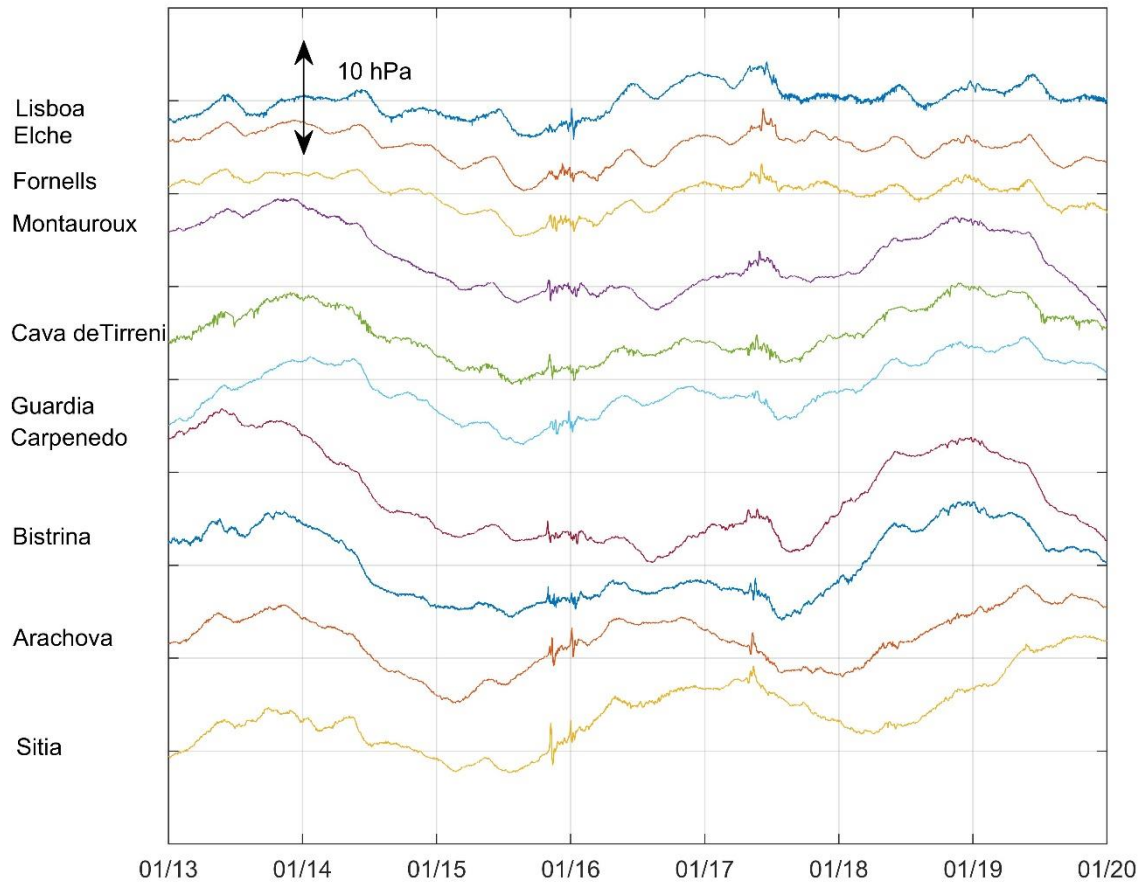
Na *Slici 6* prikazani su filtrirani nizovi razine mora za sve postaje. Jasno se ističe poremećaj u razini mora nastao zbog atmosferskog vala. Poremećaj se dobro primjeti i za postaje na kojima nije bio izrazito vidljiv na prethodnoj slici. Uz Veneciju, Sobru i Peiraias za koje se još uvijek ne ističe značajna promjena u razini mora u noći s 15.1. na 16.1. (iako se određene male oscilacije uočavaju), poremećaj nije primjetan ni za postaju Cartagena.



*Slika 6. Visoko-frekventni ( $T < 2 h$ ) nizovi razine mora za sve postaje.*

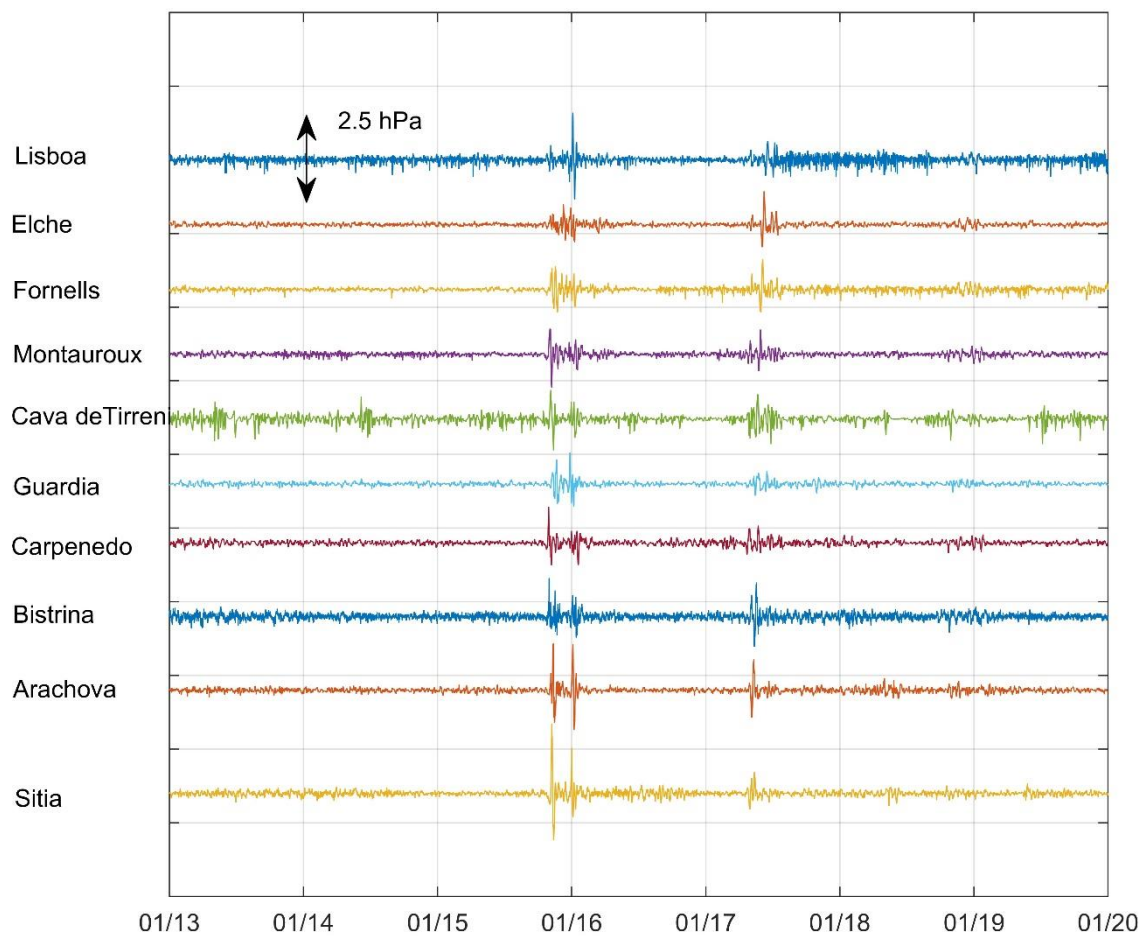
### 3.2 Mjerenja tlaka zraka

Originalni nizovi tlaka zraka za sve postaje prikazani su na *Slici 7*. Za svaku se postaju jasno vidi oscilacija u traku zraka krajem 15.1. i početkom 16.1. Primjetan je također i drugi atmosferski val koji je do ovih postaja došao 17.1., što se na nizovima razine mora ne ističe jasno kao na nizovima tlaka zraka.



*Slika 7. Originalni nizovi tlaka zraka za sve postaje.*

Filtrirani nizovi tlaka zraka prikazani su na *Slici 8*. Za svaku je postaju lako uočljiv poremećaj, kako za prvi, tako i za drugi val.



*Slika 8. Visoko-frekventni ( $T < 2$  h) nizovi tlaka zraka za sve postaje.*



### 3.3 Veza između tlaka zraka i razine mora

U **Tablici 2** dana su vremena dolaska prvog i drugog atmosferskog vala, kao i amplitude oba vala. Na većinu postaja prvi je val došao 15.1.2022. oko 20:00 sati, dok se drugi val zamjećuje dva dana nakon, 17.1.2022., kroz jutro. Amplitude prvog vala veće su nego amplitude drugog vala jer je val putujući oko Zemlje oslabio.

*Tablica 2. Vremena dolaska atmosferskog vala na svaku od postaja. Naznačena su vremena dolaska prvog i drugog vala kao i odgovarajuće amplitude. Znak '-' označava postaje gdje nije bilo podataka za tlak zraka.*

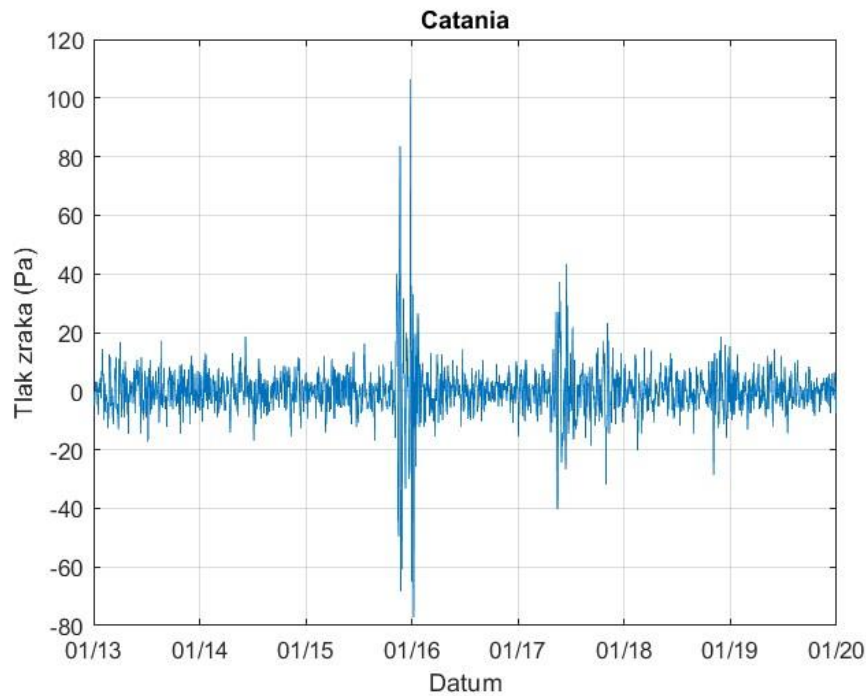
Naziv postaje	Tlak zraka			
	Početak prvog vala	Amplituda [hPa]	Početak drugog vala	Amplituda [hPa]
Cascais	15.1.2022. 23:36:50	1.6	17.1.2022. 10:42:50	0.5
Cartagena	15.1.2022. 20:12:00	0.7	17.1.2022. 08:20:00	1.1
La Mola De Mahon	15.1.2022. 20:17:18	0.8	17.1.2022. 08:15:18	1.0
La Figueirette 2	15.1.2022. 19:53:00	1.1	17.1.2022. 02:33:08	0.8
Cagliari	-	-	-	-
Salerno	15.1.2022. 20:15:28	1.1	17.1.2022. 07:45:28	0.8
Catania	15.1.2022. 20:36:40	1.1	17.1.2022. 08:36:48	0.4
Crotone	-	-	-	-
Otranto	-	-	-	-
Venice	15.1.2022. 19:53:02	1.2	17.1.2022. 04:25:32	0.6
Sobra	15.1.2022. 19:58:00	1.30	17.1.2022. 07:45:00	1.2
Kerkyra, Cofru	-	-	-	-
Peiraias	15.1.2022. 20:16:14	1.6	17.1.2022. 7:48:44	1.1
Ierapetra	15.1.2022. 20:26:44	2.4	17.1.2022. 7:29:14	0.7
Marmaris	-	-	-	-

U **Tablici 3** prikazana su vremena dolaska prvog i drugog vala za razinu mora, kao i pripadne amplitude. Val se na razini mora očitovao nešto kasnije nego onaj u tlaku zraka. Vremena dolaska prvog vala ponovo su 15.1. u večernjim satima, dok se drugi val javio uglavnom 17.1. kroz jutro.

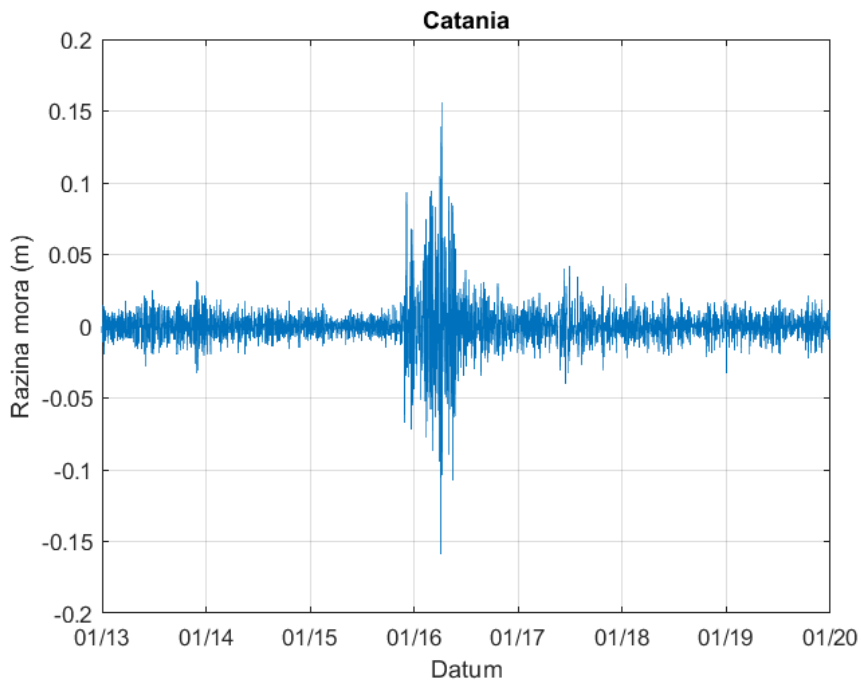
*Tablica 3. Vremena dolaska vala za razinu mora na svakoj od postaja. Naznačen je početak prvog i drugog vala kao i odgovarajuće amplitude. Crveni znak 'x' označava postaje gdje se morski val nije mogao jasno uočiti.*

Naziv postaje	Razina mora			
	Početak prvog vala	Amplituda [m]	Početak drugog vala	Amplituda [m]
Cascais	16.1.2022. 00:01:00	0.24	16.1.2022. 23:41:00	0.16
Cartagena	X	X	X	X
La Mola De Mahon	15.1.2022. 21:56:00	0.08	17.1.2022. 09:12:00	0.04
La Figueirette 2	15.1.2022. 20:56:00	0.07	17.1.2022. 04:57:00	0.04
Cagliari	15.1.2022. 21:39:00	0.14	17.1.2022. 10:49:00	0.11
Salerno	15.1.2022. 22:09:00	0.14	17.1.2022. 10:36:00	0.07
Catania	15.1.2022. 22:14:00	0.16	17.1.2022. 09:42:00	0.04
Crotone	15.1.2022. 21:43:00	0.30	17.1.2022. 10:17:00	0.11
Otranto	15.1.2022. 23:13:00	0.10	17.1.2022. 08:35:00	0.06
Venice	X	X	X	X
Sobra	15.1.2022. 22:38:00	0.03	17.1.2022. 04:50:00	0.03
Kerkyra, Cofru	15.1.2022. 23:09:00	0.10	16.1.2022. 21:44:00	0.05
Peiraias	X	X	X	X
Ierapetra	15.1.2022. 21:04:00	0.10	17.1.2022. 08:20:00	0.06
Marmaris	15.1.2022. 21:21:00	0.14	16.1.2022. 22:13:00	0.06

Kako bi se utvrdila veza između tlaka zraka i razine mora, u nastavku se analiziraju izdvojeni filtrirani niz tlaka zraka i razine mora za postaju Catania, jer za nju postoje podaci i za tlak zraka i za razinu mora, te se na tim nizovima može jasno uočiti dolazak prvog i drugog vala.

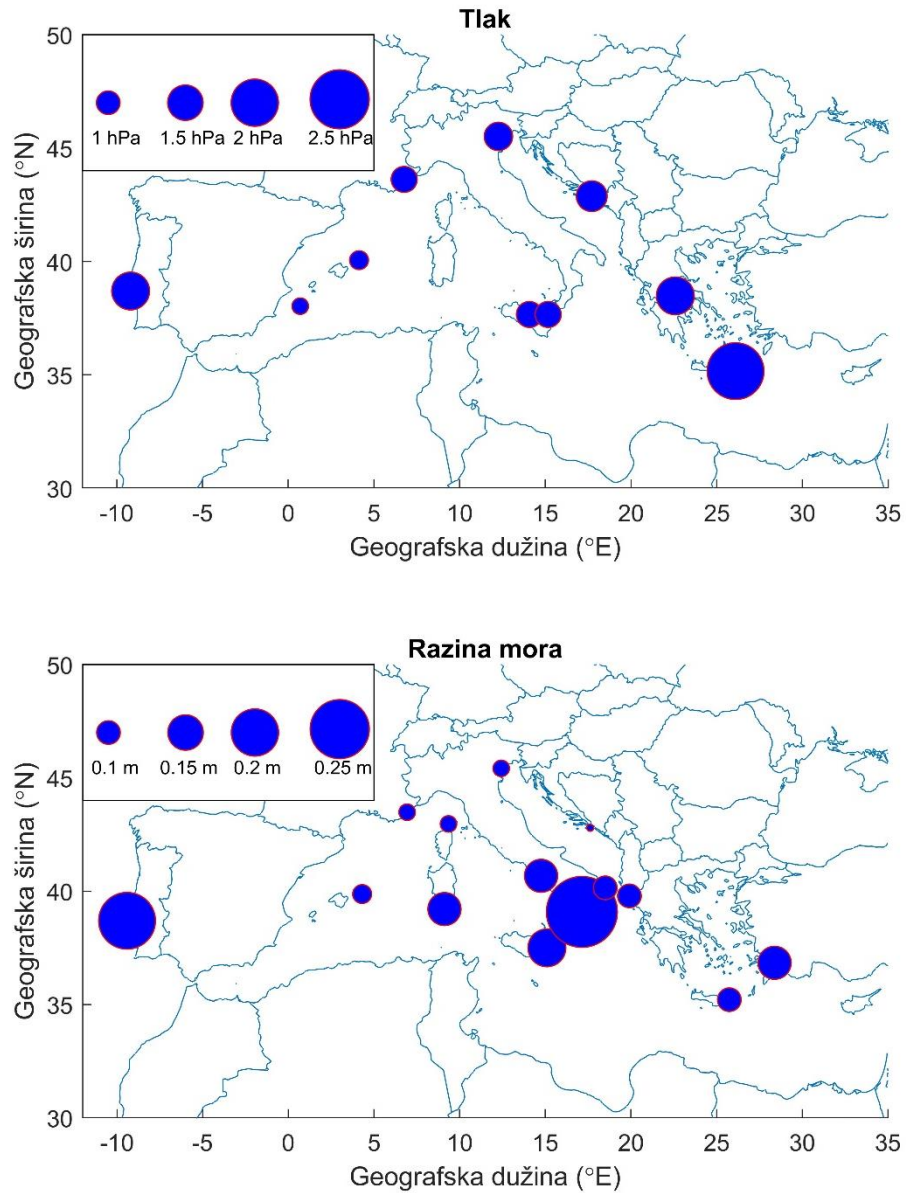


Slika 9. Visoko-frekventni ( $T < 2 h$ ) niz tlaka zraka za postaju Catania.



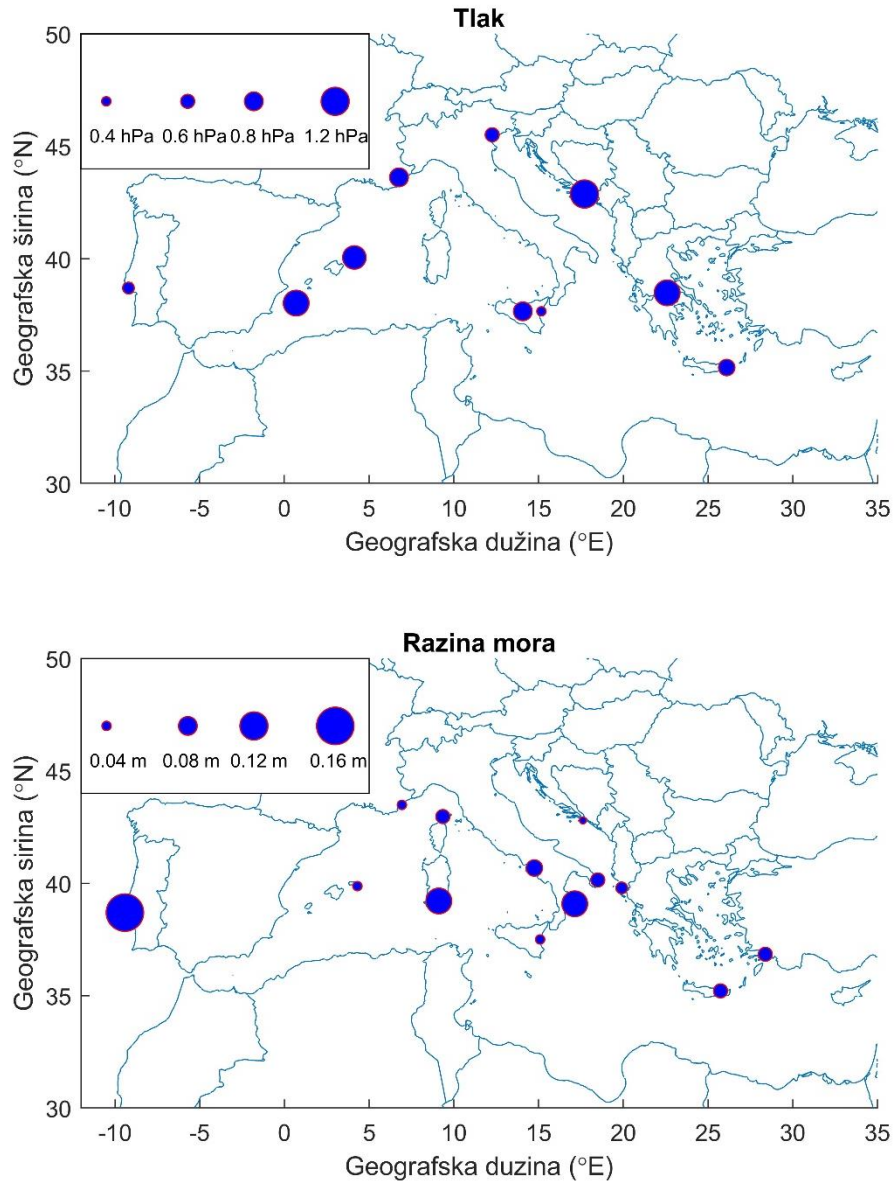
Slika 10. Visoko-frekventni ( $T < 2 h$ ) niz razine mora za postaju Catania.

Na *Slici 11* prikazane su postaje na karti s odgovarajućim amplitudama za tlak zraka i razinu mora, za prvi val. Najveće amplitude za tlak zraka imaju postaje Cascais i Ierapetra, dok za razinu mora najveće amplitude imaju ponovo Cascais i Crotone.



*Slika 11. Amplitude prvog atmosferskog vala i vala u moru na svim postajama.*

Na *Slici 12* ponovo su prikazane amplitude za atmosferski i oceanski val, ali ovog puta za drugi val. Amplitude za atmosferski val sada su najveće na postajama Cartagena, La Mola De Mahon i Sobra, a za razinu mora na postajama Cascais, Catania i Crotone.



Slika 12. Amplitude drugog atmosferskog vala i vala u moru na svim postajama.

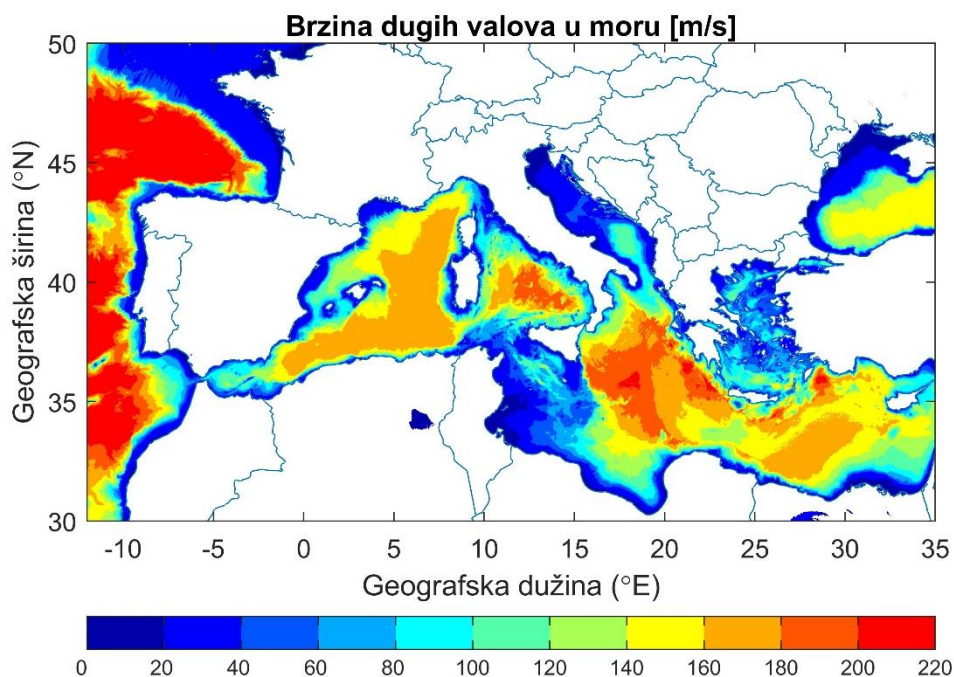
## 4 Diskusija i zaključci

Lokalne promjene atmosferskog tlaka iznad otvorenog mora generiraju valove na površini. Amplituda ovih valova općenito je mala u usporedbi s valovima nastalim zbog vjetera i plimnim valovima. Međutim, u nekim slučajevima mogu biti značajno pojačani. To se događa kada se poremećaj tlaka kreće brzinom sličnom brzini širenja površinskih valova na moru. Ovo pojačanje poznato je kao Proudmanova rezonancija, prema znanstveniku koji je prvi dokazao ovu pojavu [10]. Brzina dugih valova u moru dana je formulom:

$$c = \sqrt{h \cdot g}, \quad (1)$$

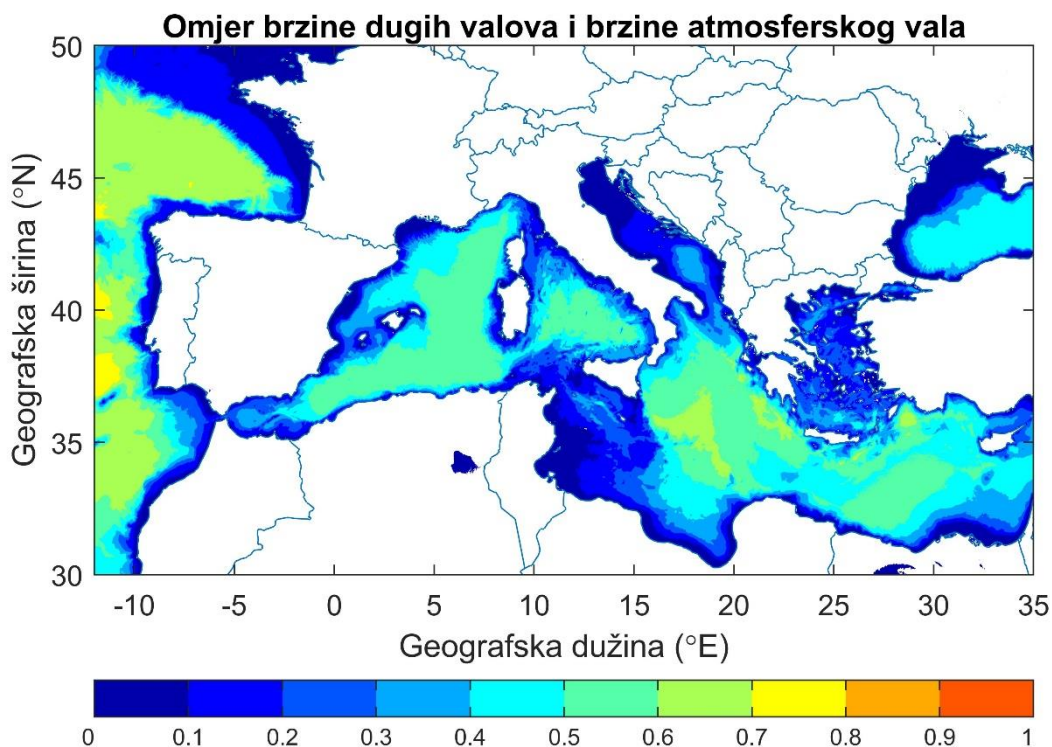
gdje  $h$  označava dubinu mora, a  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  gravitacijsko ubrzanje. Atmosferski valovi nastali zbog erupcije širili su se brzinom od 317 m/s [11].

Na slikama na kojima su prikazane amplitude tlaka zraka i razine mora za prvi (*Slika 11*) i za drugi val (*Slika 12*) može se primijetiti da najveće amplitude atmosferskih valova ne odgovaraju nužno najvećim amplitudama valova u moru. Ovo se može objasniti pomoću jednadžbe (1), koja govori da brzina dugih valova u moru ovisi o dubini mora. Ova je brzina prikazana na *Slici 13*. Brzina je dugih valova na nekom području tim veća što je more na tom području dublje.



*Slika 13. Prikaz brzine dugih valova u moru.*

Što je omjer brzine dugih valova i brzine atmosferskog vala bliži jedinici, to je pojačanje vala snažnije. Ovaj se omjer naziva Freudov broj te je prikazan na *Slici 14*, uz uvaženu pretpostavku da je brzina atmosferskog vala iznosila 317 m/s.



*Slika 14. Prikaz Froudeovog broja, tj. omjera brzine dugih valova u moru i brzine atmosferskog vala, pod pretpostavkom da je brzina atmosferskog vala bila 317 m/s.*

Uspoređujući prethodne dvije slike sa slikom koja prikazuje amplitude razine mora za prvi (*Slika 11*) i za drugi val (*Slika 12*), primjećujem da su amplitude najveće upravo tamo gdje se očekuje najveće pojačanje vala zbog Proudmanove rezonancije. Prva postaja koja se ističe je postaja Cascais, koja i za prvi i za drugi val ima veliku amplitudu za razinu mora, što je za očekivati s obzirom na njen položaj i dubinu mora u blizini. Iduće postaje za koje postoji značajno pojačanje valova su one na jugu Italije, a posebno postaja Crotone koja za prvi val ima najveću amplitudu vala u mora od svih postaja. U Sredozemnom je moru Freudov broj vrlo mal, na sjeveru čak manji od 0.1, što objašnjava zašto postaje Venecija i Sobra imaju iznimno male do neprimjetne amplitude za razinu mora.

U budućem bi radu bilo korisno izračunati koja su teorijska vremena dolazaka atmosferskih valova. Mogao bi se promotriti oblik postaja koje su po položaju blizu, što bi moglo objasniti zašto postaje na jugu Italije imaju dosta različite amplitude za razinu mora.

## 5 Literatura

- [1] David Meyer: *New York post*, *Photos show Tonga volcano collapsing just before eruption*. URL: [Photos show Tonga volcano collapsing just before eruption \(nypost.com\)](https://nypost.com/2023/09/21/photos-show-tonga-volcano-collapsing-just-before-eruption/) (21.9.2023.)
- [2] *Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga*, Science, URL: [Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga | Science](https://www.science.org/doi/10.1126/science.1261111) (21.9.2023.)
- [3] J. S. Diaz, S. E. Rigby: *Energetic output of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai volcanic eruption from pressure measurements*, URL: [Energetic output of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai volcanic eruption from pressure measurements \(springer.com\)](https://www.springer.com/9789819770000/chapter/10.1007/9789819770000_10) (21.9.2023.)
- [4] F. Estrada: *Tsunami generation potential of a strike-slip fault tip in the westernmost Mediterranean*, Scientific Reports, URL: [Tsunami generation potential of a strike-slip fault tip in the westernmost Mediterranean | Scientific Reports \(nature.com\)](https://www.nature.com/articles/s41598-023-28111-1) (21.9.2023.)
- [5] *Meteorological tsunamis in the Adriatic Sea*, URL: [Meteorological tsunamis in the Adriatic Sea \(izor.hr\)](https://www.izor.hr/en/2023/09/21/meteorological-tsunamis-in-the-adriatic-sea/), (21.9.2023.)
- [6] *Pacific volcano: New Zealand sends flight to assess Tonga damage*, BBC, URL: [Pacific volcano: New Zealand sends flight to assess Tonga damage - BBC News](https://www.bbc.com/news/world-pacific-67281111), (21.9.2023.)
- [7] *Sea level station monitoring facility*, UNESCO, URL: [SEA LEVEL STATION MONITORING FACILITY \(ioc-sealevelmonitoring.org\)](https://ioc-sealevelmonitoring.org/) (21.9.2023.)
- [8] Sensor community, URL: [Build your DIY sensor and become part of the worldwide citizen science, open data, civic tech network. Supported by a lot of contributors ❤️](https://www.sensorcommunity.org/), (21.9.2023.)
- [9] Emery, W. J., & Thomson, R. E. (2004). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0>
- [10] Job Dronkers: *Proudman resonance and meteo tsunamis*. URL: [http://www.coastalwiki.org/wiki/Proudman resonance and meteo tsunamis](http://www.coastalwiki.org/wiki/Proudman_resonance_and_meteo_tsunamis) (22.09.2023.)
- [11] Wright, C.J., Hindley, N.P., Alexander, M.J. *et al.* Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga–Hunga Ha‘apai eruption. *Nature* **609**, 741–746 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>