

Meteorološki tsunamiji i procjena pojavljivanja u budućoj klimi

Vulinović, Paola

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:166:900999>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno matematički fakultet
Odjel za fiziku

Paola Vulinović

**Meteorološki tsunamiji i procjena pojavljivanja
u budućoj klimi**

Magistarski rad

Split, 2019.

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno matematički fakultet
Odjel za fiziku

Paola Vulinović

**Meteorološki tsunamiji i procjena pojavljivanja
u budućoj klimi**

Magistarski rad

Split, 2019.

Ovaj rad, izrađen u Splitu, pod vodstvom dr.sc Ivice Vilibića, predan je na ocjenu Odjela za fiziku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Splitu radi stjecanja zvanja magistra fizike.

Zahvaljujem se mentoru dr.sc Ivici Vilibiću i Nataliji Dunić, mag. phys., na nesebičnoj pomoći te brojnim savjetima u izradi ovog rada.

Zahvaljujem svojim roditeljima na pruženoj pomoći, razumijevanju i podršci.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Splitu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Odjel za fiziku

Magistarski rad

METEOROLOŠKI TSUNAMIJI I PROCJENA POJAVLJIVANJA U BUDUĆOJ KLIMI

Paola Vulinović

Ul. Ruđera Boškovića 33, 21000, Split

Meteorološki tsunami je prirodna pojava koja nastaje djelovanje težinskih valova u atmosferi na more putem rezonantnih procesa. Teško se predviđaju, a kad se pojave, mogu trajati do nekoliko sati te uzrokovati velike štete na obali. Da bi procijenili pojavu meteotsunamija u budućoj klimi, u ovom smo radu konstruirali meteotsunami indekse koristeći se s nekoliko sinoptičkih značajki za koje se prethodnim istraživanjima pokazalo da su povezane s nastankom i razvojem meteotsunamija. Indekse smo procijenili za područje Balearskog otočja zbog učestale pojave meteotsunamija na tom području.

(46 stranica, 29 slika, 42 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: indeks, meteotsunami, klima, modeli

Voditelj: dr. sc. Ivica Vilibić

Ocjenitelji: Natalija Dunić, mag. phys.

doc. dr. sc. Žarko Kovač

Rad prihvaćen: 13.09.2019

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Split

Faculty of science:

Graduation Thesis

Department of Physics

METEOROLOGICAL TSUNAMIS AND THEIR FREQUENCY IN FUTURE CLIMATE

Paola Vulinović

Ul. Ruđera Boškovića 33, 21000, Split

Meteorological tsunami is a natural phenomenon that is generated by gravity waves that resonantly transfer the energy into the sea. It is difficult to predict the phenomenon, which can last up to several hours and cause huge damage in coastal areas. To evaluate the occurrence of meteotsunamis in a future climate, we constructed meteotsunami index using several synoptic variables that are known to be relevant during meteotsunamis. We estimated indices for the Balearic Islands because of the frequent occurrence of meteotsunamis in the area.

(46 pages, 29 figures, 42 references, original in: Croatian)

Key words: index, meteotsunami, climate, models

Supervisor: dr. Ivica Vilibić

Reviewers: Natalija Dunić, mag. phys.

dr. Žarko Kovač

Thesis accepted: 13.09.2019

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. METEOROLOŠKI TSUNAMI.....	2
2.1 Razlika između tsunamija i meteotsunamija.....	3
2.2 O fenomenu.....	3
2.3 Veza sa sinoptičkim poljima	6
2.4 Sinoptički indeks meteotsunamija	6
3. KLIMATSKI MODELI	8
3.1 Vrste klimatskih modela	9
3.2 Temelji klimatskog modeliranja	10
3.3 Pogreške u modeliranju klime	13
4. SIMULACIJE REGIONALNOG KLIMATSKOG MODELA ZA SREDOZEMLJE	14
4.1 Postavke i karakteristike Aladin modela	14
4.2 CORDEX i Med-CORDEX.....	15
4.3 Regionalne klimatske simulacije za Sredozemlje	17
5. MATERIJALI, METODE I REZULTATI.....	19
5.1 Meteotsunami indeksi.....	19
5.2 Sezonski hod percentila.....	23
5.3 Trend	30
6. RASPRAVA.....	33
7. ZAKLJUČAK	35
8. LITERATURA	36

1. UVOD

Meteorološki tsunami je prirodna pojava koja nastaje djelovanje težinskih valova u atmosferi na more putem rezonantnih procesa. Ovu je pojavu teško razlikovati od tsunamija budući da imaju isti raspon frekvencija i slične učinke na obali. Najčešće se javlja u dugačkim i uskim uvalama i zaljevima gdje dubina mora iznosi oko 50 m. Postoji nekoliko mjesta na svijetu s učestalom pojavom jakih meteotsunamija gdje je ova pojava dobila i narodno ime. U Italiji se naziva „marobio“ (tal. *marrobbio*), u Japanu „abiki“ (jap. *abiki*), u Španjolskoj „rissaga“ (šp. *rissaga*) dok je u Hrvatskoj poznata pod nazivom „šćiga“.

Meteotsunamiji se teško predviđaju, a kad se pojave, mogu trajati i do nekoliko sati te uzrokovati velike štete na obali. Primjerice, jedan od najjačih meteotsunamija dogodio se u Veloj Luci na Korčuli 21.05.1978. Visina vala iznosila je oko 6 m, a ukupna direktna šteta bila je procijenjena na tadašnjih 7 milijuna američkih dolara.

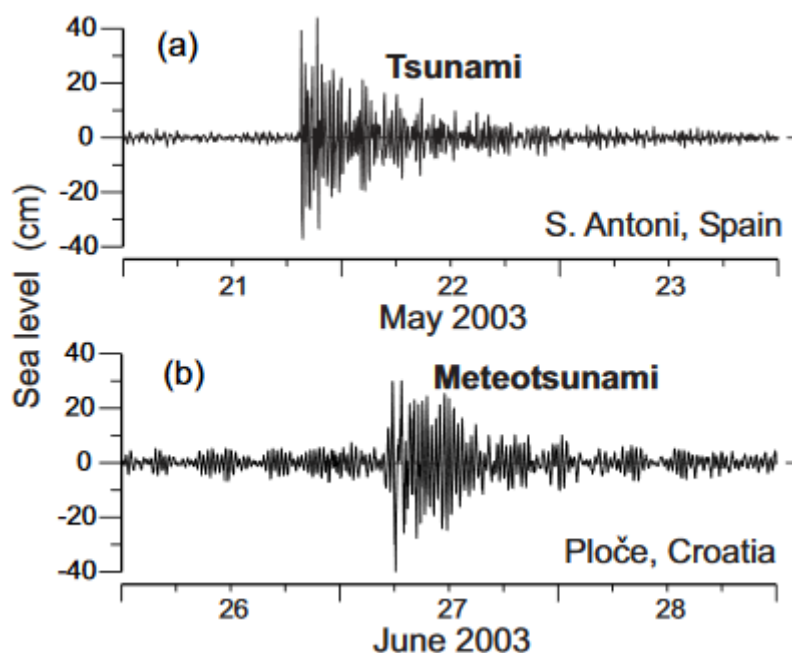
Da bi procijenili pojavu meteotsunamija u budućoj klimi, u ovom smo radu konstruirali meteotsunami indekse koristeći se s nekoliko sinoptičkih značajki za koje se prethodnim istraživanjima pokazalo da su povezane s nastankom i razvojem meteotsunamija [2].

Indekse smo procijenili za područje Balearskog otočja zbog učestale pojave meteotsunamija na tom području, posebno u luci Ciutadella koja ima ljevkašti oblik što pogoduje pojačavanju ovog fenomena. Indekse smo konstruirali za prošla razdoblja (1950.-2005. i 1979.-2012.) kako bi mogli utvrditi vezu između stvarnih događaja i procijenjenih vrijednosti indeksa, te smo pomoću njih procijenili njihovo pojavljivanje u budućim razdobljima. Za tu svrhu, analizirali smo prošle simulacije regionalnog klimatskog modela (eng. *Regional Climate Model*, RegCM) za područje Sredozemlja, te tri buduća RCP (eng. *Representative Concentration Pathways*) određenim Međuvladinim panelom za klimatske promjene (eng. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC), ovisno o koncentraciji emisije stakleničkih plinova.

Osim vrijednosti indeksa, u ovom smo radu procijenili trendove te odredili sezonski hod indeksa kako bi utvrdili periode s najvećom vjerojatnosti pojave meteotsunamija.

2. METEOROLOŠKI TSUNAMI

Meteorološki tsunami ili meteotsunami je prirodni fenomen koji nastaje međudjelovanjem atmosfere i oceana. Za razliku od tsunamija koji nastaje pomicanjem tektonskih ploča, vulkanskih erupcija ili zbog pada asteroida ili meteora, meteotsunami je povezan s poremećajem u atmosferskom tlaku. Ponekad je na temelju mjerenja visine razine mora teško razlikovati pojavu meteotsunamija od pojave tsunamija, budući da se bilježi sličan raspon amplituda, frekvencija te oscilacija razine mora (slika 1.).



Slika 1. Usporedba oscilacije razine mora koja se događa tijekom pojave tsunamija i meteotsunamija; (a) oscilacija razine mora tijekom pojave tsunamija 2003. godine u San Antoniu (Španjolska); (b) oscilacija razine mora tijekom pojave meteotsunamija 2003. godine u luci Ploče (Hrvatska).

Izvor:[3]

Za razliku od klasičnog tsunamija, meteotsunami crpi energiju iz atmosfere, a nastaje samo u slučaju višestruke rezonance. Prilikom pojave meteotsunamija dolazi do naglog povećanja razine mora, tj. velikog vala, koji može uzrokovati velike štete, posebice ako se javlja u plitkom moru ili zaljevu. Na otvorenom moru meteotsunami je teško uočljiv. Vrijeme trajanja je najčešće nekoliko sati, a u ekstremnim slučajevima poremećaj može trajati jedan dan ili čak i duže. Meteotsunami se vrlo rijetko javlja i teško ga je predvidjeti, obzirom da ovisi o preklapanju određenog stanja atmosfere i oceana te o topografiji morskog dna. Također, zbog velike sličnosti u ponašanju, vrlo je teško razlikovati meteotsunami od klasičnog tsunamija.

2.1 Razlika između tsunamija i meteotsunamija

Osnovna razlika između tsunamija i meteotsunamija je u generirajućoj sili te količini energije. Pomicanjem tektonskih ploča dolazi do deformacije morskog dna, pri čemu se stvaraju veliki brijegovi ili ulegnuća. Voda iznad deformiranog područja je potisnuta iz ravnotežnog položaja te se pod utjecajem gravitacijske sile formiraju tsunami valovi. Takvi valovi se odlikuju vrlo velikim valnim duljinama (oko 200 km) te periodom od 10 do 60 minuta, međutim zbog niskog omjera valne duljine i dubine mora oni se ponašaju kao valovi plitkog mora. Brzina širenja tsunamija u otvorenom moru je velika (do 800 km/h), a približavanjem obali oni usporavaju, zbog čega njihova amplituda (visina vala) raste, a valna duljina se smanjuje. Stopa gubitka energije je obrnuto proporcionalna valnoj duljini, stoga se učinak tsunamija može osjetiti i do nekoliko tisuća kilometara od epicentra. Djelovanje meteotsunamija je lokalne prirode, jer on nikad ne dostiže energiju tsunamija, zbog čega ne može prijeći velike udaljenosti kao što je slučaj kod tsunamija. Tsunamiji i meteotsunamiji se odlikuju gotovo istim rasponom frekvencija te istim učincima u blizini obale, stoga ih je teško razlikovati bez poznavanja njihovog izvora.

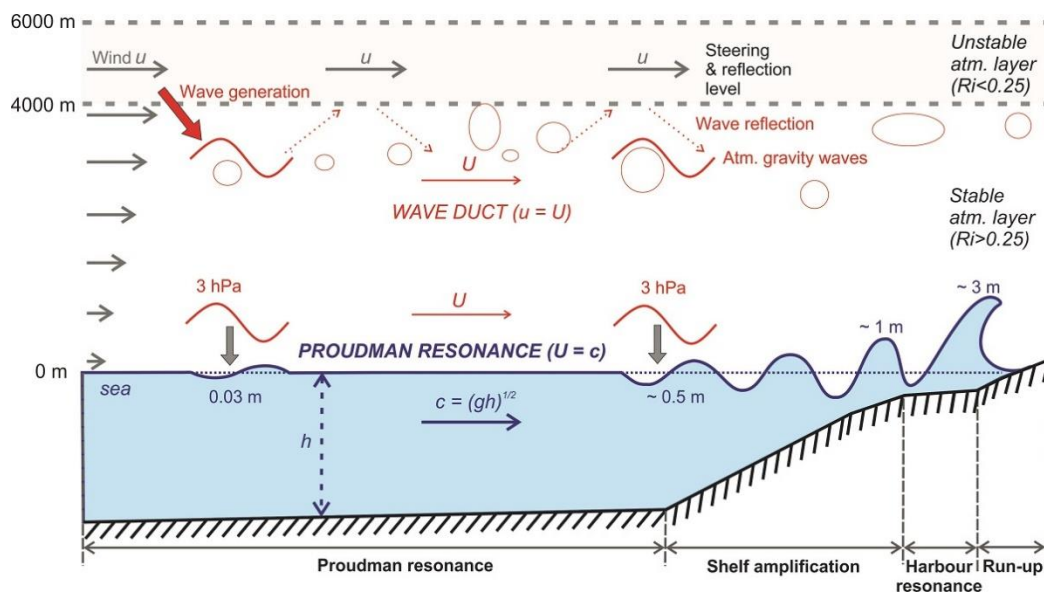
2.2 O fenomenu

Meteotsunami nastaje preklapanjem seša i težinskih valova u atmosferi. Seši ili slobodne oscilacije su stojni valovi koji se javljaju u zatvorenim morima, jezerima te zaljevima. Oni nastaju ako dođe do jakih oscilacija u tlaku zraka u vrlo kratkom vremenu te zbog nagle promjene brzine i smjera vjetra. Ako vjetar puše prema kraju bazena te mu se pritom naglo poveća brzina, dolazi do povećanja razine mora na zatvorenom kraju bazena. Ako u nekom trenutku vjetar prestane puhati ili promijeni svoj smjer, relaksirajućim periodičkim osciliranjem dolazi do izjednačavanja razina mora na otvorenom i zatvorenom kraju bazena. Periodi slobodnih oscilacija ovise o dimenzijama i batimetriji područja, dok su amplitude ovisne i o brzini promjene intenziteta i smjera vjetra [4]. Svaki zaljev ili jezero ima svoj osnovni seš.

Težinski valovi predstavljaju poremećaje u atmosferi koji nastaju zbog vertikalnog smicanja vjetra, vertikalnih konvekcija te strujanja preko planinskih prepreka. Oni nastaju na rubovima olujnih oblaka te na području između dviju različitih zračnih masa (frontalna zona), a očituju se kao brza promjena tlaka zraka na malom području (2-5 hPa u 10 min, u ekstremnim slučajevima i do 15 hPa u 30 min).

Da bi došlo do pojave izraženog meteotsunamija, potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta. Prvo, težinski val iznad površine mora se mora kretati prema zaljevu, pri čemu se mogu pobuditi barotropni valovi u moru čija je brzina širenja jednaka brzini težinskog vala, a jednoznačno je određena dubinom mora (npr. brzina atmosferskog vala od 22 m/s je ekvivalentna brzini barotropnog vala u moru dubokom 50 m), pomoću tzv. Proudmanove rezonancije [8].

Val koji je na otvorenom moru nastao pod ovim uvjetima, ulazi u zaljev i ako je period vala blizak periodu seša zaljeva, dolazi do obalne rezonancije [7]. Amplituda tako nastalih valova se pojačava približavanjem obali zbog utjecaja batimetrije. Izduženi i ljevkasti zaljevi te nagla promjena dubine mora uvelike doprinose povećanju amplitude valova koji mogu doseći visinu i do nekoliko metara. Takvi valovi mogu biti razorni i uzrokovati velike štete na obalnim područjima. Grafički prikaz opisane pojave nalazi se na slici 2.



Slika 2. Mehanizam nastajanja meteotsunamija; Atmosferski težinski valovi (crvene kuglice) nastaju na granici stabilne i nestabilne atmosfere te uzrokuju velike oceanske valove čija se amplituda povećava zbog Proudmanove rezonance, nagle promjene dubine mora te usklađivanja frekvencije ulaznog vala i frekvencije zaljeva. Izvor: [1.]

Da bi se postigla Proudmanova rezonancija, brzina vala dubokog mora U mora biti jednaka brzini atmosferskog težinskog vala c :

$$U = c = (gh)^{\frac{1}{2}} \quad (1.),$$

gdje je g gravitacijska konstanta, a h dubina mora.

Amplituda vala A se povećava dokle god traje rezonancija između težinskog vala i vala na moru:

$$A = \frac{d}{2L} \quad (2.),$$

gdje je d udaljenost koju prođe val u rezonanciji, a L je dužina potrebna za promjenu tlaka.

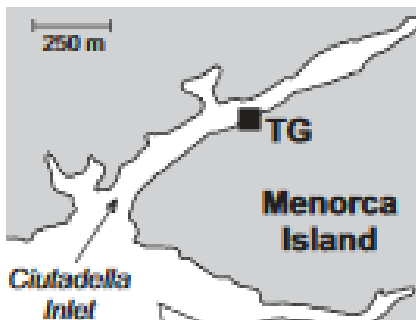
Zaljevi ljevkastog oblika ili izduženi zaljevi pogoduju dodatnom povećanju amplitude vala.

Q faktor ili faktor kvalitete možemo opisati kao broj slobodnih titraja koje izvede titrajni sustav dok sva njegova energija ne prijeđe na okolinu. Visoke vrijednosti Q faktora imaju sustavi koji tritraju još dugo nakon prestanka djelovanja pobudne sile. Sustavi koji se umire nakon prestanka djelovanja pobudne sile imaju nizak Q faktor [30]. Za uvale i zaljeve pravokutnog oblika, Q faktor definiramo kao omjer duljine i širine zaljeva ili uvale:

$$Q = \frac{L_1}{L_2} \quad (3.)$$

L_1 je duljina, a L_2 širina zaljeva. Ako je $Q \gg 1$, amplituda vala se povećava.

Jedan od jačih meteotsunamija je zabilježen u Japanu, u zaljevu Nagasaki, 1979. godine, a amplituda vala je iznosila preko 5 m [9]. Česta pojava meteotsunamija zabilježena je i na Balearskom otočju (Španjolska) s najvećim amplitudama u luci Ciutadella [9]. Ciutadella ima vrlo visoki Q faktor ($Q \approx 9$) zbog svog geometrijskog oblika (slika 3.). Osim u Japanu i Balearskom otočju, meteotsunamiji su zabilježeni i u zapadnoj Siciliji, Malti te Chicagu [9]. U Hrvatskoj je zabilježeno nekoliko izrazito jakih meteotsunamija, u Veloj Luci (Korčula), Malom Lošinju, Malom Stonu te Starom Gradu (Hvar) [9]. Upravo je meteotsunami koji se pojavio u Veloj Luci 1978. godine najjači meteotsunami ikad zabilježen u Jadranskom moru. Amplituda vala je iznosila oko 6 m, a materijalne štete su bile ogromne.



Slika 3. Izgled luke Ciutadella; Izvor: [3]

2.3 Veza sa sinoptičkim poljima

Prethodnim istraživanjima potvrđeno je da je nastanak i razvoj meteoroloških tsunamija izravno povezan s određenim sinoptičkim stanjima i procesima u atmosferi [1]. Najveći broj istraživanja je provedeno na području Sredozemlja gdje su uočene sljedeće sinoptičke značajke:

- snažni vjetrovi koji se javljaju na visinama od 5500 do 9000 m (300-500 hPa). Takvi vjetrovi su glavni uzrok nestabilnosti i poremećaja u atmosferi. Ako brzina vjetra dosegne brzinu valova otvorenog mora, dolazi do rezonance. Usklađivanjem frekvencija rezonantnog vala i frekvencije zaljeva, dolazi do formiranja meteorološkog tsunamija.
- dotok toplog i suhog zraka u donju troposferu zbog čega dolazi do temperaturne inverzije, odnosno porasta temperature s visinom.
- snažni vjetrovi u srednjoj troposferi te slabe površinske ciklone i vjetrovi.

Ovi uvjeti pridonose stvaranju težinskih oblaka u donjoj troposferi koji, uz brzu promjenu tlaka na malom području, mogu pogodovati razvoju meteotsunamija.

Osim na području Sredozemlja, navedeni sinoptički uvjeti uočeni su i na nekoliko mjesta diljem svijeta (zapadna i istočna obala Sjeverne i Južne Amerike, Portugal, Japan, Australija [2]).

1.4 Sinoptički indeks meteotsunamija

Meteotsunami indeks je linearna funkcija odabranih sinoptičkih varijabli za koje se pokazalo da najbolje opisuju atmosferski inducirane oscilacije razine mora za danu lokaciju [2]. Poznavanjem meteotsunami indeksa moguće je procijeniti pojavu ovih događaja u prošlosti, sadašnjosti i budućnosti.

Za konstrukciju meteotsunami indeksa za područje prikazano na slici 4. (Balearsko otočje) korištene su sljedeće sinoptičke varijable:

- relativna vlažnost zraka na 500 hPa
- tlak zraka na površini mora
- brzina vjetra na 1000 hPa
- brzina vjetra na 550 hPa
- temperatura na 850 hPa

- temperatura na 925 hPa
- geopotencijal na 500 hPa.

Meteotsunami indeks računamo prema relaciji:

$$I = A_1a + A_2b + A_3c + A_4d + A_5e + A_6 \quad (3.)$$

gdje su :

a-vertikalna razlika brzine vjetra na 500 i 1000 hPa visine iznad Ciutadelle (prazan kružić)

b-horizontalna razlika tlaka na morskoj razini između Ciutadelle i točke 2

c-vertikalna razlika temperature na 850 i 950 hPa iznad Ciutadelle

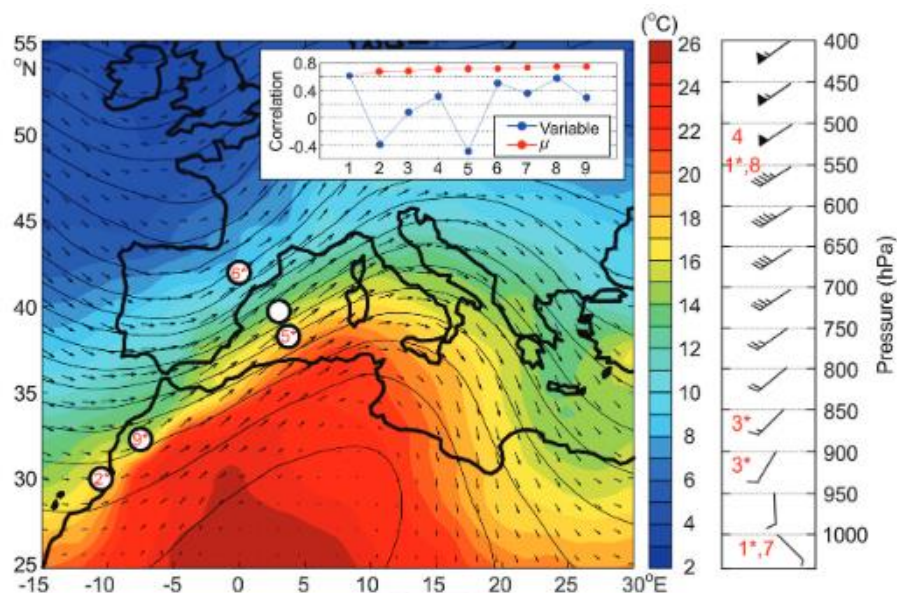
d-relativna vlažnost na 500 hPa iznad Ciutadelle

e-horizontalna geopotencijalna razlika između Ciutadelle i točke 5

Točke 2 i 5 prikazane su na slici 4.

A_1, \dots, A_6 predstavljaju empirijski određene koeficijente.

Prethodno opisana metoda prema kojoj računamo meteotsunami indekse preuzeta je iz literature [2].



Slika 4. Karta s koordinatama postaja i usrednjenim sinoptičkim varijablama (geopotencijal na 500 hPa, temperatura na 850 hPa i vjetar na 550 hPa) za 15 najjačih oscilacija razine mora u razdoblju od 01.01.2013. do 01.01.2016. godine; Ciutadella je označena praznim kružićem. Graf unutar slike pokazuje koeficijente korelacije između sinoptičkih varijabli i visina valova (plava linija) te između visine valova i meteotsunami indeksa (crvena linija). Izvor: [2]

Meteotsunamiji pogađaju ovo područje i do nekoliko puta godišnje, ali su slabe jačine pa prođu gotovo nezapaženo. Međutim, zabilježeno je i nekoliko ekstremnih meteotsunamija koji su na ovom području uzrokovali milijunske štete. Posljednji jaki meteotsunami se dogodio 16.07.2018. godine, a visina vala je iznosila 1.5 m [32]. Pogođene su brojne luke na otocima Mallorca i Menorca (Puerto de Alcudia, Andraitx, Porto Colom, Porto Cristo, Colonia de Sant Jordi i Ciutadella) [32]. Meteotsunami je započeo u 9.15 h te je trajao dva sata [32]. Jaki meteotsunamiji su se dogodili 1984., 2006. i 2013. godine, a u sva tri slučaja najviše je pogođena luka Ciutadella gdje su zabilježene štete od nekoliko desetaka milijuna eura.

3. KLIMATSKI MODELI

Prije opisa klimatskih modela i klimatskog modeliranja, potrebno je razumijeti što je to klima. Klimu nekog područja definiramo kao skup usrednjenih klimatskih varijabli u određenom vremenskom razdoblju. Najčešće se uzima vremensko razdoblje od 30 godina. U klimatske varijable ubrajamo atmosferski tlak, temperaturu i vlažnost zraka, smjer i brzina vjetra, isparavanje, insolacija, naoblaka, oborine i snježni pokrivač, te mnoge druge. Opažanje i mjerenje klimatskih varijabli izvodi se na meteorološkim postajama koje dijelimo na kopnene, morske (brodske postaje, plutače), automatske i satelitske.

Klimatski sustav se sastoji od atmosfere, litosfere, hidrosfere, biosfere te kriosfere (ledeni pokrivač). Svaka od komponenti klimatskog sustava je vrlo kompleksna, a njihovo međudjelovanje na nekom području rezultira klimom koja je karakteristična za to područje. Zbog kaotične prirode klimatskog sustava, procesi koji se zbivaju u svakoj od komponenti nisu linearni. Iz tog se razloga ne može predvidjeti buduća klima analitičkim putem na temelju opažanja iz prošlosti. Stoga se uvode klimatski modeli, odnosno numeričke simulacije klime određenog sustava, koji nam omogućuju prikaz pojedinih komponenti klimatskog sustava i njihova međudjelovanja.

Klimatski model definiramo kao skup nelinearnih diferencijalnih jednadžbi koji opisuju fizikalne, kemijske i biokemijske zakone i procese u svakoj od komponenti klimatskog sustava te njihovo međudjelovanje.

Rezultati dobiveni numeričkim rješavanjem ovih jednadžbi nisu apsolutno točni iz više razloga. Prvo, zbog kompleksnosti klimatskog sustava još uvijek nisu poznati svi procesi

unutar pojedinih komponenti sustava. Nadalje, rezolucija klimatskih modela još uvijek nije dovoljno fina da bi se procesi ili pojave unutar sustava koji se odvijaju na maloj skali mogli razlučiti. Primjerice, neke vrste oblaka se pojavljuju na skali manjoj od 1 km, stoga se oni ne mogu razlučiti. Osim toga, za pojedine procese i pojave koji se odvijaju na nižim skalama nedostaju jednadžbe koje bi ih u potpunosti opisale. Dodatni problem se javlja prilikom numeričkog rješavanja jednadžbi. Nelinearne diferencijalne jednadžbe se numeričkim putem diskretiziraju, tj. jednadžbe se aproksimiraju sustavom algebarskih jednadžbi, čime se diferencijalna jednadžba dovodi u konačno dimenzionalan prostor. U klimatskom modeliranju, numerička diskretizacija znači da se računanje obično vrši u točkama neke računalne mreže (regularne, geografske) ili u nekom drugom obliku (primjerice, spektralnom prostoru) [11]. Kompleksne jednadžbe se zamjenjuju jednadžbama čije je rješenje poznato, stoga je dobiveni rezultat aproksimativan. Različiti modeli koriste različite metode rješavanja diferencijalnih jednadžbi.

3.1 Vrste klimatskih modela

Razlikujemo dvije vrste klimatskih modela: globalni i regionalni klimatski modeli.

Globalnim klimatskim modelima horizontalna domena pokriva cijelu zemaljsku kuglu, a u obzir se najčešće uzimaju sve komponente klimatskog sustava te njihovo međudjelovanje, uključujući i ciklus ugljika. Sastoje se od atmosferskog modela, modela tla, modela oceana te modela leda.

U atmosferskom modelu Zemlja je podjeljena na mrežu trodimenzionalnih ćelija. U vertikalnom smjeru atmosfera je najčešće podijeljena na 30 do 40 nehomogenih slojeva, s time da je praksa veću vertikalnu rezoluciju zadržati u blizini površine Zemlje. Rješenja jednadžbi za cijelu mrežu dobivaju se na način da se u svakoj od ćelija rješavaju fizikalne, kemijske te biokemijske jednadžbe.

Informacije o vegetaciji, svojstvima tla (temperatura, vlažnost) te o tipu tla sadržane su u modelu tla.

Model oceana također ima horizontalnu i vertikalnu podjelu, pri čemu je horizontalna razlučivost veća nego u atmosferskom modelu.

Model leda je vrlo bitan u modeliranju klime jer uzima u obzir međudjelovanje atmosfere i leda na morskoj površini. Zbog visokog albeda, refleksija sunčevog zračenja na ledenim

površinama je velika. Na područjima gdje se površina leda smanjuje, smanjuje se i refleksija pa ocean apsorbira više topline. Dio te topline se emitira u atmosferu što uzrokuje zagrijavanje atmosfere. Osim procjene zagrijavanja mora i atmosfere, model leda aproksimativno može predvidjeti ponašanje ledenog pokrivača u budućnosti.

Regionalni klimatski model pokriva manje područje na Zemlji (slika 5.), poput određene regije ili kontinenta. U odnosu na globalni klimatski model, on ima bolju horizontalnu i vertikalnu rezoluciju što omogućuje precizniji izračun klimatskih elemenata (procesu i pojavi). Budući da pokriva samo određeno područje, regionalni klimatski model zahtijeva početne i rubne uvjete koji se uzimaju od globalnih klimatskih modela.

Klimatski modeli su u mogućnosti projicirati postojeću klimu na duže vremenske periode uzimajući u obzir vanjska djelovanja na pojedine komponente klimatskog sustava, primjerice utjecaj stakleničkih plinova. Temeljem IPCC izvještaja [33] najčešće se simuliraju tri scenarija ovisno o koncentraciji stakleničkih plinova u atmosferi za period do 2100. godine, tzv. RCP scenariji (*eng. Representative Concentration Pathways*).

3.2 Temelji klimatskog modeliranja

Klimatski model je računalni program koji djeli atmosferu, hidrosferu, litosferu te kriosferu na trodimenzionalne ćelije ili mrežu. Što je veći broj ćelija, tj. dimenzije ćelija su manje, to je veća (bolja) prostorna rezolucija. Modeli koji imaju bolju rezoluciju pružaju mnogo detaljnije informacije, no za takve modele je potrebno računalo veće snage i duže vrijeme izračunavanja. Uz zadane početne uvjete (npr. temperatura, tlak, salinitet te vlažnost u početnom trenutku), jednadžbe se rješavaju za svaku pojedinu ćeliju u mreži. Uz prostornu rezoluciju, svaki model ima i vremensku rezoluciju koja se odnosi na duljinu vremenskog koraka prilikom računa. Drugim riječima, vremenska rezolucija predstavlja učestalost izračunavanja pojedinih klimatoloških parametara u modelu. Dakle, model računa klimatološke parametre za svaku pojedinu ćeliju u svakom zadanom vremenskom koraku. Za globalne klimatske modele najčešće se definira vremenski korak od 30 min do 3 h [34], dok je za regionalne klimatske modele vremenski korak od u prosjeku 1 do 4 minute. Početno stanje klimatskog sustava (početni uvjeti) se dobiva unosom trenutnih izmjerenih vrijednosti klimatoloških parametara u model. Takav proces se naziva proces inicijalizacije. Počevši od početnog stanja klimatskog sustava, jednadžbama se računa stanje klimatskog sustava za jedan vremenski korak, primjerice za 4 minute. Tako dobiveno stanje klimatskog sustava

predstavlja početne uvjete za sljedeći vremenski korak. Iz „novih“ početnih uvjeta računa se stanje klimatskog sustava za idućih 4 minute, a račun se ponavlja sve dok se ne završi simulacija. Vrijeme trajanja simulacije mora iznositi minimalno 30 godina jer je to standardno razdoblje za određivanje klimatskih karakteristika.

Da bi se utvrdila ispravnost klimatskog modela, potrebno je testirati ponašanje modela na već utvrđenoj klimi. To se vrši tako da se nelinearne diferencijalne jednačbe rješavaju za neko prošlo razdoblje za koje postoje izmjerene klimatske varijable. Zatim je potrebno izvesti validaciju modela, odnosno usporediti simuliranu klimu sa stvarnom (izmjerenom) klimom. Ako je razlika velika, za takav model se smatra da je nepouzdan. Određena razlika između stvarne i simulirane klime će uvijek postojati obzirom da model može dati samo aproksimativne rezultate. Međutim, raznim statističkim metodama se može procijeniti stanje buduće klime tako da se uzme u obzir ta razlika.

Buduća klima uvelike ovisi i o trendu emisije stakleničkih plinova. Kako budućnost njihove emisije ovisi o socijalnom, gospodarskom i ekonomskom razvoju čovječanstva, buduća klima se ne može sa sigurnošću predvidjeti. Stoga se uvode RCP scenariji unutar modela kako bi se vidio njihov utjecaj na buduću klimu. U klimatski model se uključuju koncentracije stakleničkih plinova na način da se pomoću shema zračenja uključi njihov utjecaj na promjenu u ravnoteži zračenja koje dolazi u atmosferu i onog koje iz nje odlazi. Klimatski model simulira odziv klimatskog sustava na zadane promjene [29].

IPCC definira sljedeće scenarije emisije stakleničkih plinova (slika 6.):

- **A1** - brz gospodarski razvoj i porast broja stanovništva do sredine 21. stoljeća, a nakon toga dolazi do opadanja. Predviđa se uvođenje novih i učinkovitijih tehnologija, povećanje kulturnih i društvenih interakcija te smanjenje regionalnih razlika u dohotku stanovništva.

Scenarij **A1** dijeli se u tri skupine koje opisuju alternativne smjerove tehnoloških promjena u energetsom sustavu:

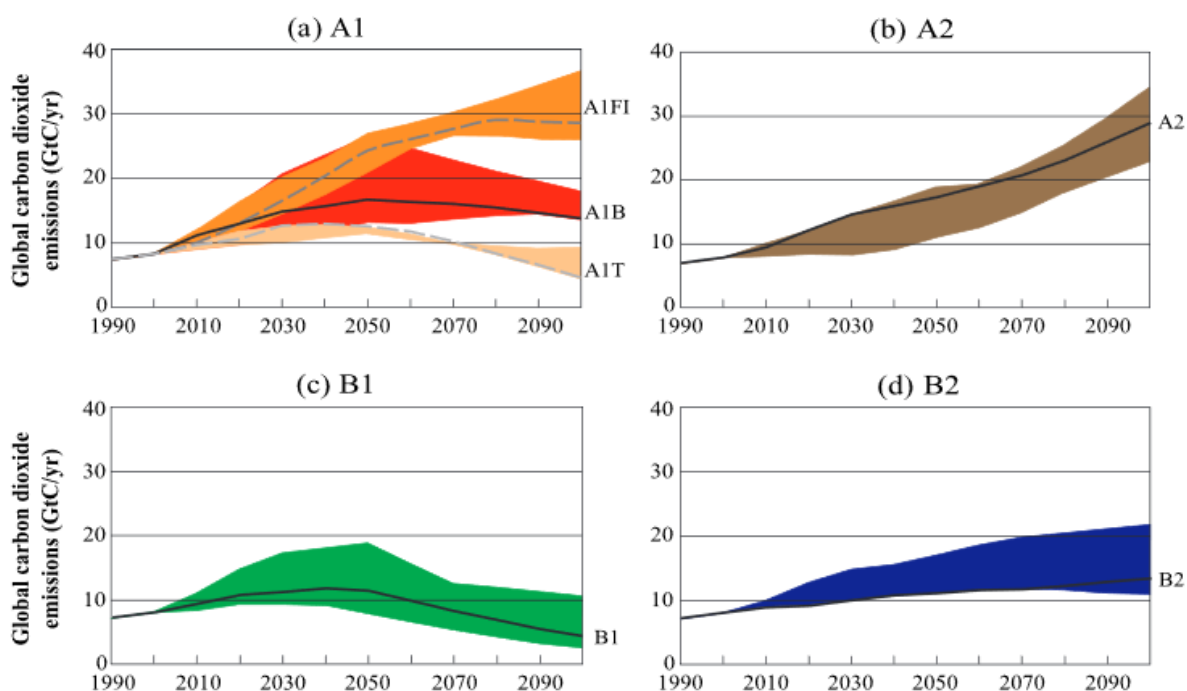
A1FI-intenzivno korištenje fosilnih goriva

A1T-korištenje nefosilnih izvora energije

A1B-uravnoteženo korištenje fosilnih i nefosilnih izvora energije

- **A2** - globalno povećanje broja stanovništva, regionalna orijentacija gospodarskog i tehnološkog razvoja koji je sporiji u odnosu na druge scenarije.
- **B1** - globalna populacija raste do sredine 21. stoljeća, a nakon toga opada. Predviđa uvođenje čistih tehnologija.
- **B2** - kontinuirani porast broja stanovništva, ali po stopi manjoj nego u A2 scenariju. Tehnološke promjene, ali i raznovrsnije u odnosu na A1 i B1 scenarij. Predviđa se orijentacija prema zaštiti okoliša.

Navedeni scenariji pokrivaju gotovo sve moguće smjerove promjena, od visokog udjela fosilnih goriva kao glavnog izvora energije do visokog udjela nefosilnih goriva. U većini scenarija, globalna površina šuma se nastavlja smanjivati do polovice 21. stoljeća, u prvom redu zbog porasta broja stanovništva. Promjena koncentracije stakleničkih plinova proračunava se biološkim, kemijskim i geološkim modelima.



Slika 5. Ukupna emisija ugljikovog dioksida u gigatonama po godini u razdoblju od 1990. do 2100. do godine za sva četiri scenarija; (a) emisija ugljikovog dioksida prema scenariju A1; (b) emisija ugljikovog dioksida prema scenariju A2; (c) emisija ugljikovog dioksida prema scenariju B1; (d) emisija ugljikovog dioksida prema scenariju B2. Izvor: [29.]

Scenarij A1 razvija se u tri smjera. Prema A1F, koncentracija ugljikovog dioksida raste do kraja 21. stoljeća, te nastavlja rasti nakon. A1B predviđa porast koncentracije ugljikovog dioksida do sredine 21. stoljeća, a zatim se koncentracija blago smanjuje. Prema A1T, vidljiv je blagi porast koncentracije do sredine 21. stoljeća, a zatim koncentracija opada na iznos manji nego što je zabilježen 1990. godine (slika 5, a). A2 scenarij predviđa neprekidan porast koncentracije ugljikovog dioksida s najvećom stopom rasta u odnosu na ostale scenarije (slika 5, b). Prema B1 scenariju, koncentracija ugljikovog dioksida raste do sredine 21. stoljeća, a zatim se smanjuje na vrijenost nešto nižu od vrijednosti zabilježene 1990. godine (slika 5, c). B2 scenarij predviđa blagi, ali stalni porast koncentracije ugljikovog dioksida do kraja 21. stoljeća (slika 5, d).

3.3 Pogreške u modeliranju klime

Kao što je već spomenuto, stanje klimatskog sustava dobiveno modeliranjem klime nije apsolutno točno, što znači da projekcije buduće klime ne možemo uzeti sa sigurnošću kao takve.

Osjetljivost rješenja dobivenim numeričkim modeliranjem ovisi o nekoliko faktora:

- uvođenje početnih i rubnih uvjeta
- uvođenje parametrizacije (statistička veza između poznatih i nepoznatih vrijednosti) zbog nelinearnosti sustava
- pojednostavljivanje jednadžbi
- neadekvatna rezolucija za razlučivanje pojedinih procesa (npr. radijacija, turbulencija, te konvekcija)

I mala promjena u pojedinim navedenim faktorima može rezultirati drukčijim rezultatom. Danas, različiti modeli ne koriste iste oblike navedenih faktora (npr. parametrizacija nije jedinstvena za svaki model), stoga će različiti modeli rezultirati različitim procjenama buduće klime.

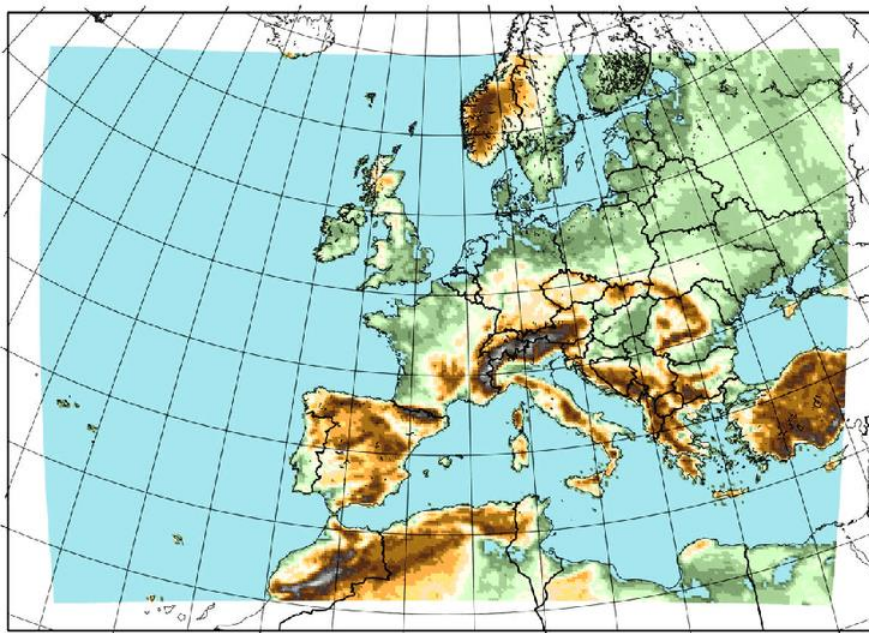
Nadalje, scenariji emisije i koncentracije stakleničkih plinova također nisu apsolutno pouzdani. Emisija stakleničkih plinova u prvom redu ovisi o gospodarskom i tehnološkom razvoju, te o povećanju ili smanjenju broja stanovništva što se ne može sa sigurnošću predvidjeti.

4. SIMULACIJE REGIONALNOG KLIMATSKOG MODELA ZA SREDOZEMLJE

U svrhu procjene meteotsunami indeksa na području prikazanim na slici 4., u ovom radu analizirali smo rezultate Med-CORDEX simulacija modela Aladin (verzija 5.2). Pri analizi smo koristili sljedeće simulacije za područje Sredozemlja: evaluacijska simulacija, povijesna simulacija, te simulacije triju zadanih scenarija budućnosti (RCP8.5, RCP4.5 i RCP2.6). U daljnjem tekstu opisane su osnovne karakteristike klimatskog modela Aladin, Med-CORDEX grupe, te simulacije regionalnih klimatskih modela za Sredozemlje.

4.1 Postavke i karakteristike Aladin modela

Aladin (*orig. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*) je bispektralni numerički klimatski model ograničenog područja [35]. Razvoj modela započinje u Météo-France (meteorološka služba u Francuskoj) 1990. godine u svrhu okupljanja i suradnje nacionalnih meteoroloških službi srednje i istočne Europe. 2000. godine glavni meteorološki centar u Francuskoj CNRM (*orig. Centre National de Recherches Météorologiques*) počinje koristiti Aladin model u svrhu regionalnog klimatskog modeliranja. Budući da je Aladin regionalni klimatski model, njegova domena je ograničena i podjeljena je na trodimenzionalne ćelije koje prekrivaju područje Europe (slika 6.).



Slika 6. Domena modela Aladin. Izvor: [36]

Aladin se, između ostalog, koristi za proučavanje i predviđanje regionalnih klimatskih fenomena poput poplava, toplinskih valova te izraženih oborinskih događaja.

Horizontalna rezolucija Aladin modela Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske je 8 km, a po vertikali ima podjelu na 49 razina. Omogućuje izračun očekivanih vrijednosti meteoroloških parametara poput tlaka, temperature, vjetra, vlažnosti zraka te oborina u svakoj točki mreže. Model se zasniva na jednadžbama hidrodinamike, termodinamike, zračenja te fizike oblaka. Što se tiče fizike oblaka, izračunom faznih promjena vode u atmosferi te termodinamičkih procesa dobiva se aproksimativno rješenje jednadžbi stanja, tzv. Navier-Stokesove jednadžbe. Njegova relativno gruba rezolucija omogućava predviđanje procesa koje se odvijaju na visokim skalama (100-1000 km) poput fronta.

Aladin koristi spektralnu metodu rješavanja jednadžbi, odnosno 2D bi-Fourierovu transformaciju meteoroloških varijabli za horizontalne koordinate, te metodu konačnih razlika za vertikalne koordinate. Diskretizacija u vremenu dobiva se primjenom polu-Lagrangian-ove sheme bazirane na praćenju gibanja pojedinih čestica zraka u atmosferi. Takva vremenska diskretizacija omogućuje stabilnost modela čak i u slučaju relativno dugih vremenskih koraka. U modelu se koristi hidrostatska aproksimacija (atmosfera se nalazi u hidrostatskoj ravnoteži, i pri tome vrijedi hidrostatska aproksimacija $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$) jer je za sustave koji su veći od svoje rezolucije akceleracija u vertikalnom smjeru zanemariva u usporedbi s akceleracijom u horizontalnom smjeru. Procesi koji se ne mogu razlučiti ili su vrlo složeni, poput fizike oblaka, turbulencije i konvekcije, uvodi se parametrizacija bazirana na ARPEGE (*orig. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*) globalnom modelu. Vertikalna koordinata je ista kao i kod ARPEGE modela. Početni uvjeti uzimaju se iz meteoroloških mjerenja i opažanja te iz ranije modeliranih prognoza, a rubni uvjeti preuzeti su iz ECMWF (*eng. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) reanalize. Model Aladin ne uzima u obzir gravitacijske valove, te ih eliminira digitalnim filtriranjem [35].

4.2 CORDEX i Med-CORDEX

Globalni klimatski modeli ne mogu razlučiti procese koji se događaju na nižim skalama, stoga se ne mogu koristiti za lokalnu ili regionalnu procjenu klime. Takve modele je potrebno prilagoditi, odnosno dodati određene informacije modelu u svrhu postizanja bolje prostorne rezolucije. Postoje dvije vrste prilagodbe modela: dinamička i statistička prilagodba. Što se

tiče dinamičke prilagodbe, regionalni fizikalni meteorološki i oceanski procesi izravno se modeliraju na finijoj prostornoj skali, uzimajući u obzir topografiju područja. Pri tome se rubni uvjeti uzimaju iz globalnog klimatskog modela. Ovakva prilagodba zahtijeva veliku računalnu snagu, stoga se rijetko koristi za projekcije lokalne klime. Kod statističke prilagodbe utvrđuje se statistička veza između varijabli na visokim skalama, poput vlažnosti zraka, te lokalnih varijabli, poput brzine vjetrova, oborina i temperature na nekom mjestu. Dobivena statistička veza unosi se u globalni klimatski model te se na taj način simulira lokalna klima.

CORDEX (*eng. Coordinated Regional Downscaling Experiment*) je međunarodna inicijativa čija je glavna zadaća prilagođavanje globalnih klimatskih modela na regionalnu domenu u svrhu boljeg razumijevanja regionalnih i/ili lokalnih klimatskih pojava i njihove vremenske i prostorne varijabilnosti [18]. Takvi modeli omogućuju projekciju klime s detaljnijim i točnijim prikazom lokaliziranih ekstremnih događaja u odnosu na globalne klimatske modele. CORDEX-ova područja u kojima se vrši prilagodba globalnih modela su sljedeće: Sjeverna Amerika (Sjeverna Amerika CORDEX), Južna Amerika (Južna Amerika CORDEX), srednja Amerika (Srednja Amerika CORDEX), Europa (EURO-CORDEX), Sredozemlje (MED-CORDEX) Afrika (CORDEX Afrika), južna Azija (južna Azija CORDEX), istočna Azija (istočna Azija CORDEX), jugoistočna Azija (SEA-CORDEX), srednja Azija (srednja Azija CORDEX), Australoazija (Australoazija CORDEX), Antarktika (Antarktika CORDEX), Arktik (Arktik CORDEX) te sjeveroistočna Afrika (MENA-CORDEX).

Med-CORDEX (*eng. Mediterranean CORDEX*) dio je međunarodne CORDEX inicijative čija domena obuhvaća područje Sredozemlja i dio Europe (slika 7.). Koriste se modeli tla, atmosfere, rijeka, te oceanski regionalni klimatski modeli visoke rezolucije, kao zasebni modeli, te kao kombinirani regionalni klimatski modeli (tzv. združeni modeli, *eng. coupled models*). Med-CORDEX teži poboljšanju klimatskih modela na način da se u modele uključe razni procesi klimatološkog sustava (atmosferski, hidrološki i biogeokemijski procesi, te dinamika oceana i kopna). Glavni ciljevi Med-CORDEX inicijative su poboljšanje razumijevanja prošlih klimatskih procesa koji su odgovorni za varijabilnost sredozemne klime u svrhu pružanja što točnijih i pouzadnijih budućih projekcija klime.



Slika 7. Med-CORDEX domena. Domena obuhvaća područje od 27°W do 58°E, te od 21°N do 60°N.

Izvor: [18.]

4.3 Regionalne klimatske simulacije za Sredozemlje

- EVALUACIJSKA SIMULACIJA

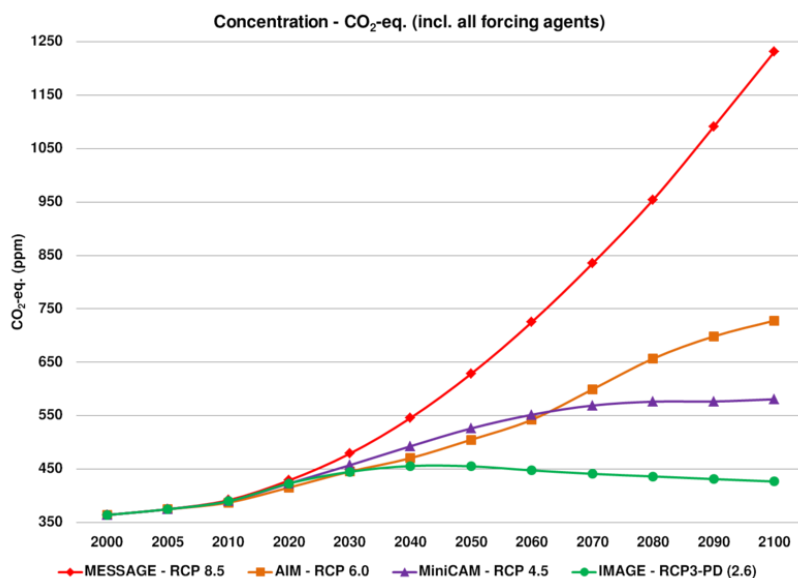
U ovoj simulaciji Aladin uzima rubne uvjete iz ERA-Interim (ECMWF) reanalize. Horizontalna rezolucija je ~50 km, dok je vertikalna podijeljena na 31 razina. Simulacija uzima u obzir sve stakleničke plinove (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11, CFC12). Uključena je i varijacija koncentracije klora te mjesečne varijacije čestica aerosola (pustinjski pijesak, morska sol, sulfati, crni ugljik, te organske i vulkanske čestice). Koristeći Tegenovu meteorologiju, sve vrijednosti čestica aerosola održavaju se konstantnim (12 vrijednosti - jedna za svaki mjesec u godini). Prije pokretanja simulacije, za model tla se provodi dvogodišnji spin-up (vrijeme potrebno modelu da postigne termodinamičku ravnotežu s vanjskim efektima). Sve točke su 100% u moru ili 100% na zemlji. Model ne uključuje procese u kojima, zbog ljudske aktivnosti, dolazi do promjene krajolika. Jedan od takvih procesa je primjerice deforestacija. Vulkanske erupcije nisu uključene u simulaciju, a solarno zračenje je stavljeno na konstantnu vrijednost od 1361 Wm⁻² uz uključene promjene koje pratu 11-godišnji sunčevi ciklus. Simulirani period evaluacijske simulacije je od 1979. do 2012. godine koji daje mjesečne vrijednosti varijabli. Ovakav tip simulacije daje najrealniji prikaz simulirane klime ovim modelom [38].

- POVIJESNA SIMULACIJA

Za povijesnu simulaciju Aladin uzima rubne uvjete iz CNRM-CM5 globalnog modela svakih 6 sati. Simulirani period je od 1950. do 2005. godine [39]. Ostale karakteristike su iste kao i kod evaluacijske simulacije. Za razliku od ostalih simulacija, povijesna simulacija koristi stvarne podatke pa može uhvatiti neočekivane događaje koji se ne bi nužno trebali predvidjeti teorijskim modelima.

- RCP scenariji

RCP (*eng. Representative Concentration Pathways*) scenariji su procjene scenarija buduće emisije stakleničkih plinova zbog ljudske aktivnosti. Scenariji predviđaju buduću promjenu koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi do 2100. godine. Postoje 4 scenarija: RCP2.6, RCP4.5, RCP6, i RCP8.5. Brojevi pokraj kratica predstavljaju razliku između radijacijskog zračenja (+2.6, +4.5, +6.0, i +8.5 W/m²) u 2100. godini u odnosu na količinu radijacijskog zračenja u predindustrijskom razdoblju [24]. Radijacijsko zračenje se definira kao razlika apsorbiranog (dugovalnog) sunčevog zračenja i emitiranog (kratkovalnog) zračenja sa Zemlje. Pozitivan predznak znači da je veća količina zračenja stigla na Zemlju nego što se emitirala natrag u svemir. Scenarij RCP2.6 predviđa da će emisija stakleničkih plinova doseći vrhunac između 2010. i 2020. godine, nakon čega će biti u padu. RCP4.5 i RCP6, predviđaju vrhunac stakleničkih plinova u 2040. i 2080. godini, respektivno, a nakon toga opadanje. Najkritičniji scenarij je RCP8.5 koji predviđa stalan rast emisije stakleničkih plinova kroz cijelo 21. stoljeće (slika 8.).



Slika 8. RCP scenariji; na x-osi je prikazano vrijeme, dok y-os označava koncentraciju ugljičnog –dioksida (CO₂) izražene u ppm (*eng. parts per million*).

Izvor: [24.]

Za buduće simulacije, Aladin uzima rubne uvjete iz CNRM-CM5 globalnog modela svakih 6 sati. Promjena koncentracije stakleničkih plinova (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11, CFC12) prati zadani scenarij. Spin-up nije potreban obzirom da RCP projekcije svoju simulaciju započinju od kraja povijesne simulacije. Simulirani period je od 2006. do kraja 2100. godine.

5. MATERIJALI, METODE I REZULTATI

5.1 Meteotsunami indeksi

Meteotsunami indeks je funkcija nekoliko sinoptičkih varijabli koja omogućuje procjenu vjerojatnosti pojavljivanja određenog meteotsunami događaja.

Indeksi su procijenjeni za područje Balearskog otočja (od -15.00°E do 30.00°E te od 24.75°N do 55.50°N) prikazanog na slici 4. Područje Balearskog otočja karakterizira pojava jakih i čestih meteotsunamija, posebno u luci Ciutadella upravo zbog njenog specifičnog oblika. Meteotsunami indeksi ovog područja se mogu primijeniti na bilo koje drugo područje na svijetu koje odlikuju slični sinoptički uvjeti kao što je slučaj kod Balearskog otočja.

Za konstrukciju meteotsunami indeksa koristi se jednačba (3) gdje su A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 i A_6 koeficijenti čije su vrijednosti redom: 3.361, -0.012, 5.582, 0.379, -0.022 i 23.601.

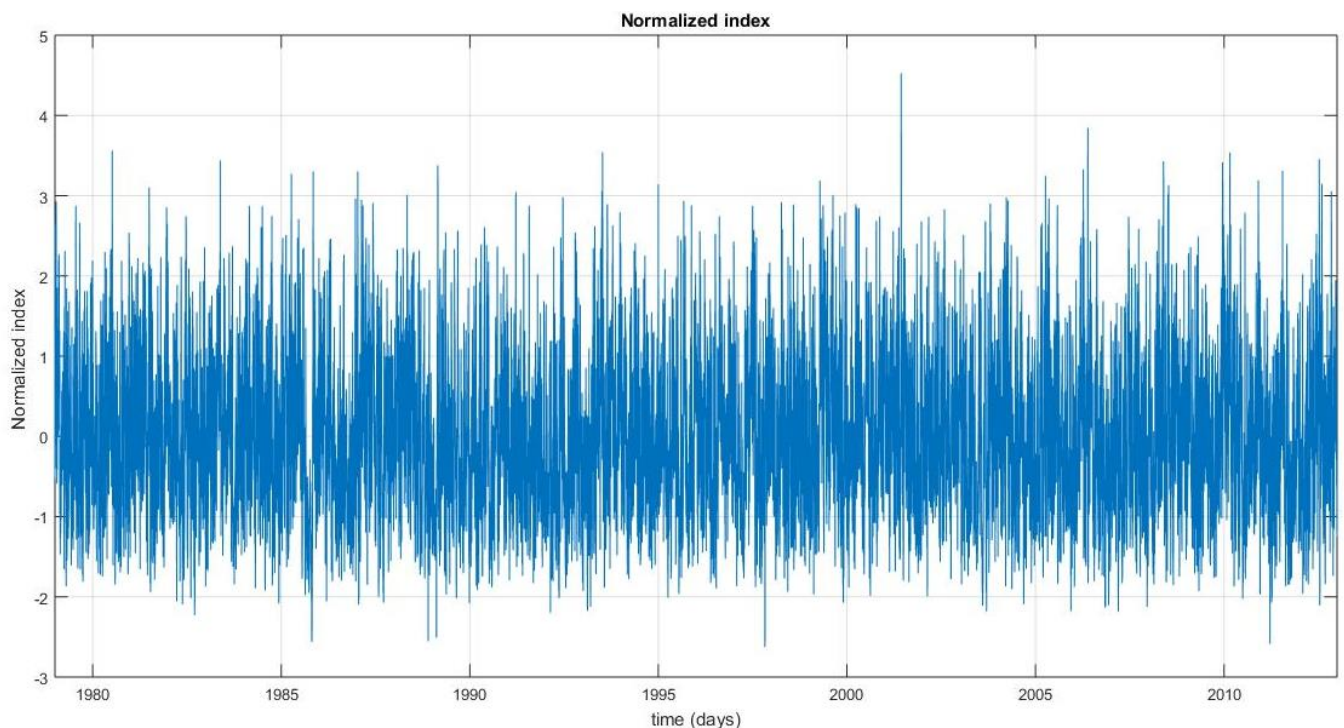
S obzirom da su meteotsunami indeksi konstruirani pomoću nekoliko varijabli koje su na različitim skalama i koje imaju različite mjerne jedinice, potrebno ih je normalizirati, odnosno dovesti te vrijednosti na neku uobičajenu skalu.

Vrijednosti meteotsunami indeksa smo normalizirali srednjom vrijednošću indeksa i standardnom devijacijom prema jednačbi:

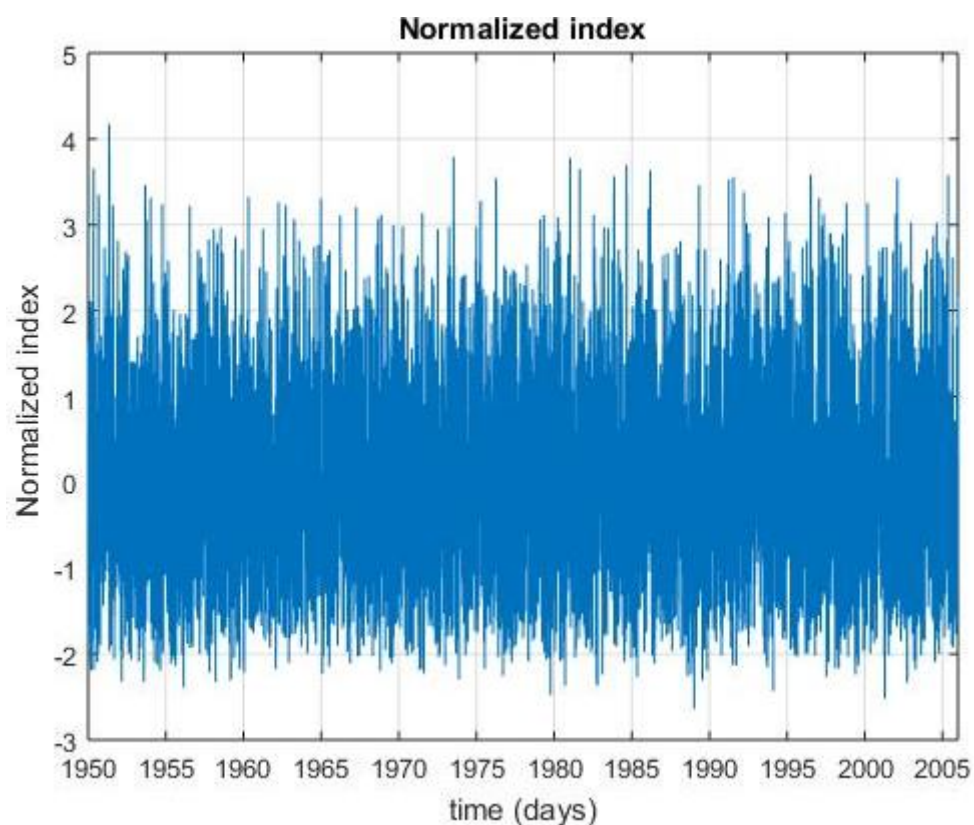
$$N_i = \frac{I - \bar{I}}{\sigma} \quad (4.)$$

gdje je N_i normalizirani meteotsunami indeks, \bar{I} je srednja vrijednost indeksa, I je indeks, a σ je standardna devijacija.

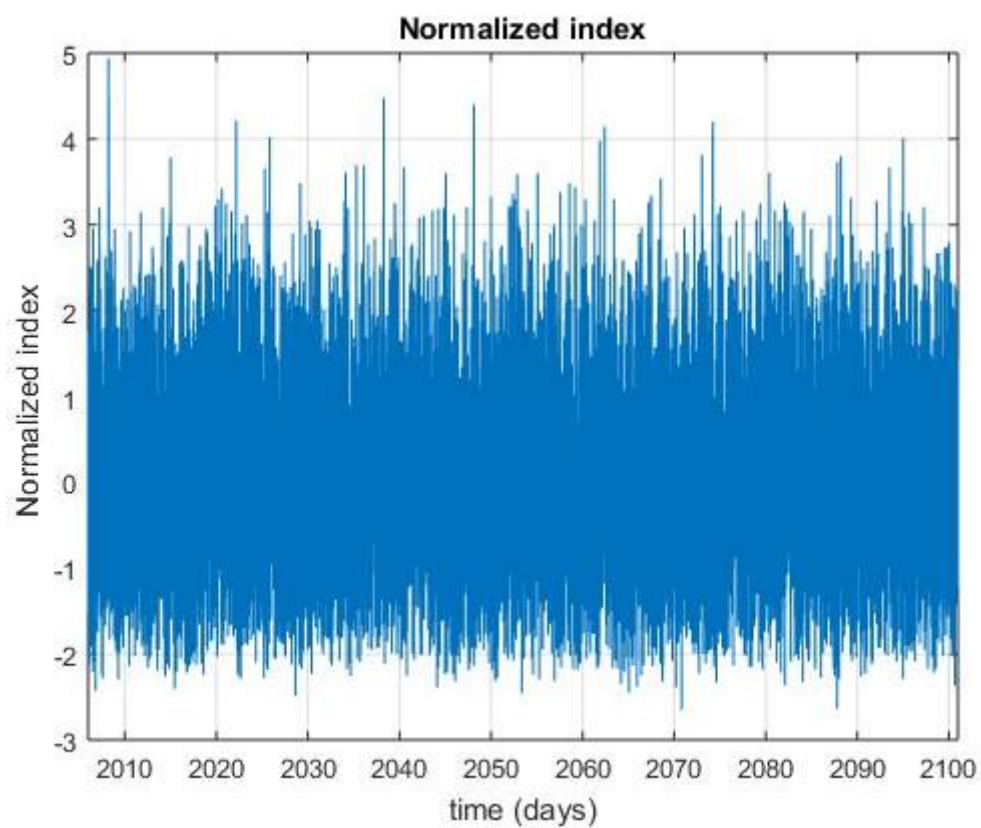
Vremenski nizovi normaliziranih vrijednosti meteotsunami indeksa za Balearsko područje (Slika 4) za sve evaluacijsku, povijesnu i RCP simulacije prikazane su na slikama 9. - 13.



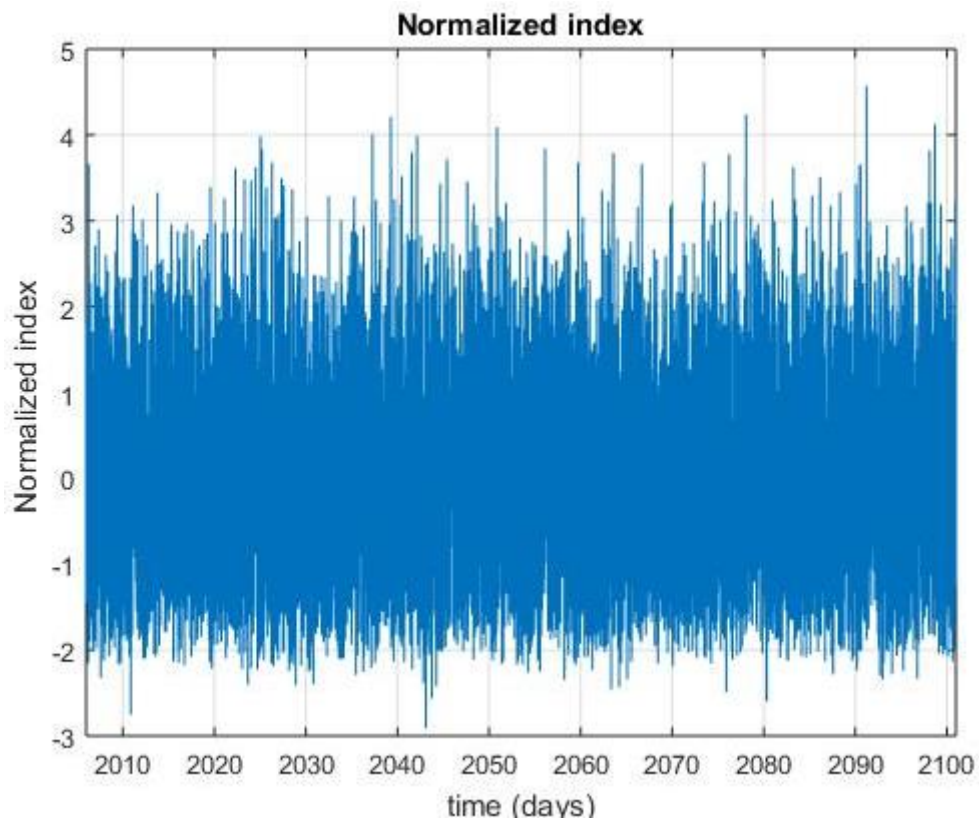
Slika 9. Vremenski prikaz vrijednosti normaliziranih meteotsunami indeksa za evaluacijsku simulaciju.



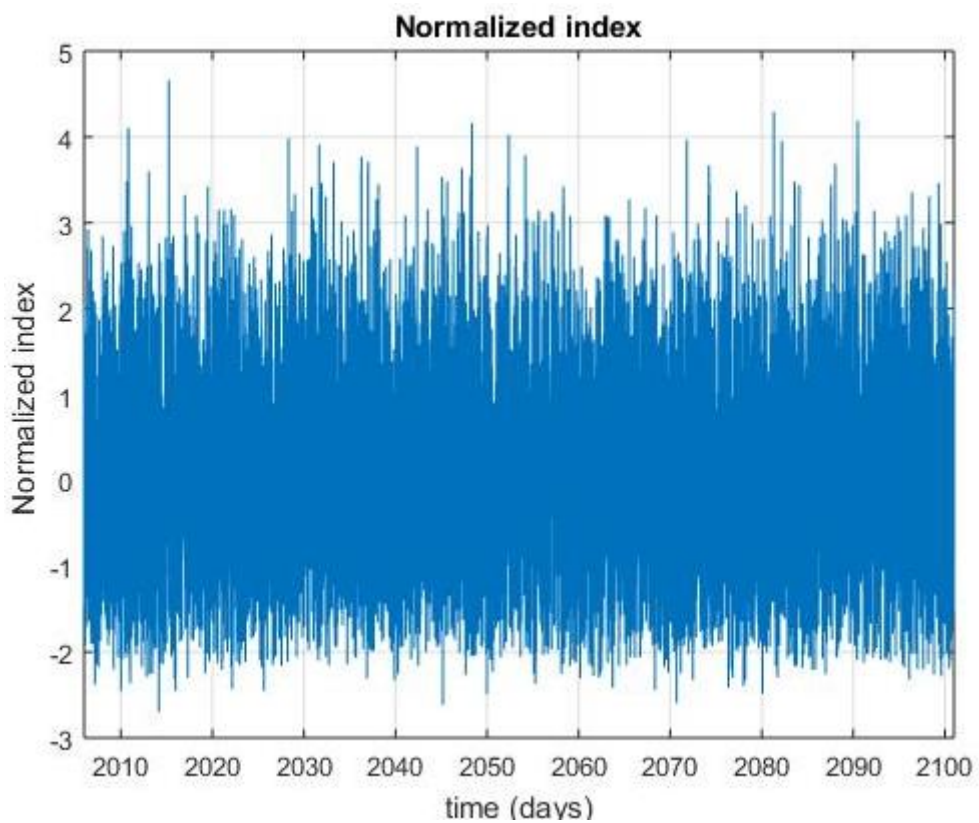
Slika 10. Vremenski prikaz vrijednosti normaliziranih meteotsunami indeksa za povijesnu simulaciju.



Slika 11. Vremenski prikaz vrijednosti normaliziranih meteotsunami indeksa za RCP2.6 simulaciju.



Slika 12. Vremenski prikaz vrijednosti normaliziranih meteotsunami indeksa za RCP4.5 simulaciju.



Slika 13. Vremenski prikaz vrijednosti normaliziranih meteotsunami indeksa za RCP8.5 simulaciju.

5.2 Sezonski hod percentila

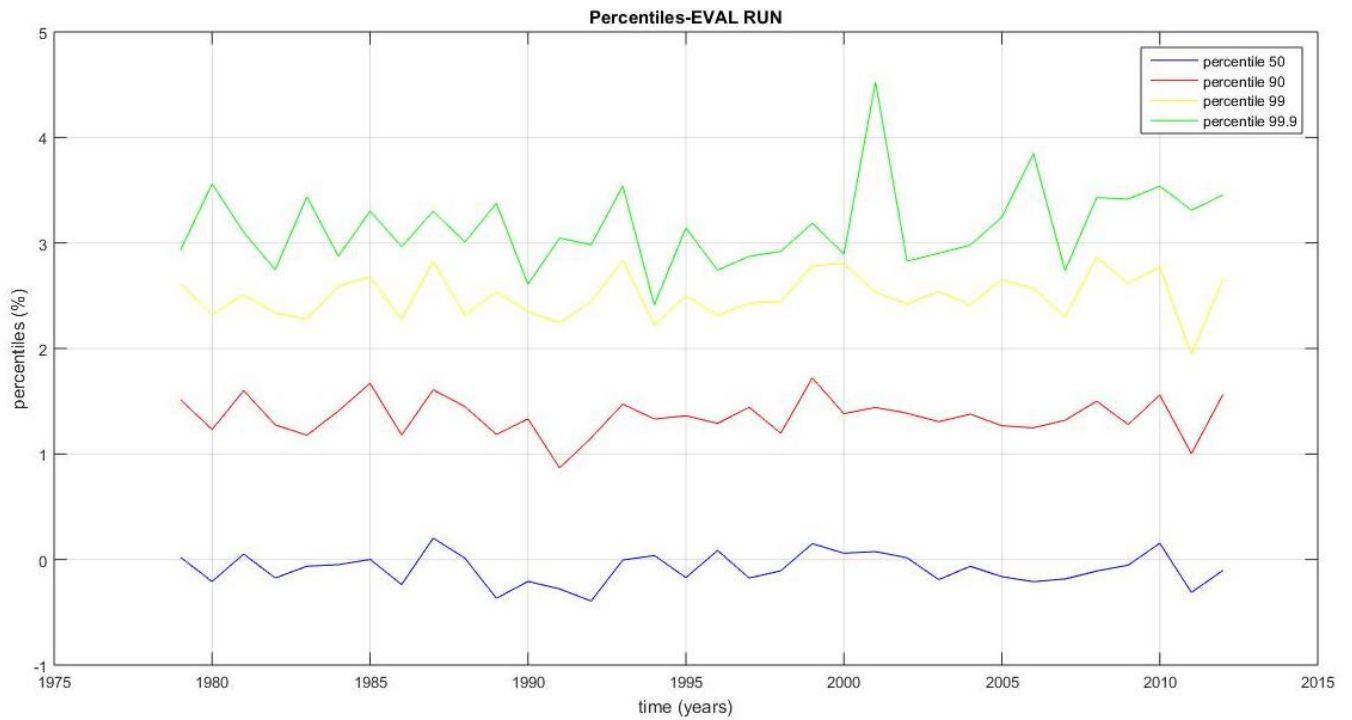
Percentili dijele distribuciju određenog niza na 100 jednakih dijelova, tako da svaki dio sadrži 1% distribucije. Pri određivanju percentila, elementi danog niza se poredaju od manjeg prema većem, a određeni percentil odgovara onoj točki distribucije koja daje određeni postotak rezultata do te točke. Drugim riječima, percentil je vrijednost ispod koje se nalazi određeni postotak svih elemenata niza. Položaj percentila u nizu određujemo prema formuli:

$$i = \frac{P*n}{100} \quad (6)$$

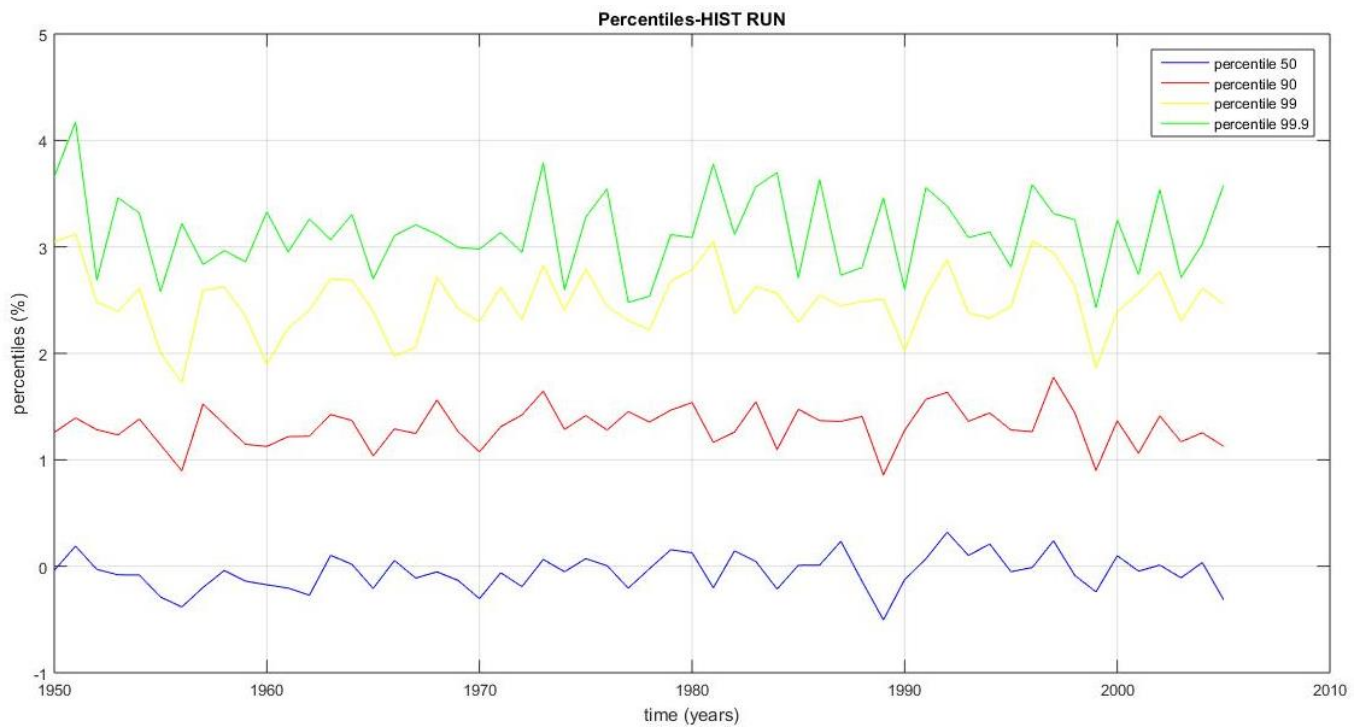
gdje je i položaj traženog percentila u nizu, P je vrijednost traženog percentila, a n je ukupan broj elemenata nekog niza.

Primjerice, pretpostavimo da imamo niz od 10 brojeva (npr. ocjene 10 studenata iz fizike): 4, 5, 4, 2, 3, 3, 2, 5, 2, 5, i zanima nas koju ocjenu je dobilo 30% studenata. Prvi korak je poredati elemente danog niza po veličini: 2, 2, 2, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 5. Upotrebom formule (6) dobivamo da se na 30-tom percentilu nalazi vrijednost 2. Zaključujemo da je 30% studenata dobilo ocjenu manju ili jednaku 2, dok je 70% studenata dobilo ocjenu veću od 2.

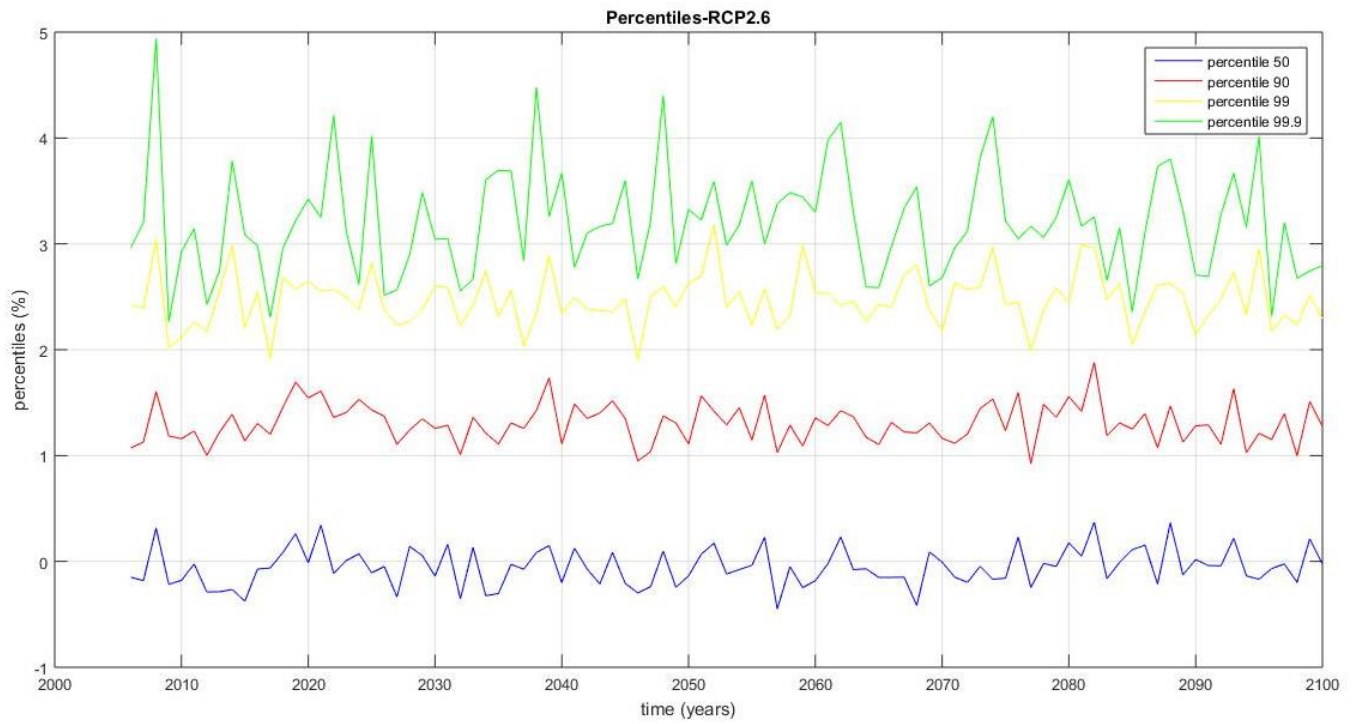
U svrhu određivanja sezonskog hoda meteotsunami indeksa, računali smo 50, 90, 99 i 99.9 percentile normaliziranih meteotsunami indeksa za sve simulacije. Percentile računamo kako bismo mogli usporediti vrijednost meteotsunami indeksa sa poznatim meteotsunami događajima. Dobiveni rezultati su prikazani na slikama 14.-18.



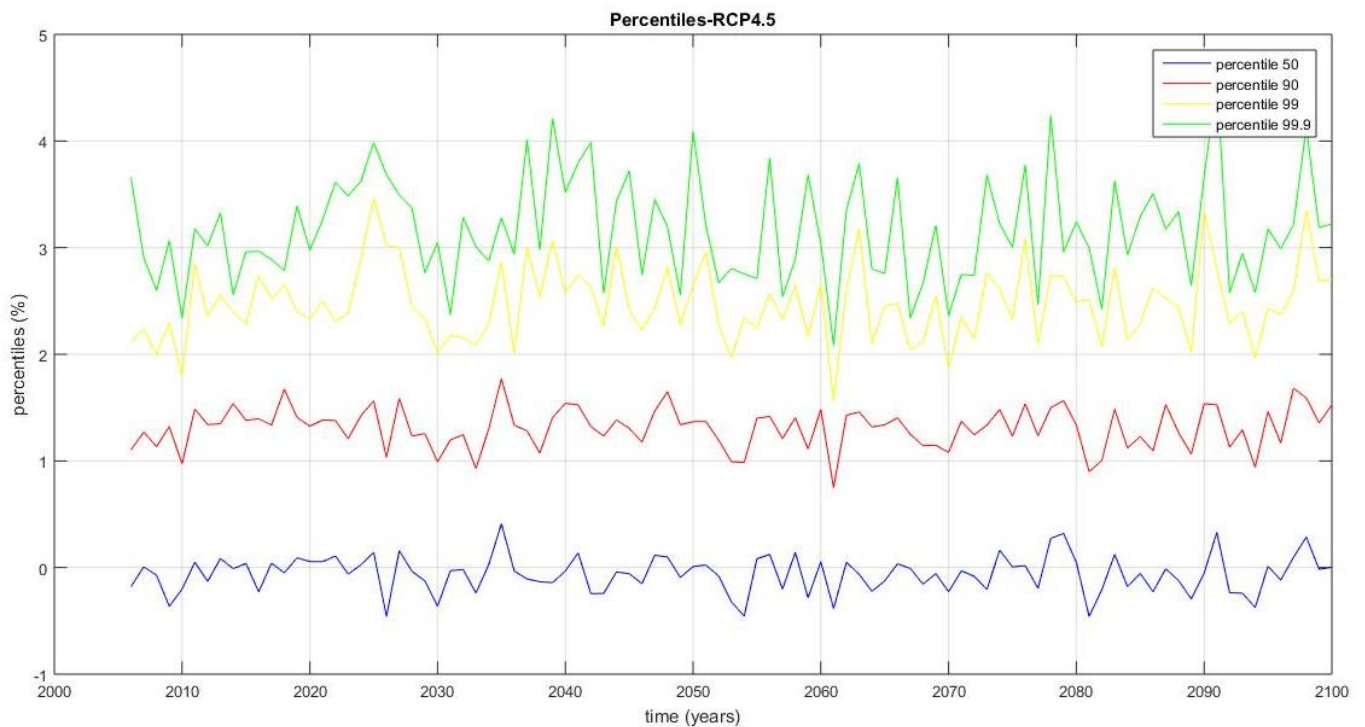
Slika 14. Vrijednosti 50-tog (plava linija), 90-tog (crvena linija), 99-tog (žuta linija), 99.9-tog percentila (zelena linija) u vremenu za evaluacijsku simulaciju



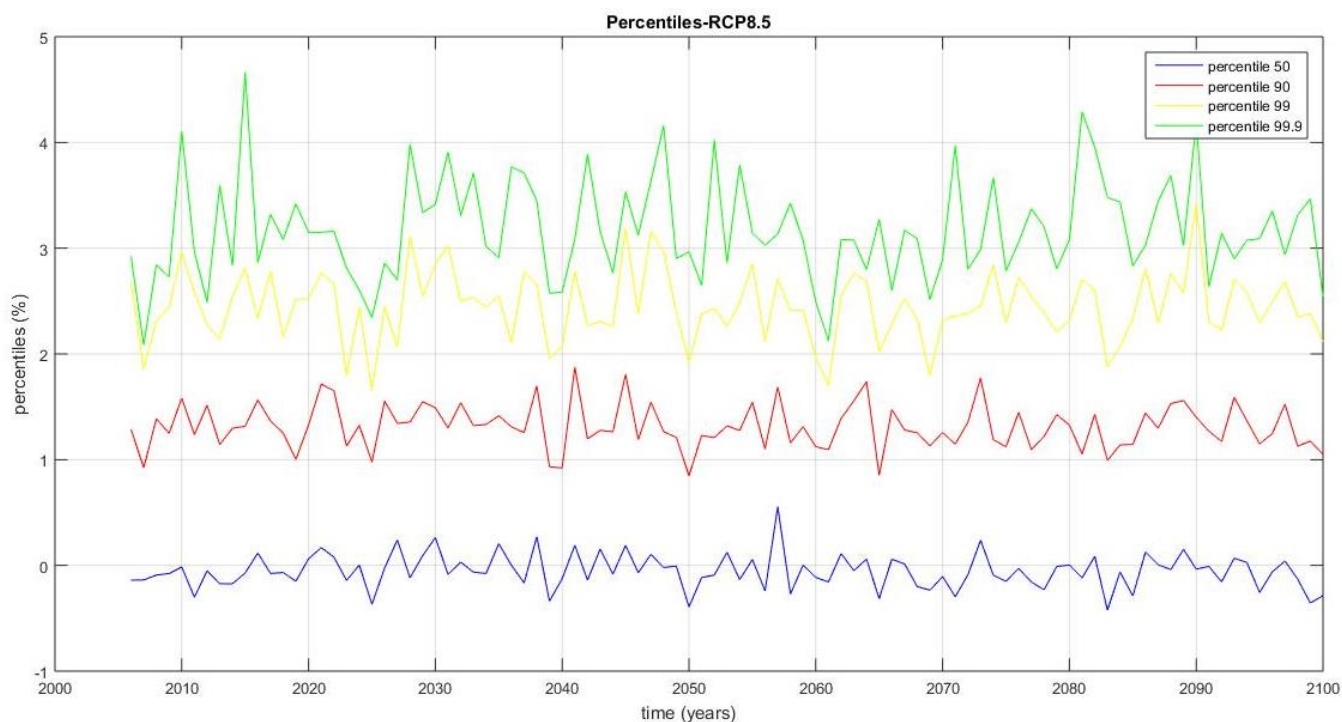
Slika 15. Vrijednosti 50-tog (plava linija), 90-tog (crvena linija), 99-tog (žuta linija), 99.9-tog percentila (zelena linija) u vremenu za povijesnu simulaciju



Slika 16. Vrijednosti 50-tog (plava linija), 90-tog (crvena linija), 99-tog (žuta linija), 99.9-tog percentila (zelena linija) u vremenu za RCP2.6 simulaciju



Slika 17. Vrijednosti 50-tog (plava linija), 90-tog (crvena linija), 99-tog (žuta linija), 99.9-tog percentila (zelena linija) u vremenu za RCP 4.5 simulaciju.

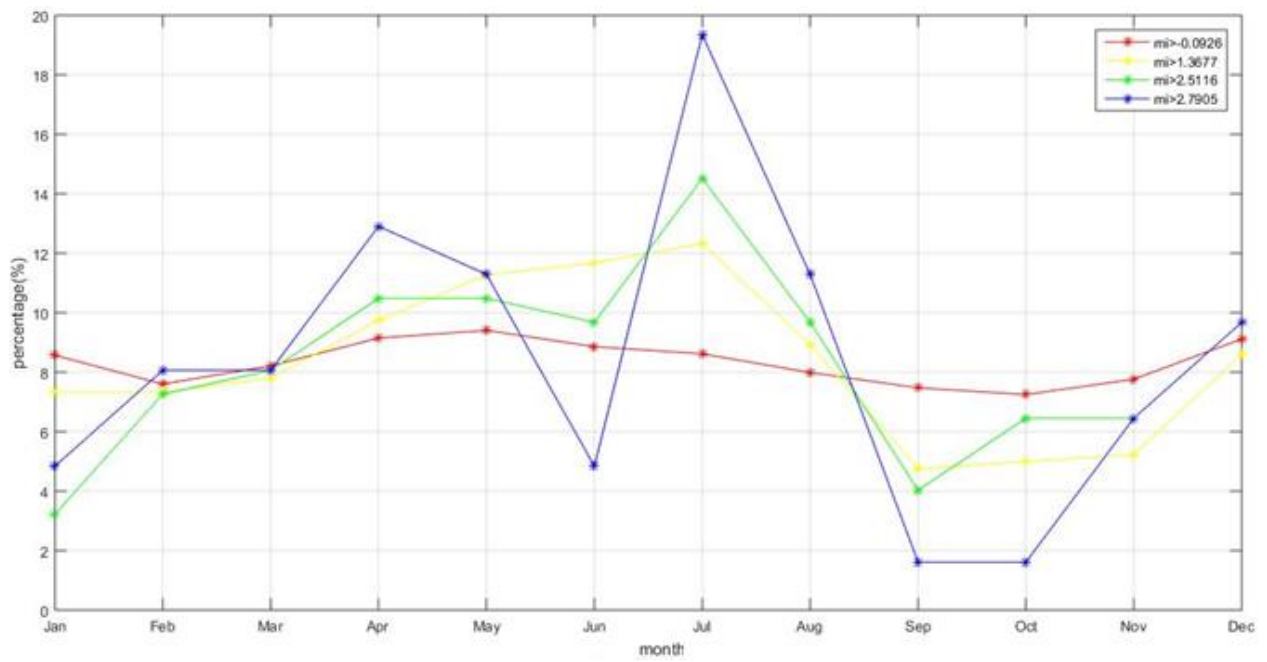


Slika 18. Vrijednosti 50-tog (plava linija), 90-tog (crvena linija), 99-tog (žuta linija), 99.9-tog percentila (zelena linija) u vremenu za RCP8.5 simulaciju.

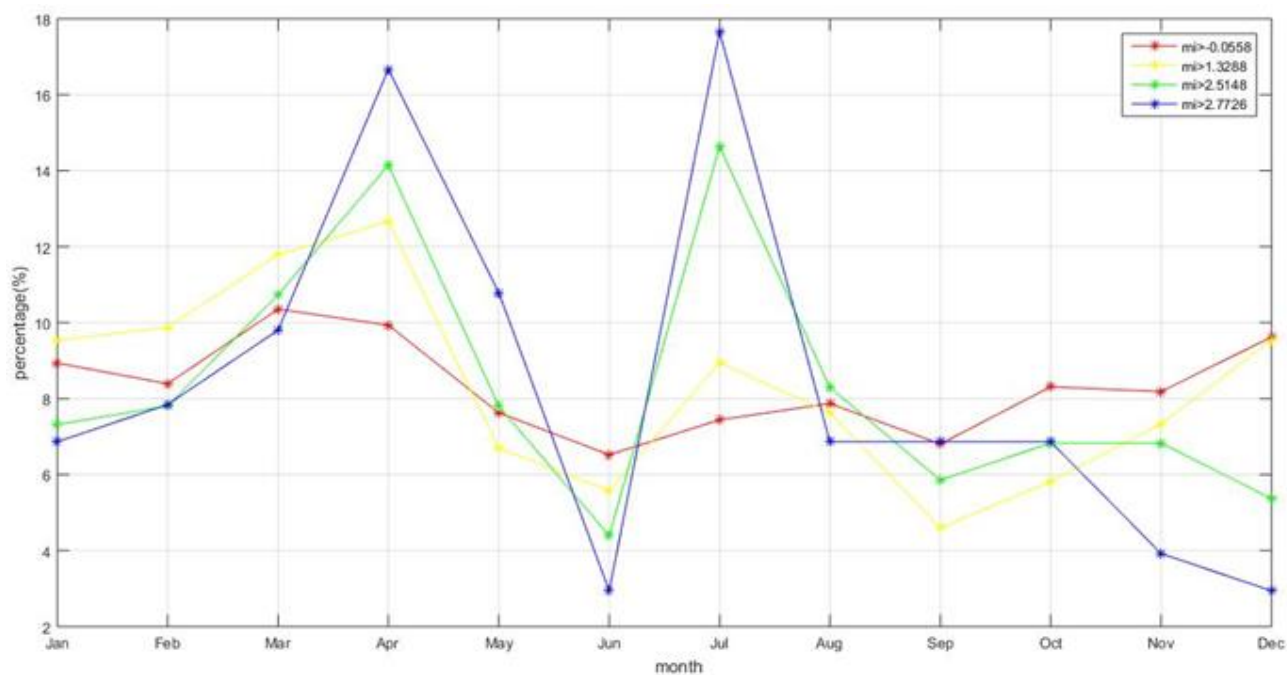
Na slikama 14. – 18. vidimo da vrlo mali postotak indeksa (0.1 %) ima vrijednost veću od 3.

Da bi odredili periode povećanih meteotsunamija unutar godine, računamo sezonski hod meteotsunami indeksa kojeg smo prethodno normalizirali, a koji su veći od danog percentila. Sezonski hod nam daje informaciju o promjeni indeksa tokom godišnjih doba u danom periodu. To radimo na način da iz niza normaliziranih indeksa pojedine simulacije određujemo postotak pojavljivanja indeksa za pojedini mjesec (1-12) koji su veći od danog percentila. Broj pojavljivanja normiramo pomoću ukupnog broja pojavljivanja u cijelom vremenskom nizu (suma svih 12 mjeseci iznosi 100%)

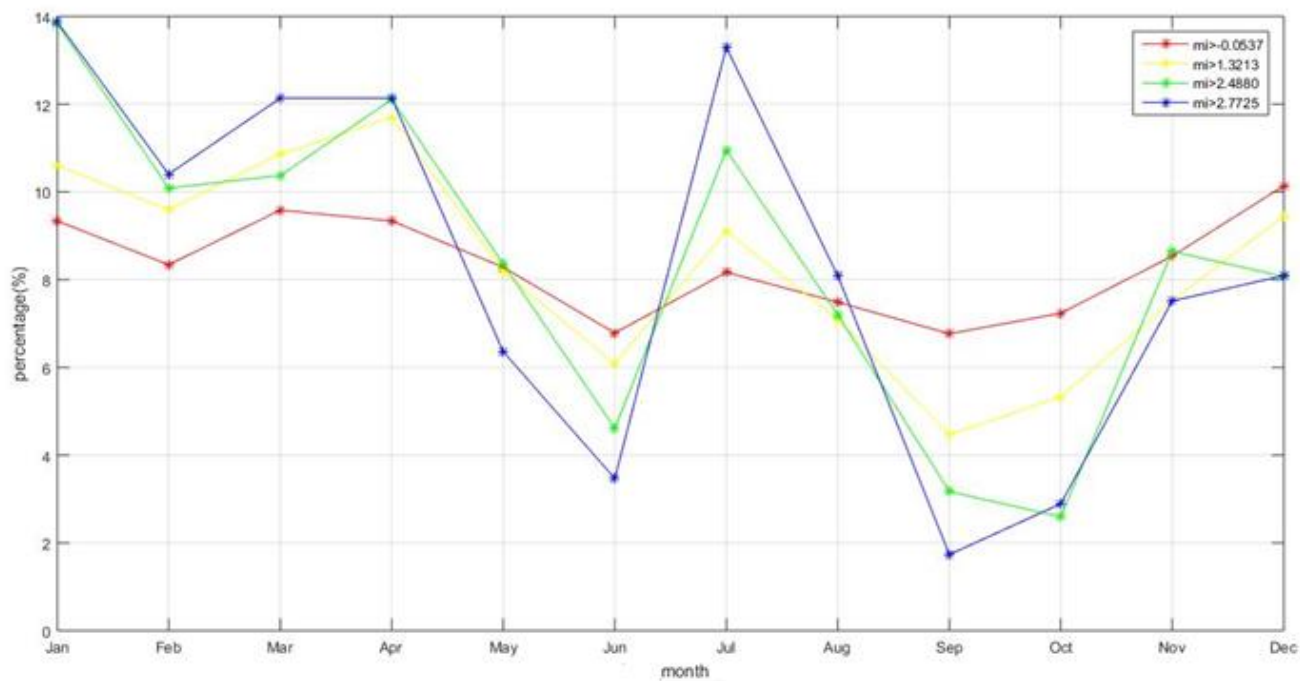
Sezonske hodove percentila smo odredili za 50, 90 99, i 99.5 percentile, za svaku simulaciju posebno. Dobiveni rezultati su prikazani na slikama 19.-23.



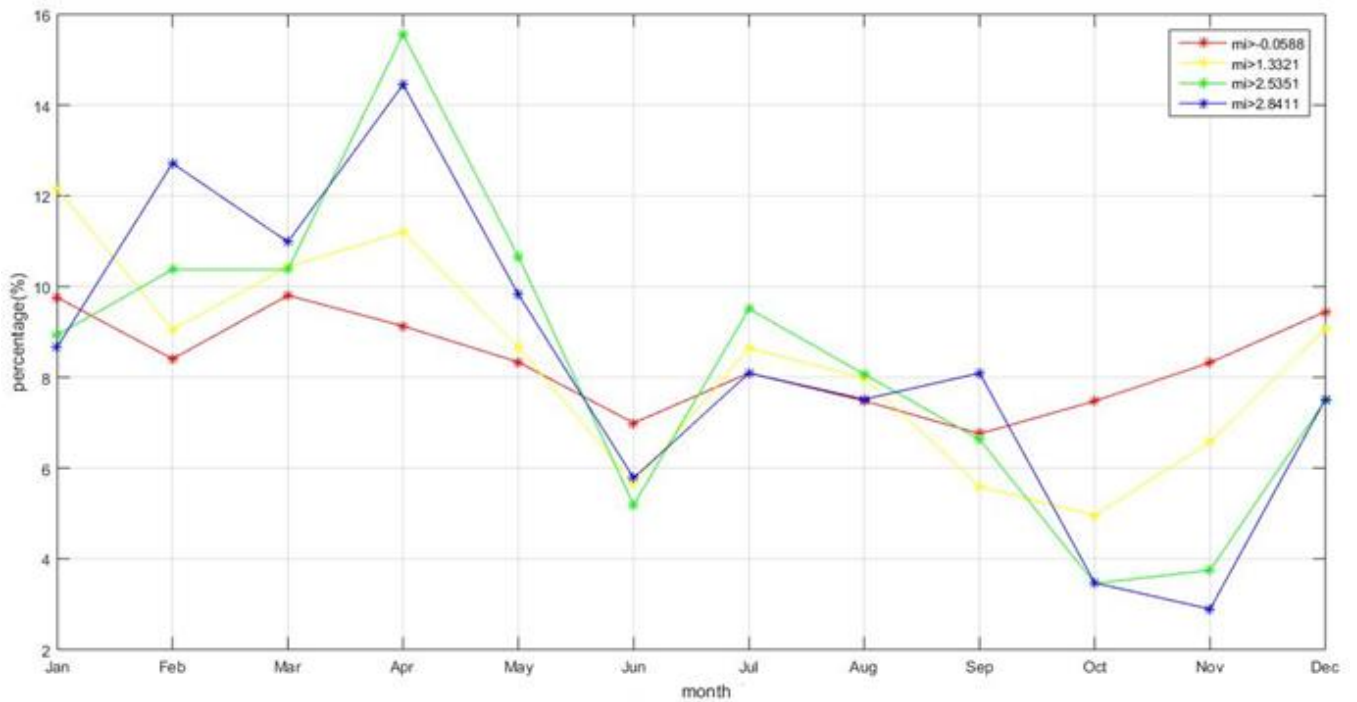
Slika 19.. Postotak pojavljivanja meteotsunami indeksa u pojedinom mjesecu većeg od 50-tog (crvena linija), 90-tog (žuta linija), 99-tog (zelena linija) i 99.5-tog percentila (plava linija) za evaluacijsku simulaciju.; *mi* označava vrijednost meteotsunami indeksa.



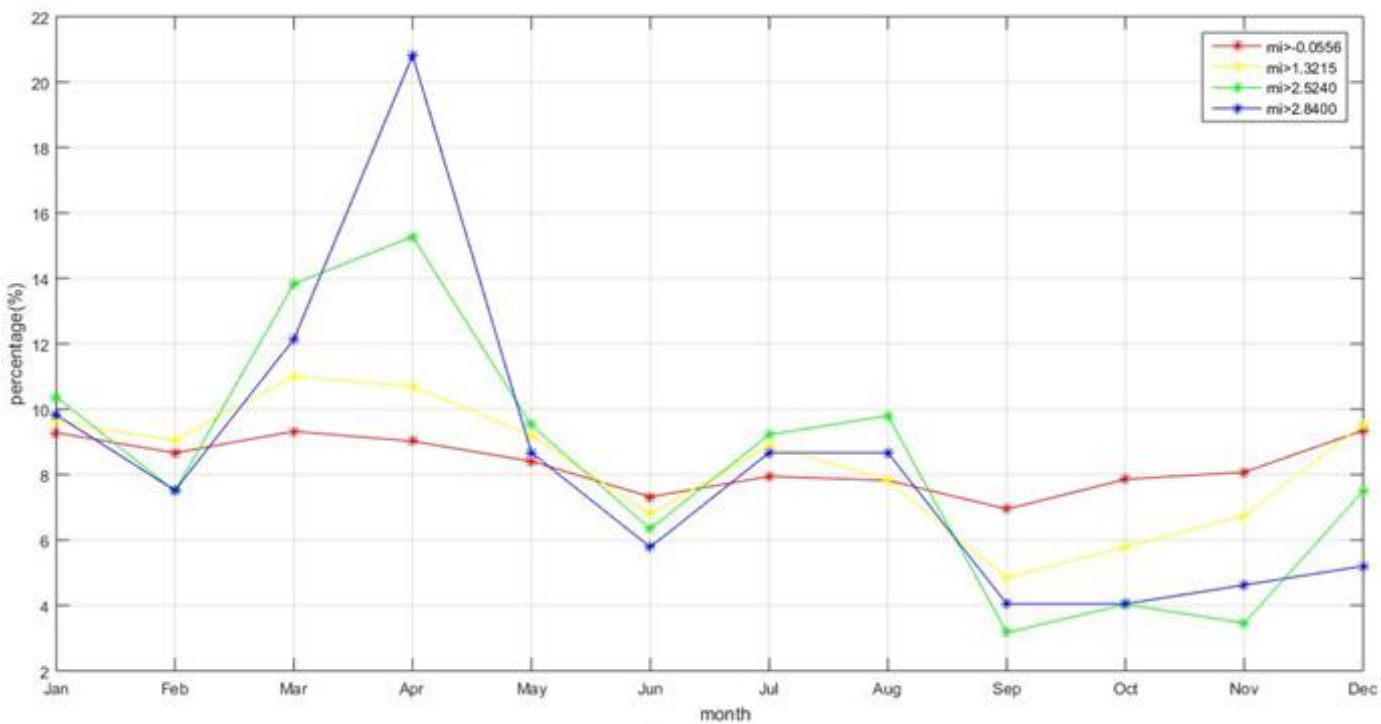
Slika 20. Postotak pojavljivanja meteotsunami indeksa u pojedinom mjesecu većeg od 50-tog (crvena linija), 90-tog (žuta linija), 99-tog (zeleno linija) i 99.5-tog percentila (plava linija) za povijesnu simulaciju; mi označava vrijednost meteotsunami indeksa.



Slika 21. Postotak pojavljivanja meteotsunami indeksa u pojedinom mjesecu većeg od 50-tog (crvena linija), 90-tog (žuta linija), 99-tog (zeleno linija) i 99.5-tog percentila (plava linija) za RCP2.6 simulaciju; mi označava vrijednost meteotsunami indeksa.



Slika 22. Postotak pojavljivanja meteotsunami indeksa u pojedinom mjesecu većeg od 50-tog (crvena linija), 90-tog (žuta linija), 99-tog (zeleno linija) i 99.5-tog percentila (plava linija) za RCP4.5 simulaciju; mi označava vrijednost meteotsunami indeksa.



Slika 23. Postotak pojavljivanja meteotsunami indeksa u pojedinom mjesecu većeg od 50-tog (crvena linija), 90-tog (žuta linija), 99-tog (zeleno linija) i 99.5-tog percentila (plava linija) za RCP8.5 simulaciju; mi označava vrijednost meteotsunami indeksa.

5.3 Trend

Gotovo sve pojave promatrane u vremenu najčešće pokazuju određene zakonitosti kretanja. Trend objašnjava kretanje promatranih pojava kroz vrijeme te na temelju uočenih pravilnosti omogućuje predviđanje daljnjih kretanja i razvoja određene pojave.

U daljnjoj analizi promatrali smo je li postoje trendovi porasta ili smanjenja određenih uvjeta u atmosferi koji uzrokuju nastanak meteoroloških tsunamija. Trendove smo procjenjivali za 50, 90, i 99 percentile za petogodišnja razdoblja. Za svako petogodišnje razdoblje normalizirane indekse smo grupirali po mjesecima. Primjerice, vrijednosti indeksa za mjesec siječanj smo grupirali za razdoblje od 1950. do 1954. godine, zatim za veljaču, i tako redom za sve mjesece u periodu od pet godina. Zatim smo računali vrijednosti normaliziranih indeksa za pojedini percentil. Postupak smo ponovili za sva petogodišnja razdoblja u pojedinoj simulaciji, te za sve simulacije.

Trend smo računali pomoću metode najmanjih kvadrata prema sljedećoj jednadžbi:

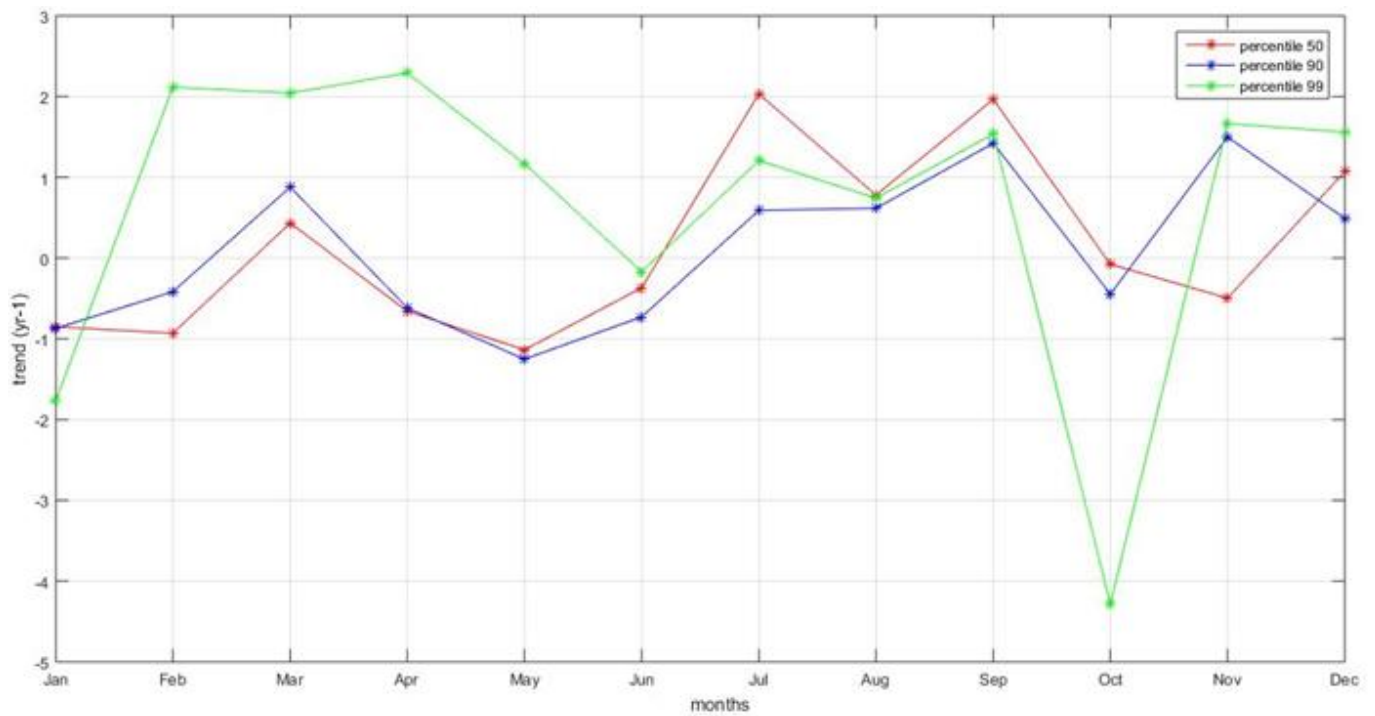
$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum xx - \sum x \sum x} \quad (7.)$$

gdje x predstavlja vrijeme, y petogodišnje iznose određenog percentila, a n broj parova.

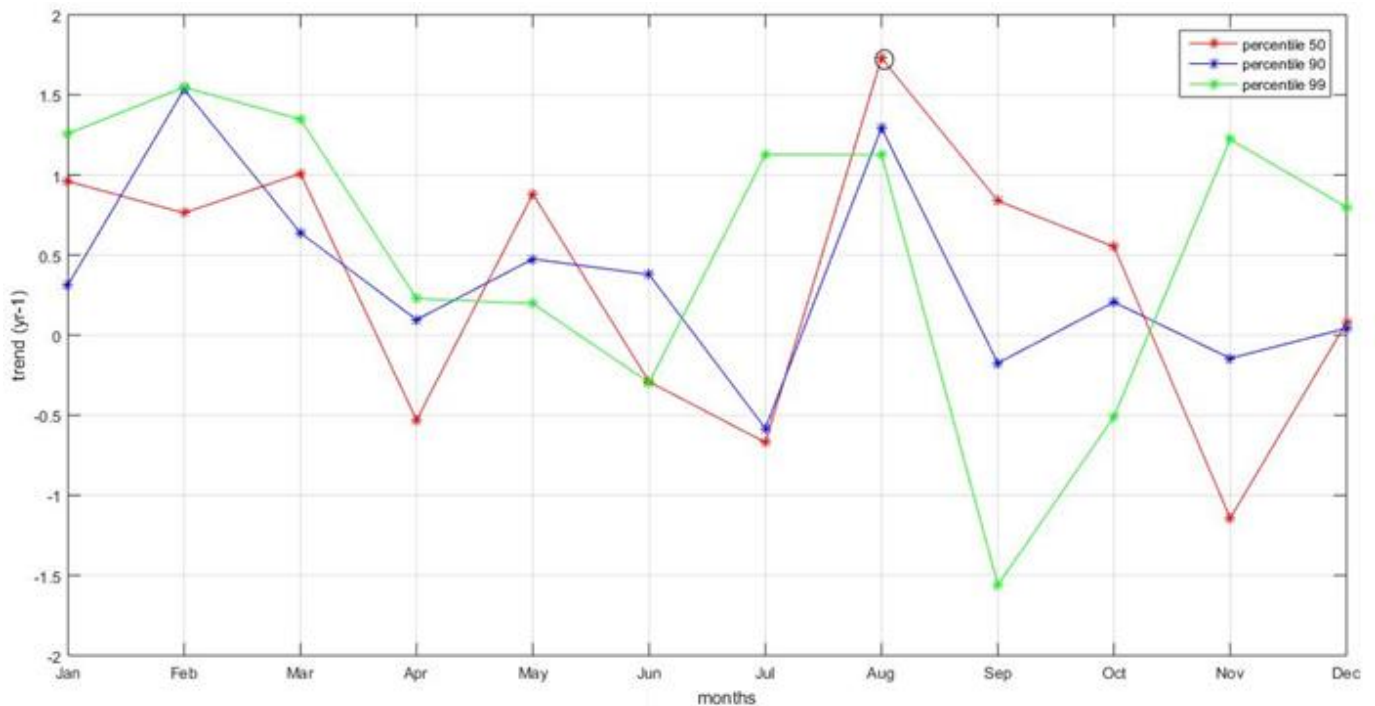
Značajnosti trendova percentila smo odredili pomoću Man-Kendall neparametriziranog testa za procjenu trendova, uz zadani prag značajnosti $p = 0.05$ (interval značajnosti je 95%).

Man-Kendall test se koristi za analizu nekog vremenskog niza podataka u svrhu procjene značajnosti porasta ili smanjenja trenda (monotoni trend) [27]. Ako monotoni trend raste, znači da se vrijednosti niza povećavaju porastom vremena. Trend može, ali i ne mora biti linearan. Man-Kendallov test je neparametarski što znači da se može primijeniti na sve tipove distribucija. Što je veći broj podataka u analizi, veća je vjerojatnost da će trend biti značajan. Test se temelji na dvije hipoteze: nulta i alternativna hipoteza. Nulta hipoteza negira postojanje trenda, tj. podaci ili opažanja dobiveni tijekom vremena su međusobno neovisni (nisu korelirani) te prate slične distribucije. Alternativna hipoteza potvrđuje postojanje monotonog trenda. Prema osnovnoj pretpostavci testa, nulta hipoteza je točna, a nakon analize nulta hipoteza se prihvaća ili odbacuje.

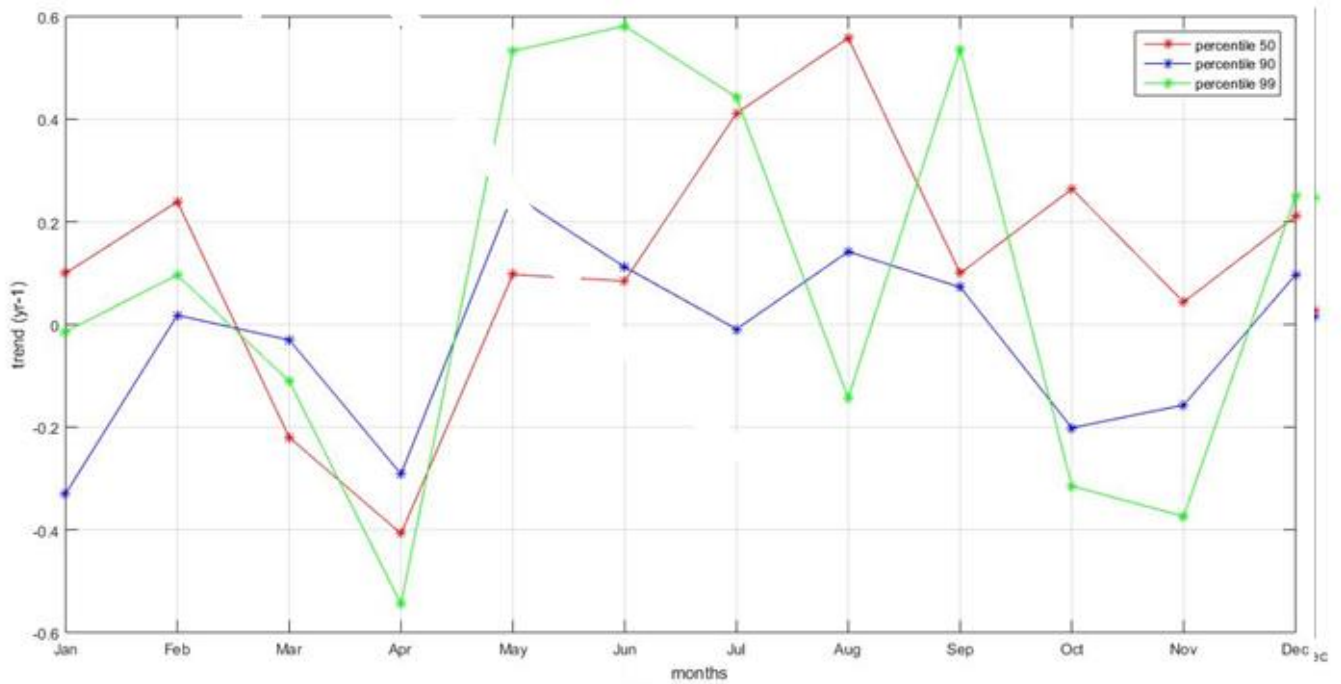
Petogodišnji trendovi 50, 90 i 99-tog percentila su prikazani na slikama 25.-29. Značajni trendovi su označeni kužićem. Trend smatramo značajnim ako je njegova p -vrijednost manja od 0.05 (95% stopa značajnosti).



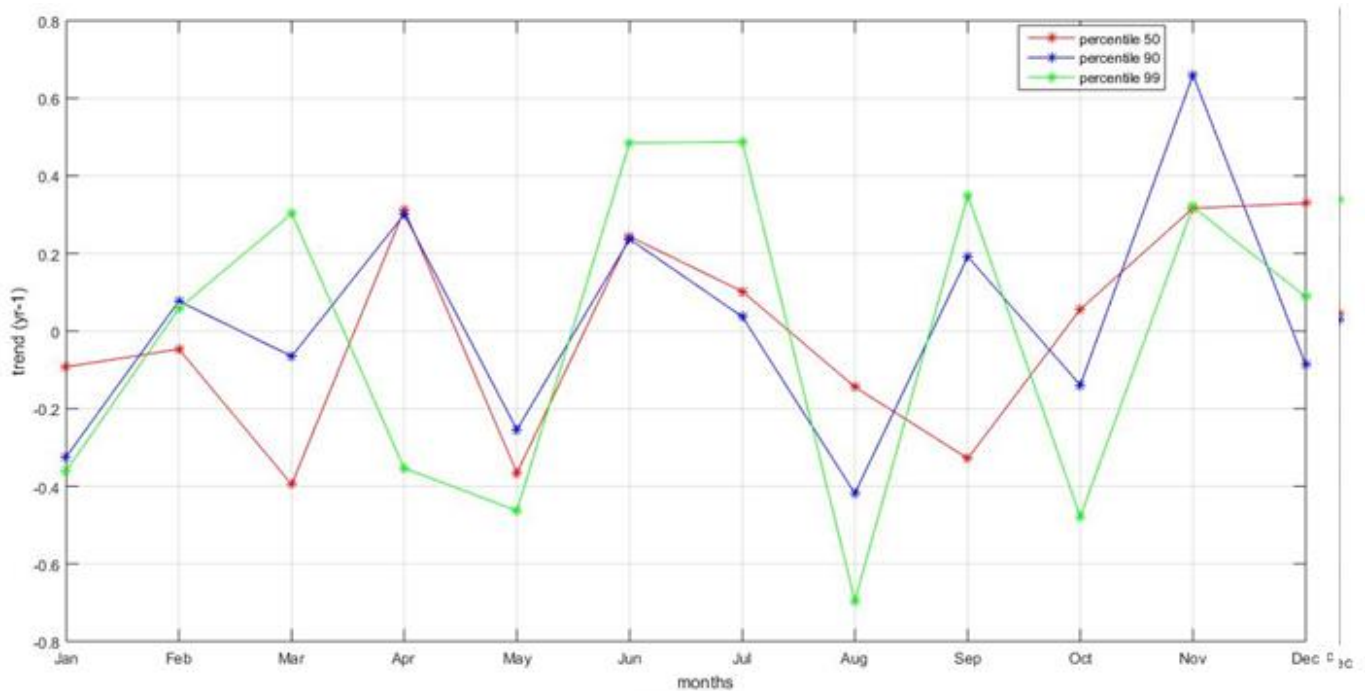
Slika 25. Petogodišnji trendovi 50-tog (crvena linija), 90-tog (plava linija) i 99-tog percentila (zelena linija) za evaluacijsku simulaciju. Značajnost trenda na 95% (ukoliko postoji) je označena kružićem.



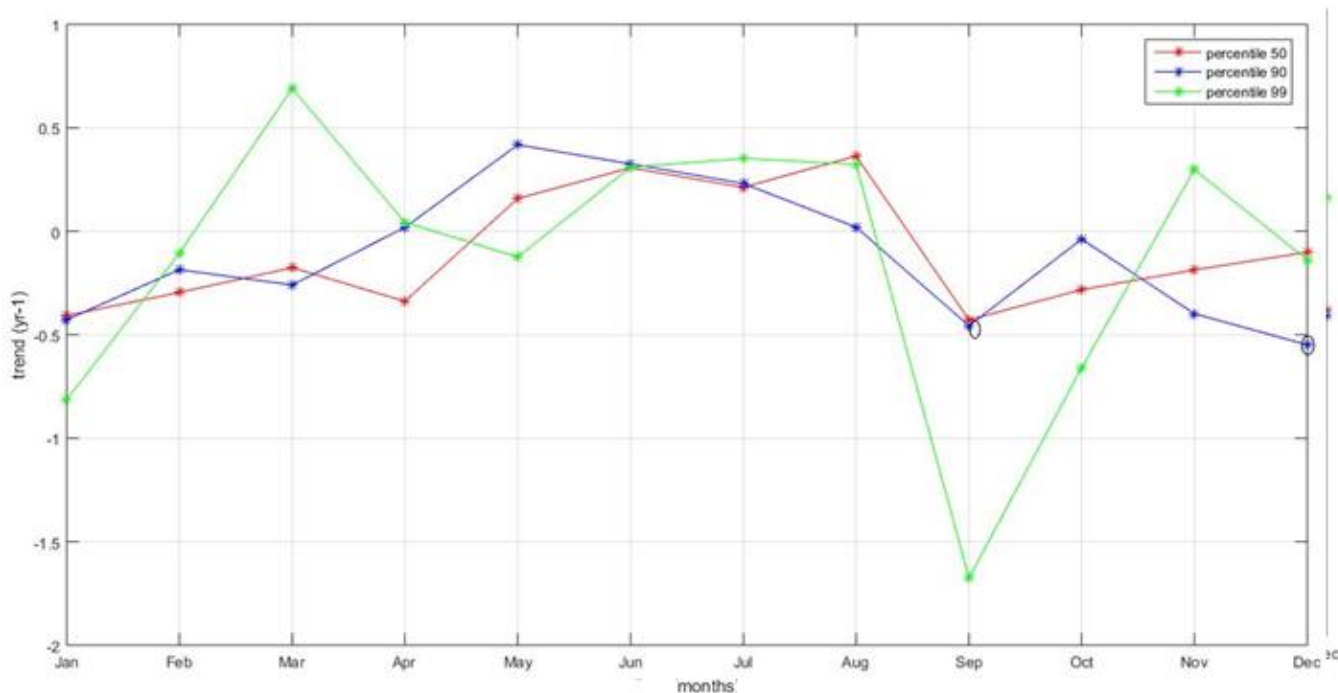
Slika 26. Petogodišnji trendovi 50-tog (crvena linija), 90-tog (plava linija) i 99-tog percentila (zelena linija) za povijesnu simulaciju. Značajnost trenda na 95% (ukoliko postoji) je označena kružićem.



Slika 27. Petogodišnji trendovi 50-tog (crvena linija), 90-tog (plava linija) i 99-tog percentila (zeleno linija) za RCP2.6 simulaciju. Značajnost trenda na 95% (ukoliko postoji) je označena kružićem.



Slika 28. Petogodišnji trendovi 50-tog (crvena linija), 90-tog (plava linija) i 99-tog percentila (zeleno linija) za RCP4.5 simulaciju. Značajnost trenda na 95% (ukoliko postoji) je označena kružićem.



Slika 29. Petogodišnji trendovi 50-tog (crvena linija), 90-tog (plava linija) i 99-tog percentila (zelena linija) za RCP8.5 simulaciju. Značajnost trenda na 95% (ukoliko postoji) je označena kružićem.

6. RASPRAVA

Razvoj i nastanak meteorološkog tsunamija je povezan s određenim sinoptičkim stanjem u atmosferi. Meteorološki parametri koji pogoduju razvoju ovog fenomena su: relativna vlažnost zraka, tlak na površini mora, brzina vjetra i temperatura. Te parametre smo koristili u konstrukciji meteotsunami indeksa. Indeksi smo procijenili za povijesnu i evaluacijsku simulaciju, te za tri moguća RCP scenarija koji uključuju određene trendove stakleničkih plinova (RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5) temeljenim na IPCC izvještajima.

Indekse smo normalizirali, te odredili 50, 90, 99 i 99.5 percentil kako bismo odredili postotak pojave visokih meteotsunami indeksa. Da bi procijenili ponašanje meteotsunami indeksa po godišnjim dobima, određivali smo sezonske hodove indeksa koji su veći od danih percentila.

Evaluacijska simulacija (slika 19.) rezultira pojavom vrlo visokih meteotsunami indeksa ($m_i(\text{meteotsunami indeks}) > 2.7$, 99.5 percentil) u ljetnim mjesecima, s najvećim zabilježenim brojem pojavljivanja u srpnju (skoro 20% pojava). Najmanji postotak pojavljivanja visokih indeksa, tj. niža vjerojatnost pojavljivanja snažnijih meteotsunamija zabilježen je u rujnu, listopadu i siječnju (< 5% pojava). Za 50 percentil meteotsunami indeks je vrlo nizak ($m_i > 0.09$) s vjerojatnošću pojavljivanja snažnih meteotsunamija oko 8% za cijelu godinu. Za

percentil 90 ($m_i > 1.36$) najveći postotak pojavljivanja snažnijih meteotsunamija je u srpnju (oko 12% pojava), dok je najniži postotak u rujnu i listopadu (<5% pojava). Za percentil 99 ($m_i > 2.51$) veća vjerojatnost pojavljivanja snažnijih meteotsunamija zabilježena je u srpnju (14% pojava), dok je najniža vjerojatnost zabilježena u rujnu i siječnju (<4% pojava).

Povijesna simulacija (slika 20.) simulira najveći broj pojava najsnažnijih meteotsunamija ($m_i > 2.7$, 99.5 percentil) u travnju i srpnju (17-18% pojava) dok je najmanji postotak zabilježen u lipnju, te u studenom i prosincu (< 4% pojava). Za percentil 50 ($m_i > 0.05$) vjerojatnost pojave meteotsunamija je 7-10% za cijelu godinu. Za percentil 90 ($m_i > 1.3$) najveći postotak pojavljivanja snažnijih meteotsunamija je travnju (oko 12% pojava) dok je najniži postotak zabilježen u lipnju i rujnu (< 6% pojava). Za percentil 99 ($m_i > 2.5$). Najveći broj pojava snažnijih meteotsunamija je u travnju i srpnju (14% pojava) dok je najniži broj pojava zabilježen u lipnju i rujnu (< 6% pojava).

Budući da evaluacijska i povijesna simulacija obuhvaća razdoblje od 1979. do 2012. godine, te od 1950. do 2005. godine, respektivno, možemo usporediti učestalost pojavljivanja visokih indeksa (jači meteotsunamiji) po mjesecima sa stvarnim meteotsunami događajima na Balearskom području (slika 4.). Najveći broj meteoroloških tsunamija je zabilježen tijekom ljetnih mjeseci što se preklapa s dobivenim rezultatima (slika 19. i Slika 20.).

Ponašanje indeksa u budućim projekcijama se uvelike razlikuje od rezultata dobivenim u dvjema prethodnim simulacijama. RCP2.6 scenarij predviđa najučestaliju pojavu snažnijih meteotsunamija ($m_i > 2.7$, 99.5 percentil) u siječnju, ožujku, travnju, te srpnju (iznad 12% pojava), dok je najmanji postotak pojava zabilježen u lipnju i rujnu (< 4% pojava). Za percentil 50 ($m_i > 0.06$) vjerojatnost pojave meteotsunamija je od 8-10% za cijelu godinu. Za percentile 90 i 99 najveći postotak snažnijih meteotsunamija se u travnju (oko 12% pojava), dok je najniži postotak zabilježen za rujnu i listopad (<5% pojava).

Prema RCP4.5 i RCP8.5 scenarijima, postotak visokih indeksa u ljetnim mjesecima je vrlo nizak u odnosu na ostale simulacije. Najveći postotak visokih indeksa ($m_i > 2.8$, 99.5 percentil) zabilježen je u travnju (iznad 14% i 20% pojava za RCP4.5 i RCP8.5, respektivno), dok je najmanji postotak visokih indeksa zabilježen u zimskim mjesecima što je sukladno ostalim simulacijama.

Jedini značajani i to negativni trendovi su zabilježeni u RCP8.5 scenariju u rujnu i prosincu.

7. ZAKLJUČAK

Meteorološki tsunami je fenomen koji nastaje preklapanjem točno određenih uvjeta u atmosferi i oceanu. Težinski val iznad površine mora treba se kretati prema zaljevu. Sljedeći uvjet koji se mora zadovoljiti je postizanje Proudmanove rezonance što znači da se fazne brzine vala u moru te težinskog vala moraju preklopiti. Zatim se treba postići obalna rezonanca što znači da period seša mora biti vrlo blizak periodu vala. Za potrebe ovog rada, konstruirali smo meteotsunami indekse za prošlu (povijesnu i evaluacijsku simulaciju) i buduću klimu (RCP scenariji) koji nam služe da procijenimo ponašanje meteotsunami događaja. Pri tome smo koristili meteorološke parametre koji pogoduju razvoju i nastanku meteotsunamija na Balearskom otočju: vertikalna razlika brzine vjetra na 500 i 1000 hPa, horizontalna razlika tlaka na morskoj razini, vertikalna razlika temperature, relativna vlažnost zraka te horizontalna geopotencijalna razlika.

Najveći postotak visokih indeksa, tj. učestaliju pojavu jačih meteotsunamija, u prošlosti dobiven je za ljetno, a najniži za zimsko razdoblje. Dobiveni rezultat se podudara sa stvarnom situacijom, budući da je najveći broj meteotsunami događaja na Balearskom otočju zabilježen upravo tijekom ljetnih mjeseci [42].

Budućnost meteotsunamija je nešto drugačija. Učestalija pojava meteotsunamija bilježi se u travnju, dok je za ljetno razdoblje postotak pojavljivanja znatno niži u odnosu na prošlu klimu. Jedini značajan negativan trend je zabilježen u RCP8.5 scenariju.

Za što preciznije predviđanje meteotsunami događaja u budućnosti, osim meteoroloških parametara koje smo koristili u ovom radu, trebalo bi uzeti u obzir i parametre iz mora: period seša i period zaljeva, amplitude valova itd., budući da ovaj fenomen nastaje preklapanjem točno određenih uvjeta u atmosferi i oceanu: preklapanjem seša i težinskog vala, Proudmanove rezonancije te obalne rezonancije. Prednost konstrukcije meteotsunami indeksa je da se oni mogu primijeniti za bilo koje područje koje se odlikuje sličnim stanjem atmosfere kao i Balearsko otočje. Nadalje, meteotsunami indeksi se na sličan način mogu konstruirati za bilo koje područje na Zemlji koristeći sljedeće sinoptičke varijable: relativna vlažnost zraka na 500 hPa, tlak zraka na površini mora, brzina vjetra na 1000 hPa, brzina vjetra na 550 hPa, temperatura na 850 hPa, temperatura na 925 hPa te geopotencijal na 500 hPa. Konstrukcija meteotsunami indeksa opisana je u poglavlju 2.4.

8. LITERATURA

1. Šepić, J., Vilibić, I., Lafon, A., Macheboeuf, L., Ivanović, Z., 2015. High-frequency sea level oscillations in the Mediterranean and their connection to synoptic patterns. *Progress in Oceanography*, 137, 284-298.
2. Šepić, J., Vilibić, I., Monserrat, S., 2016. Quantifying the probability of meteotsunami occurrence from synoptic atmospheric patterns. *Geophysical Research Letters*, 49, 10377-10384, doi: 10.1002/2016GL070754
3. Monserrat, S., Vilibić, I., Rabinovich, A.B., 2006. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 1035-1051.
4. Morske mjene i razine Jadrana online, *Prikaz morskih mijena i razine hrvatskog dijela jadranskog mora na web-u te izrada odgovarajućih baza podataka*, Hrvatski hidrografski institut, <http://www.hhi.hr/projects/viewproject/11>, rujan 2018.
5. Stojni valovi, *Hrvatska enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, rujan 2018.
6. Marković, Đ., Meteotsunami, 05.12.2011., Meteo-info, <http://blog.meteo-info.hr/meteorologija/meteotsunami/>, rujan 2018.
7. Marković, Đ., Nastajanje meteotsunamija, 05.12.2011., Meteo-info, <http://blog.meteo-info.hr/meteorologija/nastajanje-meteotsunamija/>, rujan 2018.
8. Šepić, J., Orlić, M., Meteorological tsunami, *The first attempt at cataloguing tsunami-like waves of meteorological origin in Croatian coastal waters*, Institut za oceanografiju i ribarstvo, http://jadran.izor.hr/~sepic/meteotsunami_catalogue/, rujan 2018.
9. O projektu, *Mikrobarografska mjerenja*, Institut za oceanografiju i ribarstvo, <http://jadran.izor.hr/barograf/>, rujan 2018.
10. Oblaci, *Hrvatska enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, rujan 2018.
11. Branković, Č., Klima i klimatske promjene, 2013.-2014., Matematičko-fizički list, <https://bib.irb.hr/datoteka/696272.brankovic.pdf>, rujan 2018
12. Climate modeling, UCAR, <https://scied.ucar.edu/longcontent/climate-modeling>, rujan 2018.

13. Jancovici, J.M, What is a climate model? What are the model`s first conclusion?, 08.01.2007., <https://jancovici.com/en/climate-change/predicting-the-future/what-is-a-climate-model-what-are-the-models-first-conclusions/>, rujan 2018.
14. IPCC special report emission scenarios, 2000., Intergovernmental panel on climate change, <https://ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, rujan 2018.
15. The physics of tsunamis, Earthweb, <https://earthweb.ess.washington.edu/tsunami/general/physics/physics.html>, rujan 2018.
16. Numerical weather prediction, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_weather_prediction, rujan 2018.
17. Aladin and Arome models, OMSZ, <http://www.met.hu/en/omsz/tevekenysegek/idojarasmodellezes/modellek/>, rujan 2018.
18. What is regional downscaling, WCRP CORDEX, <http://www.cordex.org/about-cordex/what-is-regional-downscaling.html>, rujan 2018.
19. Ruti, P., Somot, S., Med-Cordex initiative for Mediterranean climate studies, rujan 2015., ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/281813167_MED-CORDEX_initiative_for_Mediterranean_Climate_studies, rujan 2018.
20. What is downscaling?, ožujak 2016., Californian Landscape Conservation Partnership, <http://climate.calcommons.org/article/downscaling>, rujan 2018.
21. What is downscaling?, *Climate change scenarios*, GISprogram, <https://gisclimatechange.ucar.edu/question/63>, rujan 2018.
22. Med-Cordex, medcordex, <https://www.medcordex.eu/index.php/>, rujan 2018.
23. CLM-community, Climate Limited Area Modelling Community, <http://www.clm-community.eu/>, rujan 2018.
24. Wikipedia, Representative concentration pathways, https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathways, rujan 2018.
25. Percentil, *Hrvatska enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=47528> , rujan 2018.
26. Kvantili, kvartili, decili i percentili, 11.12.2011., *Statistika u društvenim naukama*, e-statistika, <http://www.e-statistika.rs/Article/Display/kvantili-kvartili-decili-i-percentili>, rujan 2018.
27. Man Kendall test for monotonic trend, Pacific northwest national Laboratory, https://vsp.pnnl.gov/help/vsample/Design_Trend_Mann_Kendall.htm, rujan 2018.

28. Slobodne oscilacije-seši, Mala internet škola oceanografije,
http://skola.gfz.hr/d1_4.htm, rujan 2018.
29. Praćenje klime, DHMZ,
http://meteo.hr/klima.php?section=klima_modeli¶m=klima_promjene#sec7,
 rujan 2018.
30. Faktor dobrote, *Hrvatska enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=70495>, rujan 2018.
31. Young C. Kim, Handbook of Coastal and Ocean Engineering, 2009.,
https://books.google.hr/books/about/Handbook_of_Coastal_and_Ocean_Engineerin.html?id=jJkDQAAQBAJ&source=kp_cover&redir_esc=y, rujan 2018.
32. Richards, S., Spain, Balearics: Meteotsunami (rissaga) floods islands of Mallorca and Menorca, 19.07.2018, Noonsite.com,
<https://www.noonsite.com/Countries/Spain/spain-mallorca-meteotsunami-rissaga-flooding-chaos>, rujan 2018.
33. Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R.; Vuuren, D.; Weyant, J.; Wilbanks, T.; Ypersele, J.P & Zurek, M., 2008, Geneva; Towards New Scenarios for Analysis of Emission, Climate Change, Impacts, and Response Strategies: Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 132.,
<https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf> , rujan 2018.
34. How does a climate model Work?, Climate change in Australia,
<https://www.climatechangeinaustralia.gov.au/en/climate-campus/modelling-and-projections/climate-models/theory-and-physics/>, rujan 2018.
35. Trambly, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R., Servat, E., 2013. High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 37213739, <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/3721/2013/hess-17-3721-2013.pdf>,

36. Yong Wang, Aladin-Laef domain and topography, https://www.researchgate.net/figure/ALADIN-LAEF-domain-and-model-topography_fig4_249621676, rujan 2018.
37. Aladin Climate, National Centre for Meteorological research, <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125&lang=en>, rujan 2018.
38. Dataset edition, MISTRALS database, http://mistrals.sedoo.fr/?editDatsId=726&datsId=726&project_name=HyMeX, rujan 2018.
39. Dataset edition, MISTRALS database, http://mistrals.sedoo.fr/?editDatsId=939&datsId=939&project_name=HyMeX, rujan 2018.
40. Dataset edition, MISTRALS database, http://mistrals.sedoo.fr/?editDatsId=938&datsId=938&project_name=HyMeX, rujan 2018.
41. Dataset edition, MISTRALS database, http://mistrals.sedoo.fr/?editDatsId=942&datsId=942&project_name=HyMeX, rujan 2018.
42. Šepić, J., Vilibić, I., Monserrat, S., 2009. Teleconnections between the Adriatic and the Balearic meteotsunamis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 928-937.