

Varijabilnost razine Jadranskog i Sredozemnog mora u razdoblju od 1987. do 2020. godine

Pilić, Pave

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:166:578354>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**VARIJABILNOST RAZINE JADRANSKOG I
SREDOZEMNOG MORA U RAZDOBLJU OD
1987. DO 2020. GODINE**

Pave Pilić

Split, rujan 2022.

Temeljna dokumentacijska kartica

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

Diplomski rad

VARIJABILNOST RAZINE JADRANSKOG I SREDOZEMNOG MORA U RAZDOBLJU OD 1987. DO 2020. GODINE

Pave Pilić

Promjena razine mora prouzrokovana globalnim zatopljenjem bilježi se na većini mjernih postaja u svijetu, pa tako i na području Sredozemnog mora. Uz globalne efekte, također su prisutni i regionalni i lokalni fenomeni koji utječu na razinu mora u periodima različitih duljina trajanja. U ovom radu istražene su promjene razine mora u posljednjih nekoliko desetljeća na Jadranskom i Sredozemnom moru koristeći podatke mjernih postaja i reanalize Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis. Za postaje na Jadranskom moru uspoređeni su nizovi mjerenih i modeliranih podataka, te je potvrđena zadovoljavajuća razina točnosti modela. Model je potom iskorišten za određivanje trenda, godišnjeg hoda i dekadskih promjena razine mora na cijelom Sredozemlju. U zaključnom dijelu objašnjene su uzročno-posljedične veze dobivenih rezultata, povezanost različitih područja Sredozemlja te mjerenih parametara koji utječu na razinu mora.

Ključne riječi:

srednja razina, jadransko more, sredozemno more, godišnji hod, dekadске promjene, trend, režimi, cirkulacija, vrtlozi

Rad sadrži: 56 stranica, 33 grafičkih prikaza, 7 tablica i 24 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku.

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

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić

doc. dr. sc. Žarko Kovač

doc. dr. sc. Frano Matić

Rad prihvaćen: 13. rujna 2022.

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

Basic documentation card

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

Master Thesis

SEA LEVEL VARIABILITY OF THE ADRIATIC AND THE MEDITERRANEAN SEAS DURING 1987 TO 2020

Pave Pilić

The change in sea level caused by global warming is recorded at most measuring stations in the world, including in the area of the Mediterranean Sea. In addition to global effects, there are also regional and local phenomena that affect the sea level in periods of different lengths of time. In this paper, sea level changes in the last few decades in the Adriatic and Mediterranean seas were analyzed using data from measuring stations and the Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis system. For stations on the Adriatic Sea, series of measured and modeled data were compared, and a satisfactory level of model accuracy was confirmed. The model was then used to determine the trend, annual and decadal sea level changes in the entire Mediterranean. In the concluding part, the cause-and-effect relationships of the obtained results, the connection between different areas of the Mediterranean and the measured parameters that affect the sea level are explained.

Keywords:

mean sea level, Adriatic, Mediterranean, annual cycle, decadal changes, trend, regimes, circulation, eddies

Thesis consists of: 56 pages, 33 figures, 7 tables and 24 references, original in: Croatian.

Mentor: Assoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić

Reviewers: Assoc. Prof. Dr. Jadranka Šepić

Assist. Prof. Dr. Žarko Kovač

Assist. Prof. Dr. Frano Matic

Thesis accepted: September 13th 2022

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

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Materijali i metode	3
1.1. Podaci	3
1.2. Metodologija	4
1.2.1. Srednja razina mora, standardna devijacija i trend	4
1.2.2. Indeks promjene režima	5
1.2.3. Koeficijent korelacije	6
1.2.4. Korijska srednja kvadratna pogreška	7
1.2.5. Pristranost.....	7
1.2.6. Klizna varijanca	8
2. Analiza mjerenih vremenskih nizova	9
2.1. Kretanje razine mora: promjene klimatskih režima i trendovi	9
2.2. Godišnji hod razine mora.....	12
3. Analiza modeliranih vremenskih nizova	16
3.1. Kretanje razine mora: promjene klimatskih režima i trendovi	16
3.2. Godišnji hod razine mora.....	16
4. Usporedba mjerenih i modeliranih nizova razine mora	21
4.1. Mjereni i modelirani nizovi.....	22
4.2. Klizna desetgodišnja razdoblja.....	25
4.3. Trendovi, signal i promjene klimatskih režima.....	28
5. Poopćenje analize na Sredozemno more	31
5.1. Trend razine mora.....	31
5.2. Godišnji hod srednje razine Sredozemnog mora.....	34
5.3. Promjene klimatskih režima.....	37

5.3.1.	Utjecaj promjene režima 1998. godine na razinu Sredozemnog mora	40
5.3.2.	Utjecaj promjene režima 2003. godine na razinu Sredozemnog mora	42
5.3.3.	Utjecaj promjene režima 2008. godine na razinu Sredozemnog mora	44
6.	Diskusija i zaključci	46
	Literatura	52
	Prilog	55

Uvod

Jadransko more dio je Sredozemnog mora i nalazi se između Apeninskog i Balkanskog poluotoka. Njegova površina je 138.595 četvornih kilometara, dužina 870 kilometara, prosječna širina 159,3 kilometara i dubina 173 metra. Jadransko more je relativno zatvoreno more, povezano Jonskim morem sa Sredozemljem. Južna granica je Otrantski tjesnac, koji se nalazi između Italije i Albanije, i koji je širok 75 kilometara [1].

Sredozemno more unutar je more Atlantskog oceana, okruženo Europom, Azijom i Afrikom. Obuhvaća površinu od 2.51 milijuna kvadratnih kilometara. S Atlantskim oceanom je povezano Gibraltarskim vratima, a s Crvenim morem Sueskim kanalom. Sastoji se od istočnog i zapadnog bazena. U zapadnom bazenu nalaze se Alboransko, Balearsko, Ligursko i Tirensko more, a u istočnom Jadransko, Jonsko, Egejsko, Mramorno, Crno i Levantsko more [2]. Prosječna dubina mora je 1500 metara, najveća širina (smjer sjever-jug) oko 1500 kilometara, a najveća duljina (smjer istok-zapad) oko 3700 kilometara.

Promjena razine mora prouzrokovana globalnim zatopljenjem bilježi se na većini mjernih postaja u svijetu, pa tako i na ovom području [3]. Uz globalne efekte, također su prisutni i regionalni i lokalni fenomeni koji utječu na razinu mora.

U ovom radu sam istraživao promjenu razine mora u posljednjih nekoliko desetljeća na Jadranskom moru koristeći mjesečne srednjake najdužih dostupnih kontinuiranih mjerenja razine mora te mjesečne srednjake dobivene numeričkim modelom. U **poglavlju 1** opisani su korišteni podaci i metodologija analize. Fokusirao sam se na procjenu trenda te procjenu sezonalnih i višegodišnjih fluktuacija razine mora. U **poglavlju 2 i 3** analizirani su mjereni i modelirani vremenski nizovi, te su za svaki niz predstavljeni rezultati analize trenda, promjene klimatskih režima i godišnjeg hoda razine mora.

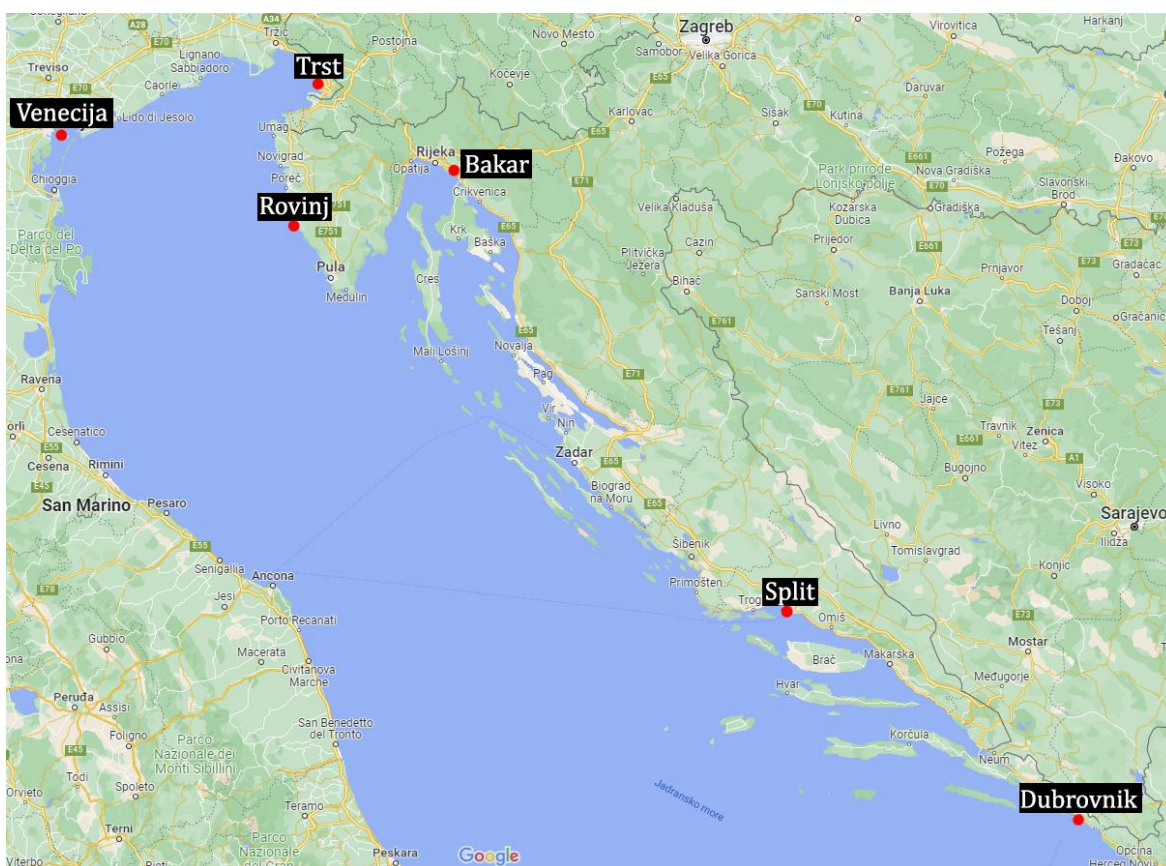
Dobivene rezultate i mjerenja u **poglavlju 4** usporedio sam s modeliranom razinom Jadranskog mora sustava Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis. Model je pokazao zadovoljavajuću razinu točnosti te sam ga u **poglavlju 5** iskoristio za računanje trenda razine mora na cijelom Sredozemlju. Za sve točke modela izračunat je trend, te minimumi i maksimumi godišnjeg hoda i mjeseci u kojima se oni pojavljuju. Analizom promjene režima određene su godine nakon kojih je uslijedila značajna promjena razine

mora te je srednja razina mora u svim godinama uspoređena s godinama u kojima je došlo do najveće promjene režima razine mora. U **poglavlju 6** uslijedila je diskusija u kojoj su analizirani mogući uzroci uzlaznog i silaznog trenda na različitim područjima Sredozemnog mora, te uzroci godišnjeg kretanja, promjena režima te posljedice koje su uočene promjene izazvale.

1. Materijali i metode

1.1. Podaci

Mjesečne vrijednosti srednje razine mora preuzeo sam iz arhive globalne baze podataka PSMSL [4]. Za Jadransko more koristio sam mjerenja razine mora u Trstu, Veneciji, Bakru, Rovinju, Splitu i Dubrovniku. Za sve navedene postaje obrađeni su podaci mjerenja u razdoblju od siječnja 1987. do prosinca 2018. godine. Položaj svih mjernih postaja prikazan je na **Slici 1**.

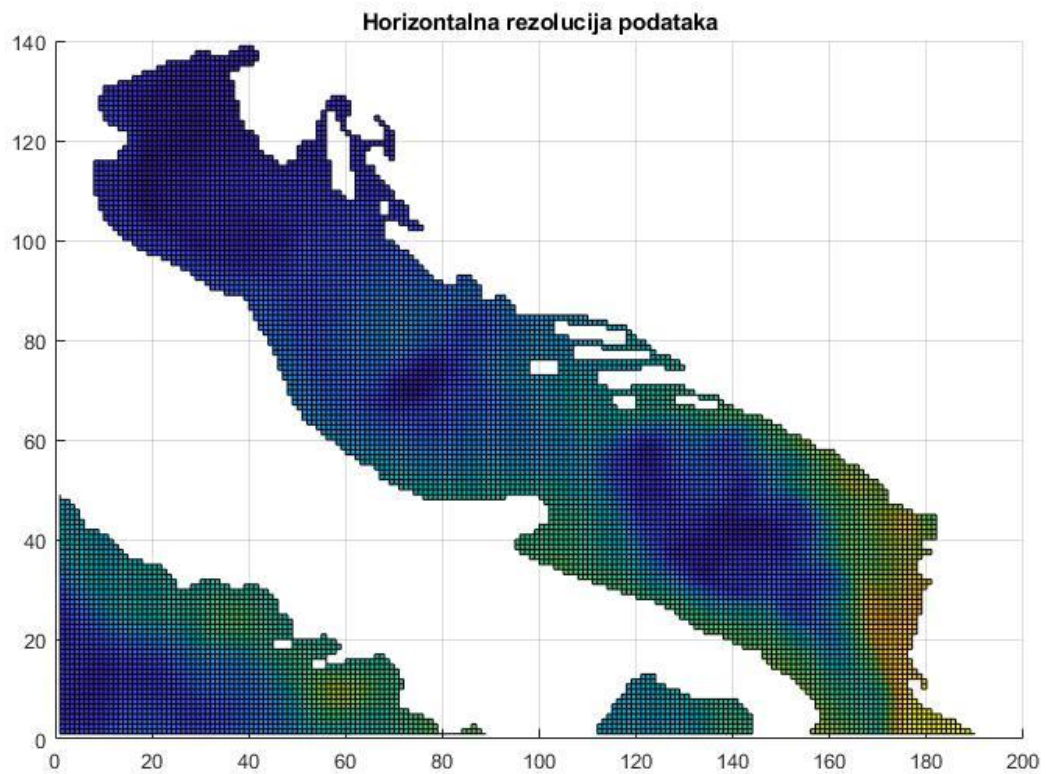


Slika 1. Lokacija svih mjernih postaja korištenih za obradu podataka. [5]

Modelirane vrijednosti srednje mjesečne razine mora preuzete su iz sustava Copernicus Marine Service. Proizvod Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis generiran je numeričkim sustavom koji se sastoji od hidrodinamičkog modela, kojeg isporučuje Nucleous za europsko modeliranje oceana (NEMO) i sheme varijacijske asimilacije

podataka (OceanVAR) za vertikalne profile temperature, saliniteta i satelitima određenu anomaliju razine mora [6].

Prostorna horizontalna rezolucija modela je $1/24^\circ$ (cca. 4-5 km, u ovisnosti o zemljopisnoj širini). Horizontalna rezolucija se može vidjeti na **Slici 2**. Varijabla koju sam analizirao je srednja mjesečna razina mora (med-cmcc-ssh-rean-m).



Slika 2. Prostorna horizontalna rezolucija podataka preuzetih sa sustava Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis.

1.2. Metodologija

1.2.1. Srednja razina mora, standardna devijacija i trend

Srednja razina mora za određeno razdoblje računa se kao suma svih izmjerenih vrijednosti u tom razdoblju, podijeljena s brojem mjerenja:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(1)

gdje su x_i izmjerene vrijednosti, a n broj mjerenja. Prilikom analize izmjerenih razina mora, od izmjerenih vrijednosti oduzeo sam srednje vrijednosti jer se mareografska nula na različitim postajama nalazi na različitim visinama. Trend razine mora može se izračunati metodom najmanjih kvadrata

$$y = mt + b, \tag{2}$$

gdje je:

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i y_i) - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}, \tag{3}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n t_i}{n}, \tag{4}$$

gdje je t vrijeme.

1.2.2. Indeks promjene režima

Za određivanje klimatskih režima koristio sam sekvencijalni algoritam za testiranje promjene klimatskih režima [7]. Ovaj algoritam omogućuje detekciju promjene režima i praćenje magnitude promjene tijekom vremena. Algoritam je koristan jer može podnijeti podatke neovisno o tome da li predstavljaju anomalije ili apsolutne vrijednosti, te se lako koristi za izračun promjene režima u velikim skupovima podataka. Nakon što sam izračunao godišnje srednje vrijednosti razine mora za sve postaje, prvi korak u primjeni algoritma je određivanje trajanja režima (l). Razina vjerojatnosti postavljena je na $p = 0.05$, a broj stupnjeva slobode na $2l-2$. Drugi korak je određivanje razlike (*diff*) između srednjih vrijednosti i dvaju naknadnih režima koji će biti statistički značajni prema t-testu. Nakon toga računa se srednja vrijednost $\overline{x_{R1}}$ za početnih l vrijednosti varijable x kao procjenu za režim R1 i razine koje trebaju biti dosegnute u l godina da se kvalificiraju kao prelaz u režim R2:

$$\overline{x'_{R2}} = \overline{x_{R1}} \pm diff. \quad (5)$$

Za svaku novu vrijednost koja počinje s godinom $i = l+1$ provjeri se je li veća ili manja od $\overline{x_{R1}} \pm diff$. Ako ne prelazi navedenu vrijednost, onda se smatra da se trenutni režim nije promijenio. U tom slučaju, računa se ponovno $\overline{x_{R1}}$ s uključenom varijablom x_i i $l-1$ preostalih vrijednosti varijable x , a potom prelazimo na iduće vrijednosti. Ako iduća vrijednost preraste navedeni raspon, smatra se mogućom početnom točkom novog režima R2. Nakon što se odredi točka promjene, svaka nova vrijednost od x_i , gdje je $i > j$, koristi se da potvrdi ili poništi nul-hipotezu režimske promjene u j -toj godini. Ako je anomalija $x_i - \overline{x'_{R2}}$ istog predznaka kao i ona u trenutku promjene režima, raste pouzdanost da se promjena dogodila. Suprotno vrijedi ako su anomalije različitog predznaka [7]. Ova promjena u pouzdanosti režimske promjene na $i = j$ reflektira se preko indeksa promjene režima (eng. RSI¹), koji predstavlja kumulativnu sumu normaliziranih anomalija:

$$RSI_{i,j} = \sum_{i=j}^{j+m} \frac{x_i^*}{l\sigma_l}, m = 0,1,\dots,l-1 \quad (6)$$

gdje je $x_i^* = |x_i - \overline{x'_{R2}}|$, l – duljina intervala, a σ_l varijanca.

Negativna vrijednost RSI indeksa znači da je test neuspješan, a pozitivna ukazuje da je promjena režima u j -toj godini značajna za odabranu vjerojatnost p .

1.2.3. Koeficijent korelacije

Koeficijent korelacije omjer je između kovarijance dviju varijabli i produkta pripadajućih standardnih devijacija. Ovim koeficijentom određuje se linearna korelacija između dvaju skupova podataka. Tako određujemo normaliziranu vrijednost kovarijance, pa se konačna vrijednost koeficijenta kreće isključivo između -1 i 1. Kao i u slučaju same kovarijance, mjera pokazuje samo linearnu korelaciju podataka. Ovaj podatak koristio sam za određivanje korelacije između mjerenih i modeliranih vrijednosti razine mora:

¹ Dalje u radu koristit će se uobičajena engleska skraćenica *RSI*

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}.$$

(7)

1.2.4. Korijenska srednja kvadratna pogreška

Korijenska srednja kvadratna pogreška (eng. RMSE²) je mjera razlike između vrijednosti predviđenih modelom i izmjerenih vrijednosti. RMSE služi za prikupljanje magnitude odstupanja u predviđanjima za različite točke podataka, koje zajedno određuju točnost predviđanja modela. Ovo odstupanje je mjera točnosti i služi za uspoređivanje odstupanja različitih modela.

RMSE je uvijek nenegativan broj, a vrijednost 0 (koja se u praksi nikad ne postiže) ukazivala bi na savršenu točnost. Općenito, niža vrijednost RMSE ukazuje na veću preciznost modela. RMSE je korijen prosjeka kvadriranih odstupanja. Efekt svake pogreške na RMSE je proporcionalan veličini kvadriranog odstupanja, pa veća odstupanja imaju znatno veći učinak na RMSE. Posljedično, ova vrijednost je osjetljiva na ekstremne vrijednosti odstupanja. Ovu vrijednost računao sam da usporedim izmjerene i modelirane mjesečne vrijednosti razine mora na Jadranu, te izmjerene i modelirane prosječne vrijednosti.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2},$$

(8)

gdje su y_i modelirane, a x_i izmjerene vrijednosti.

1.2.5. Pristranost

Račun pristranosti (eng. bias³) se prvenstveno koristi za procjenu prosječne pristranosti modela i da se odluči treba li poduzeti kakve korake da se ispravi pristranost modela.

²Dalje u radu koristit će se uobičajena engleska skraćenica *RMSE*

³Dalje u radu koristit će se uobičajeni engleski pojam *bias*

Pozitivan bias predstavlja precjenjivanje mjerenja od strane modela. Ovu vrijednost koristio sam da odredim srednju pogrešku pristranosti modela u odnosu na izmjerene podatke:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i),$$

gdje su y_i modelirane, a x_i izmjerene vrijednosti.

(9)

1.2.6. Klizna varijanca

Varijanca je mjera raspršenosti podataka oko prosjeka. Varijancom određujemo srednje kvadratno odstupanje niza podataka od prosjeka. Za vektor varijable A sastavljen od N podataka, varijanca je definirana kao:

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2,$$

(10)

gdje je μ srednja vrijednost od A :

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i.$$

(11)

Klizna varijanca vraća niz lokalnih vrijednosti varijance, pri čemu se svaka varijanca izračunava kroz klizni prozor duljine k preko susjednih elemenata vektora A . Kada je k neparan, prozor je centriran oko elementa u trenutni položaj. Kada je k paran, prozor je centriran oko trenutnog i prethodnog elementa. Veličina prozora automatski se skraćuje na krajnjim točkama kada nema dovoljno elemenata za popunjavanje prozora. Kada je prozor skraćen, varijanca se računa samo na elementima koji ispunjavaju prozor. Klizna varijanca korištena je da se usporedi mjera predvidivosti izmjerenih i modeliranih podataka.

2. Analiza mjerenih vremenskih nizova

2.1. Kretanje razine mora: promjene klimatskih režima i trendovi

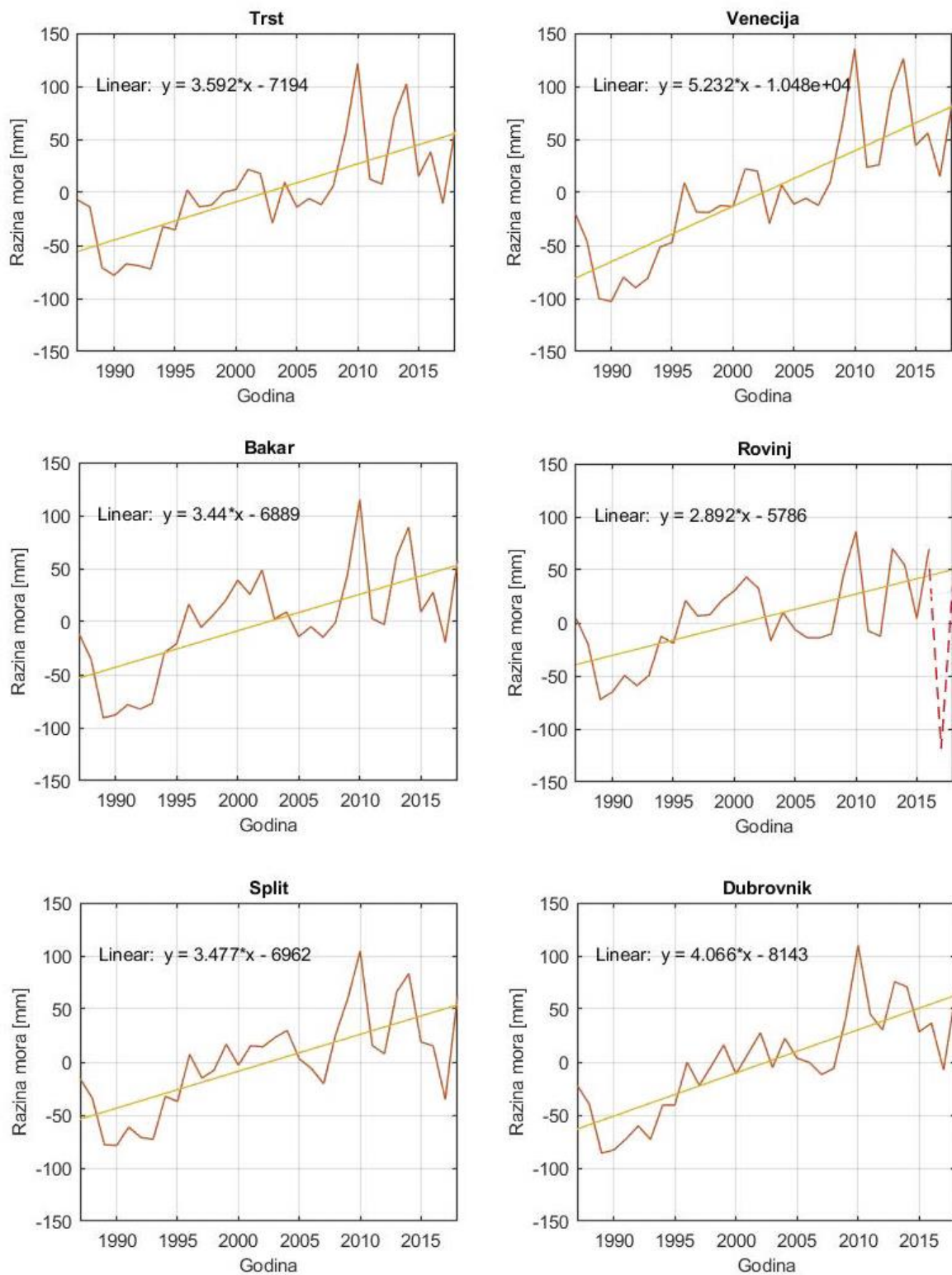
Iz podataka o srednjim mjesečnim razinama mora izračunao sam srednje godišnje vrijednosti na mjernim postajama istočne i zapadne obale Jadrana. Vidljivo je da među nizovima mjerenim na različitim postajama postoji visoka korelacija, te je na svim postajama zabilježen uzlazni linearni trend srednje razine mora.

Na većini mjernih postaja (Trst, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik) razina mora raste od 3 do 4 milimetra godišnje. Najviši trend zabilježen je u Veneciji (5.23 mm/god), gdje se javlja i najveći raspon između minimalne (-100 mm) i maksimalne (140 mm) srednje godišnje razine mora. Općenito, postaje sjevernog Jadrana (Trst, Venecija i Bakar) bilježe veći raspon između minimalnih i maksimalnih vrijednosti.

Na sjeverozapadnoj obali Jadrana, posebno u dolini rijeke Po, na razinu mora utječe izraženo vertikalno pomicanje kopna od -1.2 do -2.0 mm/god koliko je zabilježeno u Veneciji. Slijeganje tla u Veneciji pojačano je antropogenim aktivnostima te se povišeni trend rasta razine mora u odnosu na ostale postaje pripisuje crpljenju vode iz podzemnih izvora [8].

Dobiveni trend za razdoblje 1987-2018 na svim postajama dobro se slaže s, iz literature dostupnim, trendovima, pa je najviši trend rasta razine mora ponovno zabilježen u Veneciji (2.45 ± 0.09 mm/god) za razdoblje 1909-2000 i Dubrovniku (1.02 ± 0.16 mm/god) za razdoblje 1956-2008. Od preostalih postaja u literaturi se navode trendovi za Bakar (1.03 ± 0.12 mm/god) za razdoblje 1930-2008, Split (0.64 ± 0.16 mm/god) za razdoblje 1954-2008 i Rovinj (0.53 ± 0.17 mm/god) za razdoblje 1955-2008 [9].

Zbog vjerojatne pogreške u mjerenjima podaci s postaje Rovinj u razdoblju od 2017. godine nadalje su izostavljeni iz proračuna trenda. **Slika 3** prikazuje trendove na šest mjernih postaja.

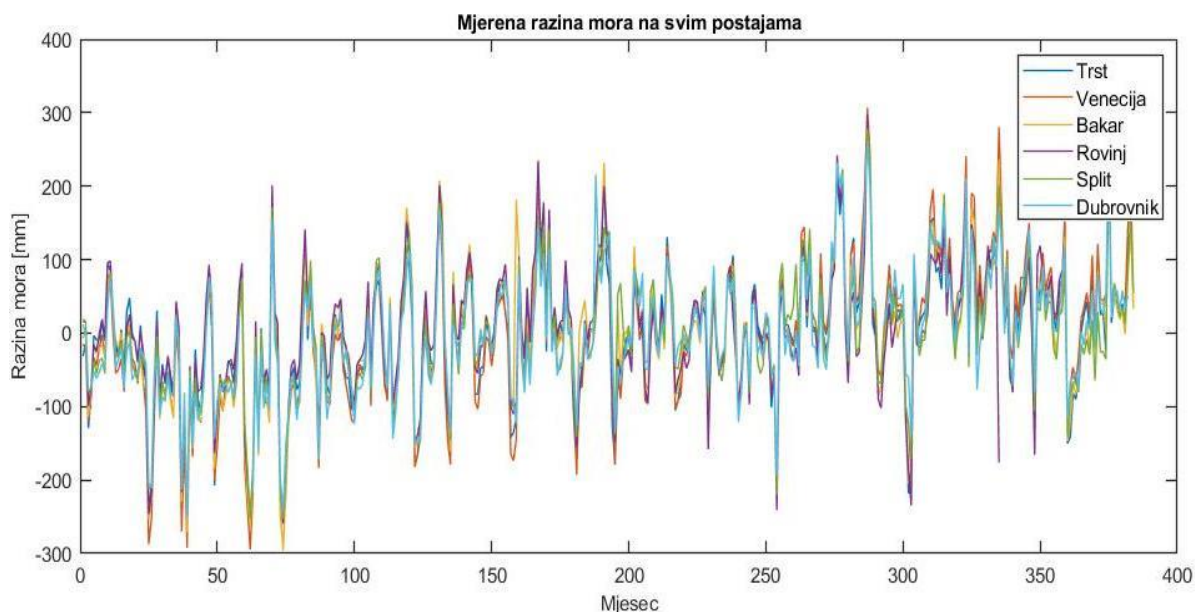


Slika 3. Kretanje i trend srednje godišnje razine mora na postajama Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik. Za postaju Rovinj trend je računat do 2016. godine. Crvenom crtkanom linijom označeni su podaci koji nisu uključeni u izračun trenda.

Kako bih odredio podudarnost izmjerenih podataka, izračunao sam koeficijent korelacije (**Tablica 1**) i grafički prikazao (**Slika 4**) srednje mjesečne vrijednosti razine mora za šest postaja. Koeficijent korelacije je izrazito visok za sve parove postaja te je za većinu parova viši od 0.9.

Tablica 1. Koeficijent korelacije između vremenskih nizova mjesečnih razina mora.

Korelacija	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
Trst	1	0.9802	0.9539	0.9294	0.9325	0.9213
Venecija	0.9802	1	0.9443	0.9159	0.9448	0.9416
Bakar	0.9539	0.9443	1	0.9199	0.9450	0.9254
Rovinj	0.9294	0.9159	0.9199	1	0.9064	0.8954
Split	0.9325	0.9448	0.9450	0.9064	1	0.9624
Dubrovnik	0.9213	0.9416	0.9254	0.8954	0.9624	1



Slika 4. Podudarnost mjerenja u 32-godišnjem razdoblju za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

2.2. Godišnji hod razine mora

Kako bih odredio godišnji hod razine mora, izračunao sam, za svaki mjesec, srednjake odgovarajućih mjesečnih vrijednosti razine mora.

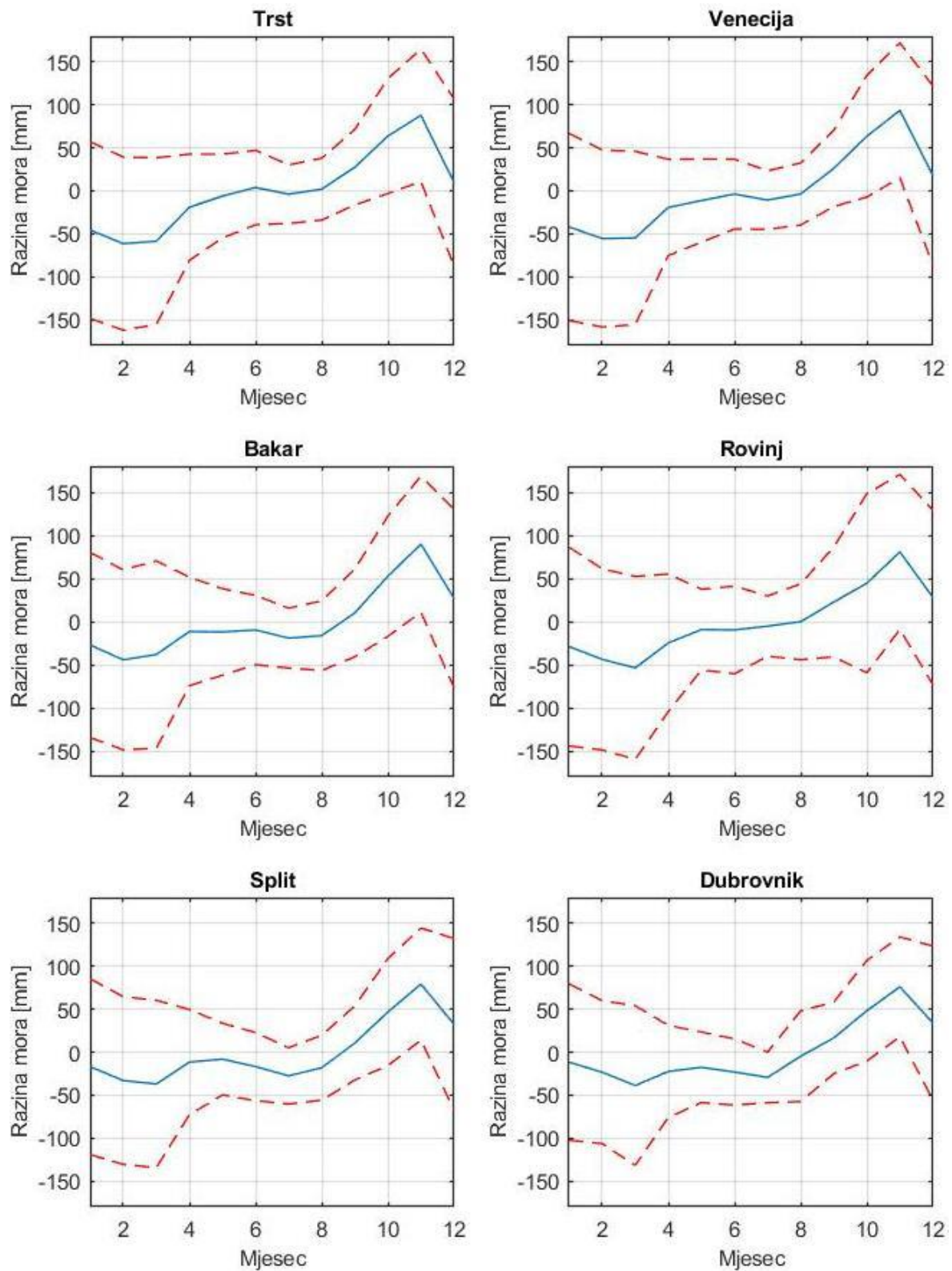
Za sve navedene postaje, u višegodišnjem prosjeku, najviša razina mora mjeri se tijekom studenog, dok je po pitanju sezone najviša razina mora u tromjesečju listopad-studeni-prosinac (**Slika 5**). Također, na većini postaja najniže razine mora izmjerene su u ožujku, pri čemu je najniža razina mora u tromjesečju siječanj-veljača-ožujak.

Na većini postaja standardna devijacija najmanja je tijekom klimatološkog ljeta (lipanj-srpanj-kolovoz), što se može vezati uz izraženu stabilnost vremena u tom razdoblju. Najveća standardna devijacija je tijekom klimatološke zime (prosinac-siječanj-veljača).

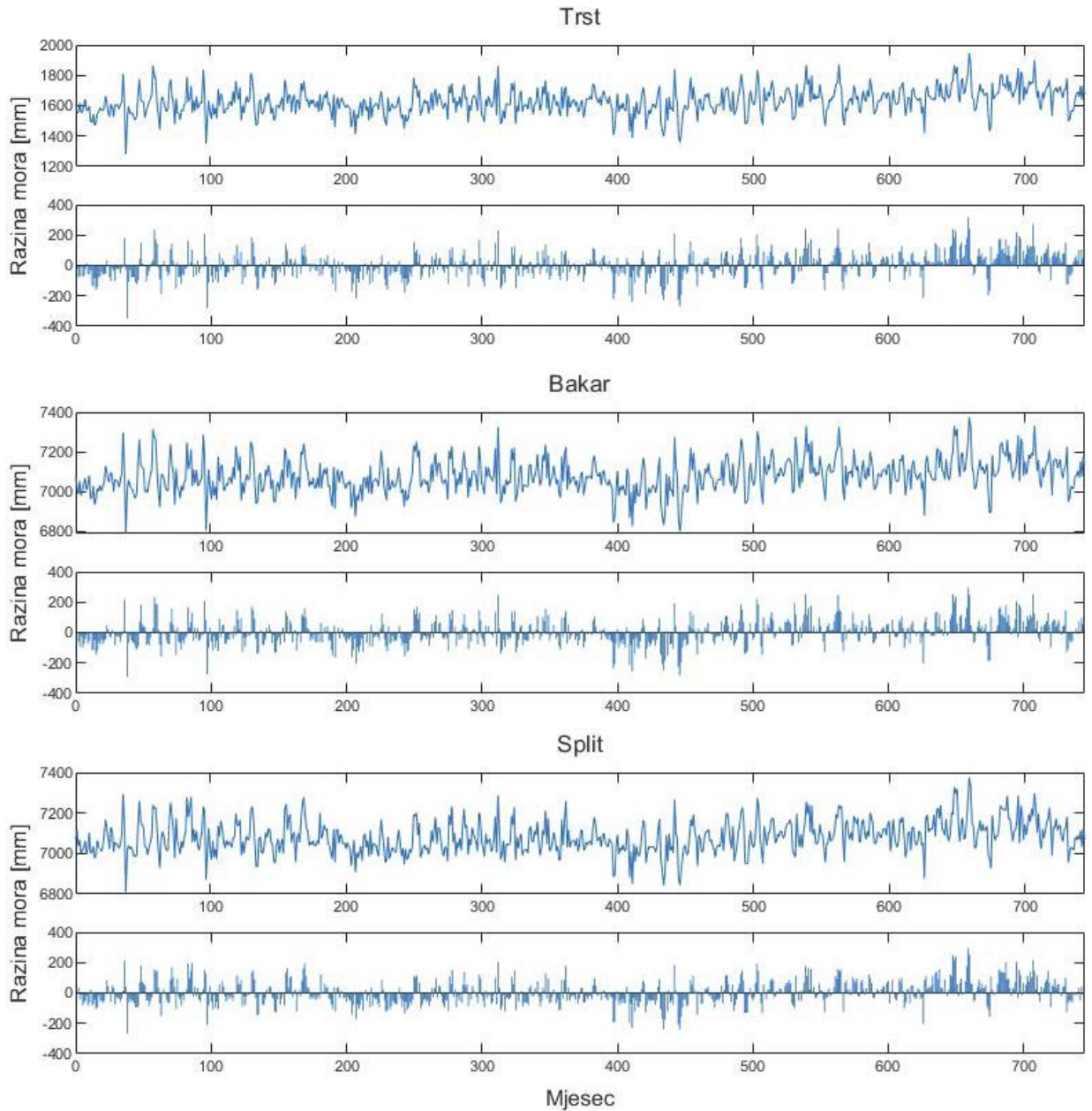
Na prikazu mjesečnih podataka za cijeli period mjerenja mogu se uočiti dulja razdoblja znatno povišene odnosno snižene razine mora (**Slika 3, Slika 6**), što ukazuje na to da uz sezonska odstupanja (listopad-studeni-prosinac) postoje i višegodišnja odstupanja na svim postajama.

Dalje sam izračunao RSI indeks i odredio promjene režima. Za duljinu trajanja režima odabrao sam period od $l = 10$ godina, dok je vjerojatnost postavljena na $p = 0.05$.

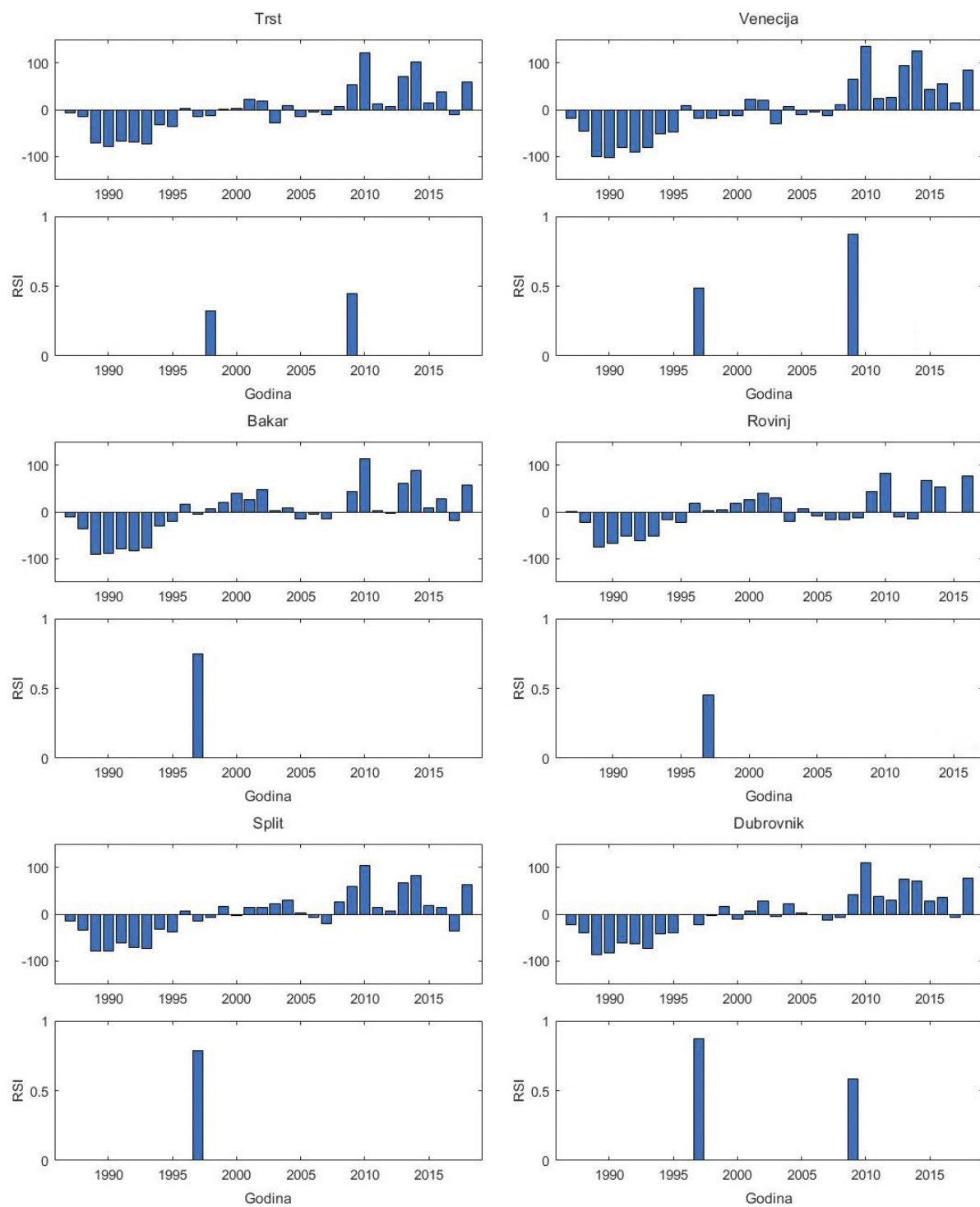
Na talijanskoj obali Jadrana najizraženija promjena režima dogodila se 2009. godine (Trst i Venecija). Ova promjena bilježi se i u Dubrovniku. Uz nju, izražena promjena režima dogodila se i 1997. godine – ovu promjenu režima zabilježile su sve mjerne postaje (**Slika 7**).



Slika 5. Prosječna mjerena razina mora i standardna devijacija po mjesecima u 32-godišnjem razdoblju za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.



Slika 6. Grafički prikaz (*gornji redovi*) mjerenih srednjih mjesečnih razina mora te (*donji redovi*) odstupanja mjerenih srednjih mjesečnih razina mora od pripadnih mjesečnih srednjaka izračunatih na cijelom nizu, za postaje Trst, Bakar i Split.



Slika 7. Izmjerena srednja godišnja razina mora (*gornji redovi*) i indeks promjene režima (*donji redovi*) za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

3. Analiza modeliranih vremenskih nizova

Nakon analize izmjerenih podataka sa šest mjernih postaja na Jadranskom moru, u ovom poglavlju obradio sam podatke reanalize Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis za točke modela najbliže mjernim postajama, te također za razdoblje od siječnja 1987. do prosinca 2018. godine.

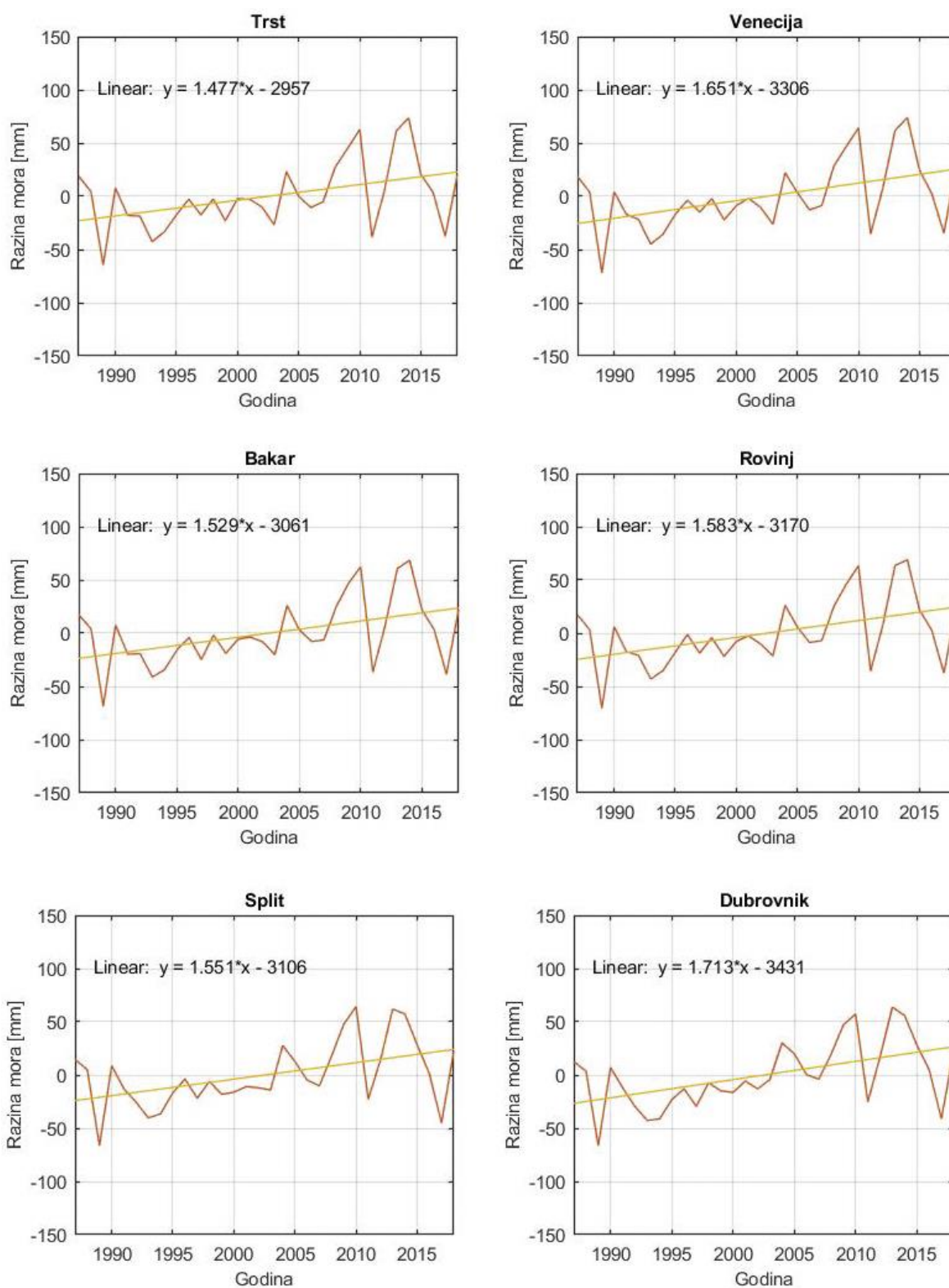
3.1. Kretanje razine mora: promjene klimatskih režima i trendovi

Iz modeliranih srednjih mjesečnih vrijednosti razine mora izračunao sam srednje godišnje vrijednosti za postaje. Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik. Modelirani podaci prikazuju uzlazni linearni trend rasta srednje razine mora na svim promatranim postajama, ali u ovom slučaju manji od izmjerenih vrijednosti (**Slika 8**). Najviši trend rasta srednje razine mora modeliran je u Dubrovniku (1.71 mm/god) i Veneciji (1.65 mm/god), a najniži u Trstu (1.48 mm/god). Raspon modeliranih srednjih vrijednosti manji je od izmjerenih, a nije vidljiv ni utjecaj slijeganja tla. U **poglavljju 4.3** napravljena je detaljnija usporedba.

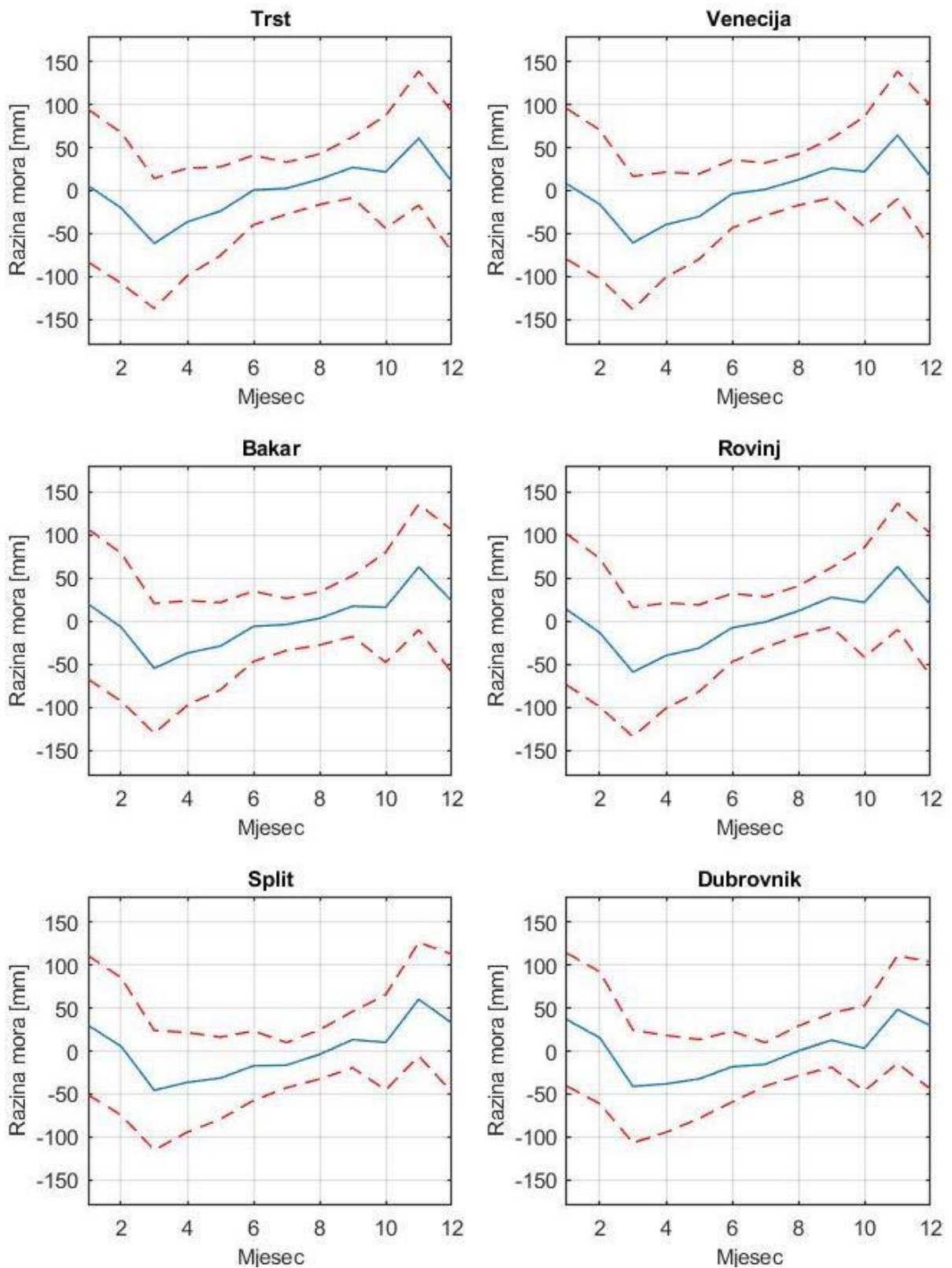
3.2. Godišnji hod razine mora

Srednje mjesečne vrijednosti modeliranih podataka također ukazuju na izraženu sezonalnost. Na svim promatranim postajama najviša srednja razina mora modelirana je u studenom, dok je po pitanju sezone najviša razina mora u tromjesečju listopad-studeniprosinac, ekvivalentno mjerenjima.

Najniža razina mora na svim postajama bilježi se u ožujku, ekvivalentno mjerenjima, dok je po pitanju sezone najniže tromjesečje ožujak-travanj-svibanj – što predstavlja odstupanje od sezone kada se bilježe najniže mjerene razine mora. Raspon standardne devijacije najmanji je tijekom ljetnih mjeseci, slično kao kod mjerenja. Za razliku od mjerenih podataka (**Slika 5**), model ima sklonost višim razinama mora od prosjeka u siječnju (**Slika 9**). U **poglavljju 4.3** detaljnije je uspoređen sezonski hod određen iz mjerenih i modeliranih razina mora.

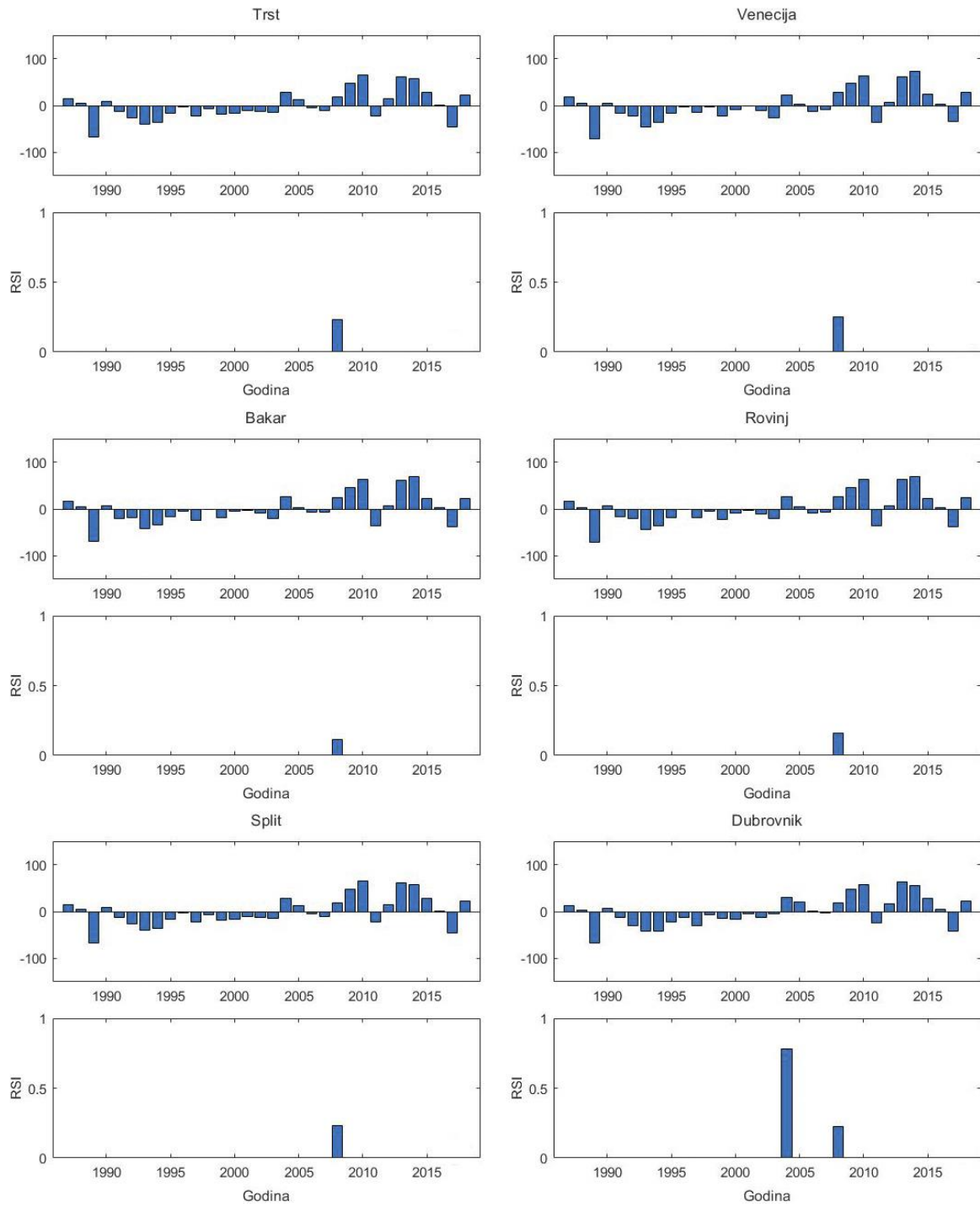


Slika 8. Kretanje i trend srednje godišnje razine mora na postajama Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.



Slika 9. Prosječna modelirana razina mora i standardna devijacija po mjesecima u 32-godišnjem razdoblju za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

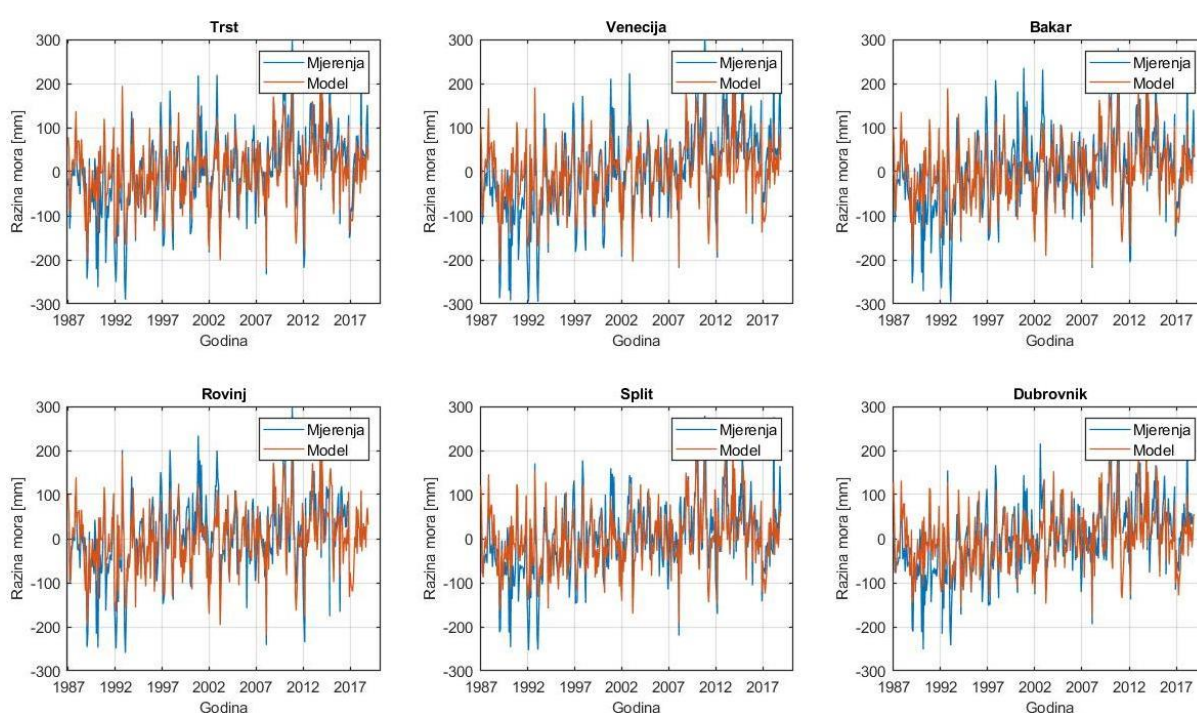
Kao i za slučaj mjerenih podataka, za izračun RSI indeksa i određivanje promjene režima, odabrao sam period od $l=10$ godina dok je vjerojatnost postavljena na $p=0.05$. Na svim modeliranim postajama uočena je promjena režima u 2008. godini, što je blisko 2009. godini, odnosno godini u kojoj je promjena režima uočena u mjerenim podacima. To je na većini postaja i najizraženija promjena režima, a iznimka je Dubrovnik gdje je najizraženija promjena bila 2004. godine (što je promjena koja se ne vidi u mjerenjima). (Slika 10). U **poglavlju 4.3** detaljnije su uspoređene promjene režima u modelu i mjerenjima.



Slika 10. Modelirana srednja godišnja razina mora (*gornji redovi*) i indeks promjene režima(*donji redovi*) za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

4. Usporedba mjerenih i modeliranih nizova razine mora

Zasebnim analizama mjerenih i modeliranih vremenskih nizova razine mora primijetio sam sličnosti kod izračunatih trendova, sezonalnosti i promjene režima. Izmjerene podatke usporedio sam s podacima fizičke reanalize Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis u razdoblju od siječnja 1987. do prosinca 2018. godine (**Slika 11**).



Slika 11. Mjereni i modelirani podaci za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Na **Slici 11** grafički su prikazane srednje mjesečne vrijednosti razine mora izračunate od izmjerenih vrijednosti i podataka modela u razdoblju od 1987 do 2018. godine, iz čega je vidljivo značajno podudaranje koje treba definirati.

Kao što vidimo iz **Tablice 2**, korelacija izmjerenih i reanaliziranih podataka kreće se od 0.7160 (Dubrovnik) do 0.8017 (Trst) te gotovo pravilno raste od juga prema sjeveru. Sada je na redu detaljna procjena točnosti modela. Ovisno o dobivenim rezultatima, mogu zaključiti da li je, i koliko, model primjenjiv za reprodukciju srednje razine Jadranskog mora.

Tablica 2. Korelacija izmjerenih i modeliranih mjesečnih vrijednosti za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
Korelacija	0.8017	0.7834	0.7550	0.7629	0.7535	0.7160

4.1. Mjereni i modelirani nizovi

Kako bih procijenio točnost predviđenih vrijednosti modela u odnosu na izmjerene mjesečne vrijednosti razine mora, izračunao sam RMSE za usporedbu nizova na šest obrađenih postaja. Maksimalne vrijednosti izračunate su na postajama Venecija (61.83 mm) i Bakar (59.65 mm), a minimalne u Splitu (55.81 mm) i Trstu (54.30 mm) (**Tablica 3**).

Tablica 3. RMSE izmjerenih i modeliranih podataka razine mora za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
RMSE (mm)	54.30	61.83	59.65	56.83	55.81	57.42

Koristeći varijancu izračunao sam mjeru varijabilnosti podataka. Prema očekivanju, na svim postajama varijanca je značajno veća kod mjerenja. To ukazuje da model ne može najpreciznije reproducirati povremene i rijetke lokalizirane ekstreme koji utječu na razinu mora. Razlika u varijanci modela i mjerenja najveća je na postajama sjevernog, a najslabije izražena na postajama južnog Jadrana (**Tablica 4**).

Po mjerenim i modeliranim vrijednostima (**Tablica 4**) Venecija ima najvišu varijancu od svih postaja, a u oba slučaja visoke vrijednosti bilježe još Bakar, Trst i Rovinj. Također, mjereni i modelirani podaci slažu se da su najniže varijance zabilježene u Splitu i Dubrovniku. Ovo je u skladu s činjenicom da se najviši olujni uspori, pa posljedično i najviše razlike između niske i visoke razine mora, bilježe na sjevernom Jadranu [10].

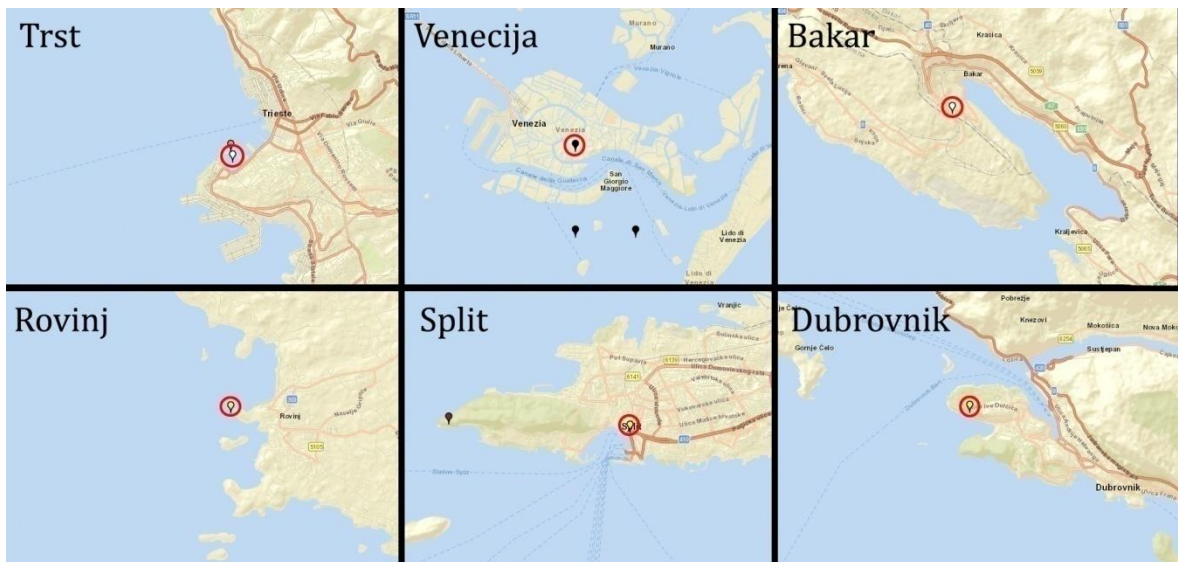
Tablica 4. Varijanca i razlika varijance izmjerenih i modeliranih mjesečnih vrijednosti razine mora za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
Mjerenje(mm²)	8276.92	9863.51	8277.43	7669.13	7187.13	6722.12
Model (mm²)	5316.44	5345.34	5110.76	5235.32	4612.28	4222.22
Razlika (mm²)	2960.48	4518.17	3166.67	2433.81	2574.84	2499.90

Najveća razlika izmjerenih i modeliranih vrijednosti varijance vidljiva je na postajama gdje varijanca doseže ekstremno visoke vrijednosti. Prema izmjerenim vrijednostima, vidimo da na varijabilnost razine mora utječe njegova dubina, otvorenost, geografski položaj te oblik površine (kanali i uvale).

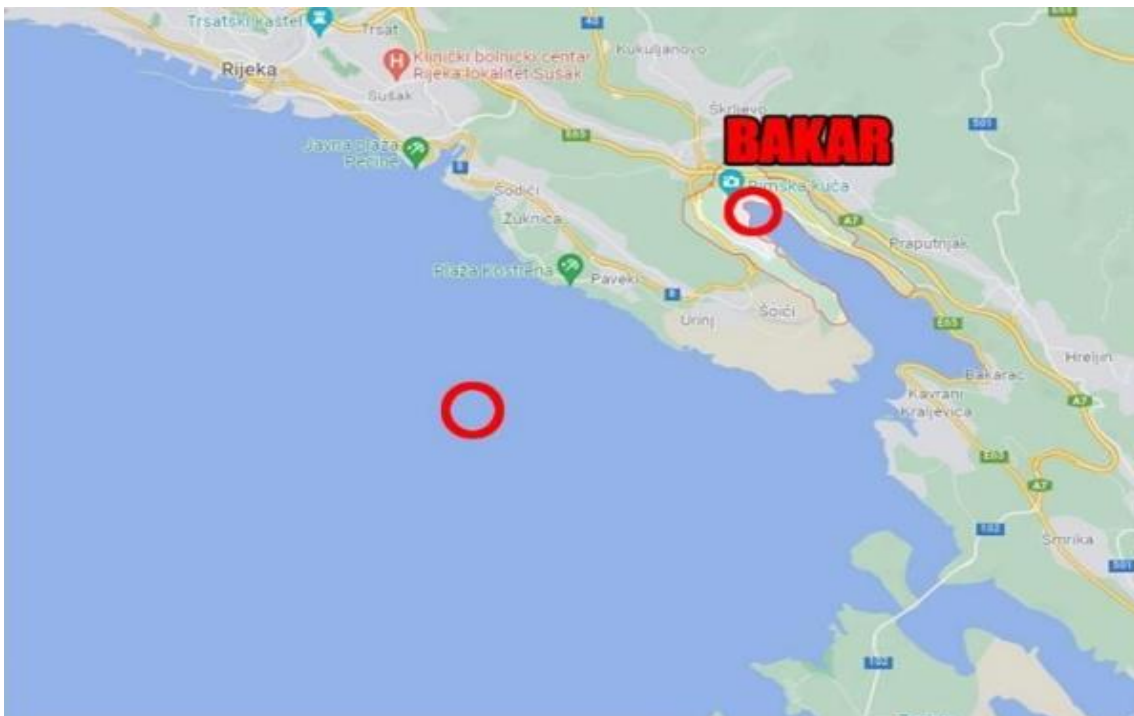
Općenito, sjeverni Jadran je u prosjeku najmanje dubine, te najzatvoreniji dio Jadranskog mora. Redoslijedom, postaje Trst, Venecija i Bakar tri su najsjevernije točke. Venecija, poznata po brojnim kanalima i iznimno plitkom moru, ima najvišu izmjerenu varijancu (9863.51 mm²). Visoke vrijednosti također mjeri Bakar (8277.43 mm²) smješten u 4.6 kilometara dugom i oko 600 metara širokom Bakarskom zaljevu, koji je dio Kvarnerskog zaljeva, te Trst (8276.92 mm²) kao najsjevernija postaja smještena u Tršćanskom zaljevu.

Manje vrijednosti izmjerene su južnije, u Rovinju (7669.13 mm²), na postaji potpuno izloženoj otvorenom moru, a minimalna vrijednost bilježi se u Dubrovniku (6722.12 mm²) koji je smješten na najotvorenijem i najdubljem dijelu Jadranskog mora od svih mjernih postaja (**Slika 12**). Uspoređujući razlike podataka, vidljivo je da na varijabilnost najviše utječe rezolucija modela koja ne prepoznaje lokalnu geografiju prostora.



Slika 12. Lokalna konfiguracija terena postaja Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik [4].

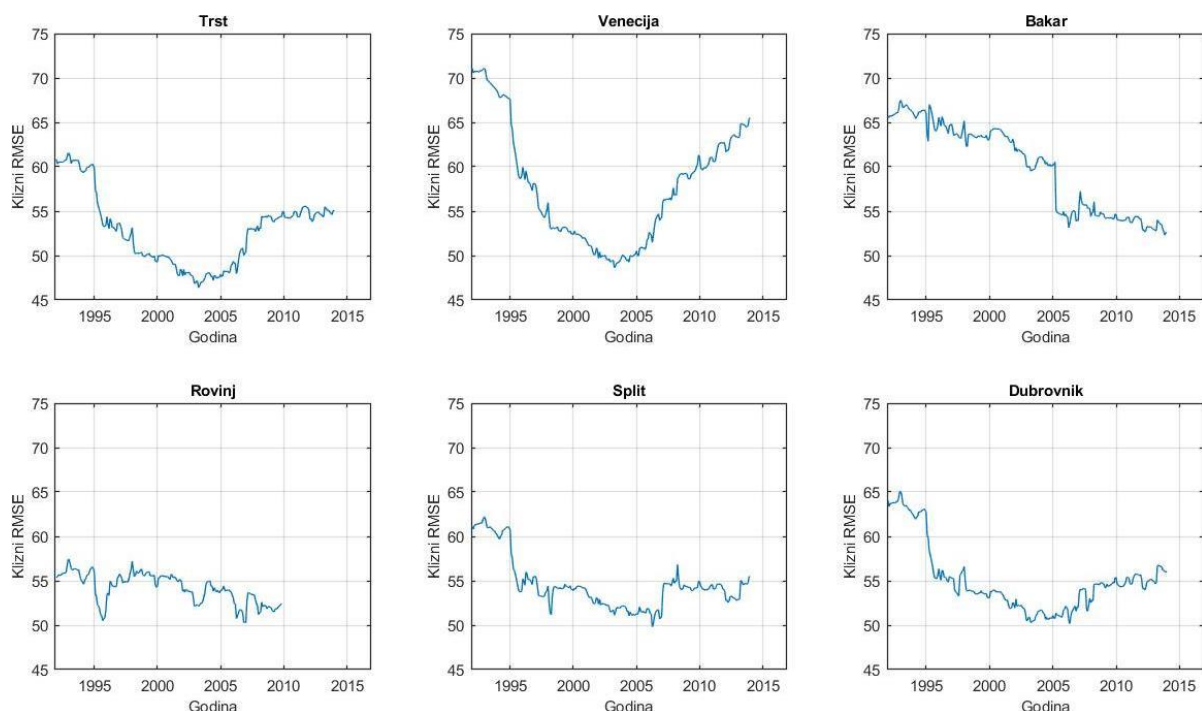
Rezolucija modela, koja iznosi $1/24^\circ$, posebno nepovoljno utječe na reproduciranje razine mora uz iznimno razvedenu obalu. Jedan od znakovitijih primjera je zaljev Bakar, čija je postaja iznimno uvučena u kopno, dok je prva referentna točka modela oko 4 kilometra jugozapadno na otvorenom moru (**Slika 13**).



Slika 13. Stvarna i modelirana pozicija mjerne postaje Bakar udaljene su oko 4 kilometra [11]

4.2. Klizna desetgodišnja razdoblja

Na postajama Bakar i Rovinj klizna desetgodišnja vrijednost RMSE, koju sam izračunao iz desetgodišnjih kliznih srednjaka razlike modeliranih i mjerenih vremenskih nizova, je u opadanju, s maksimalnim vrijednostima na početku promatranog razdoblja. No, na postajama Trst, Venecija, Split i Dubrovnik, minimalni RMSE se dostiže u razdoblju centriranom oko 2003-2007 godine, ovisno o postaji, nakon čega ponovo raste, i to više na sjevernim postajama (Trst, Venecija) nego na južnim (Split, Dubrovnik). RMSE je u većini promatranih intervala najviši za postaje sjevernog Jadrana, tj. za Trst, Veneciju i Bakar (Slika 14).

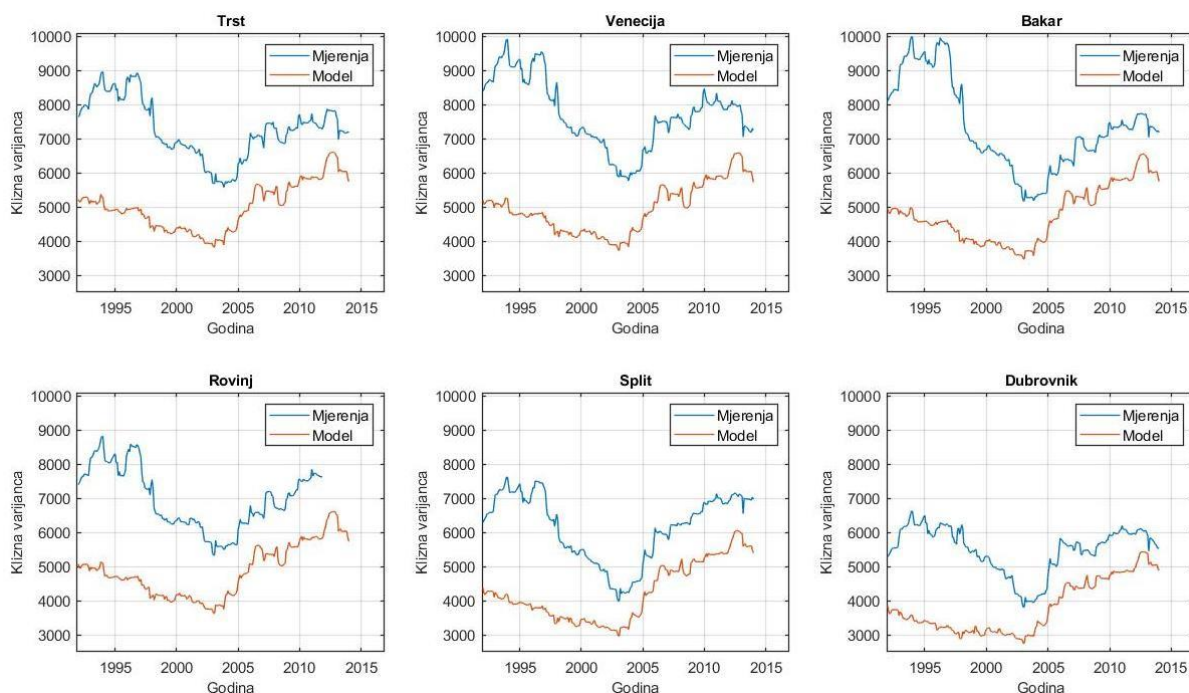


Slika 14. Klizna desetgodišnja vrijednost RMSE za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Na grafičkom prikazu klizne varijance može se vidjeti da je, kao i u slučaju apsolutne varijance, ona izraženija kod mjerenih vrijednosti (Slika 15). Također se može vidjeti da je izraženija na postajama sjevernog Jadrana. Kod modela je ta razlika manje izražena. U modeliranom i izmjerenom nizu podataka klizna varijanca najniža je u razdoblju oko 2003. godine, što objašnjava zašto je i RMSE najniži u istom razdoblju.

Bitnija razlika mjerenih i modeliranih podataka je u tome što je klizna varijanca mjerenja značajno izraženija u prvom, a kod modela u drugom dijelu promatranog razdoblja, što

objašnjava zašto mjerenja ukazuju na značajnu promjenu režima 1997. godine (**Slika 7**), dok model prvu promjenu režima vidi tek 2008. godine (**Slika 10**).



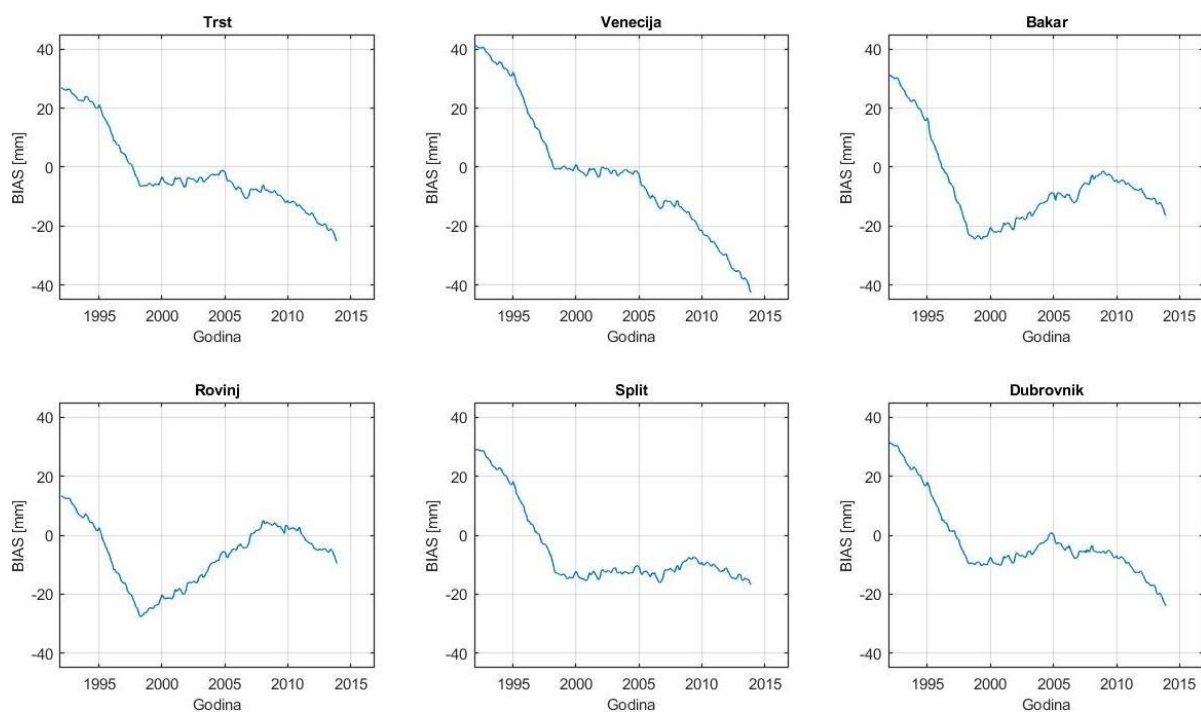
Slika 15. Klizna desetišnja varijanca mjerenih i modeliranih podataka za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Najniža varijabilnost mjerenih i modeliranih podataka bila je oko 2003. godine. Maksimalne vrijednosti izmjerenih podataka dobivene su 1993. i 1997. godine, dok je na modelu najviša klizna varijanca bila 2012. godine (**Slika 15**).

Klizne desetgodišnje vrijednosti biasa variraju među postajama, no za svih šest lokacija je vidljivo da u početnom razdoblju model prikazuje bitno više razine mora od izmjerenih. Usporedbom **Slika 3 i 8** vidljivo je da model ne reproducira uspješno razdoblje od 1989. do 1995. To je i razlog zbog kojeg model ne reproducira promjenu režima koja se u mjerenjima detektira 1997. godine. Posljedično, maksimalni bias se na svim mjernim postajama bilježi 1993. godine. (**Slika 16**).

Najveći pozitivni bias bilježi se u Veneciji (41.3 mm), a najniži u Rovinju (13.3 mm). U razdoblju oko 1997. godine bias poprima negativne vrijednosti (dakle model reproducira niže vrijednosti od mjerenih) koje se do 2010. uglavnom kreću oko -10 mm. Rovinj (-27.8 mm) i Bakar (-24.5 mm) svoje minimume dosežu 1998. godine, dok ostale postaje imaju uglavnom manje varijacije. Oko 2010. godine negativan bias modela na svim postajama

dotatno pada pa Trst (-25.1 mm), Venecija (-42.6 mm), Split (-16.7 mm) i Dubrovnik (-24.0 mm) u tom razdoblju bilježe i minimalne vrijednosti.



Slika 16. Klizni desetgodišnji bias modela za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

4.3. Trendovi, signal i promjene klimatskih režima

Jedna od važnih karakteristika modela je mogućnost prepoznavanje kretanja razine mora u različitim vremenskim intervalima. Zato sam usporedio izmjereni i modelirani trend srednje godišnje razine mora za cijelo razdoblje, te izmjereni i modelirani godišnji hod razine mora. Također, važno je usporediti i mjerene i modelirane promjene režima, a koje nisu povezane s godišnjim dobima i općim trendom razine mora.

Najveći trend rasta razine mora, kako kod mjerenih, tako i kod modeliranih podataka bilježe Venecija i Dubrovnik. Izmjereni trendovi su dva do tri puta veći od modeliranih (Tablica 5). Najmanja razlika zabilježena je u Rovinju (1.31 mm/god), a najveća u Veneciji (3.58 mm/god). Značajna razlika u Veneciji posljedica je parametra koji nije uključen u reanaliziranom nizu podataka modela, a to je vertikalno kretanje (tonjenje) tla koje je na ovom području vrlo izraženo [8].

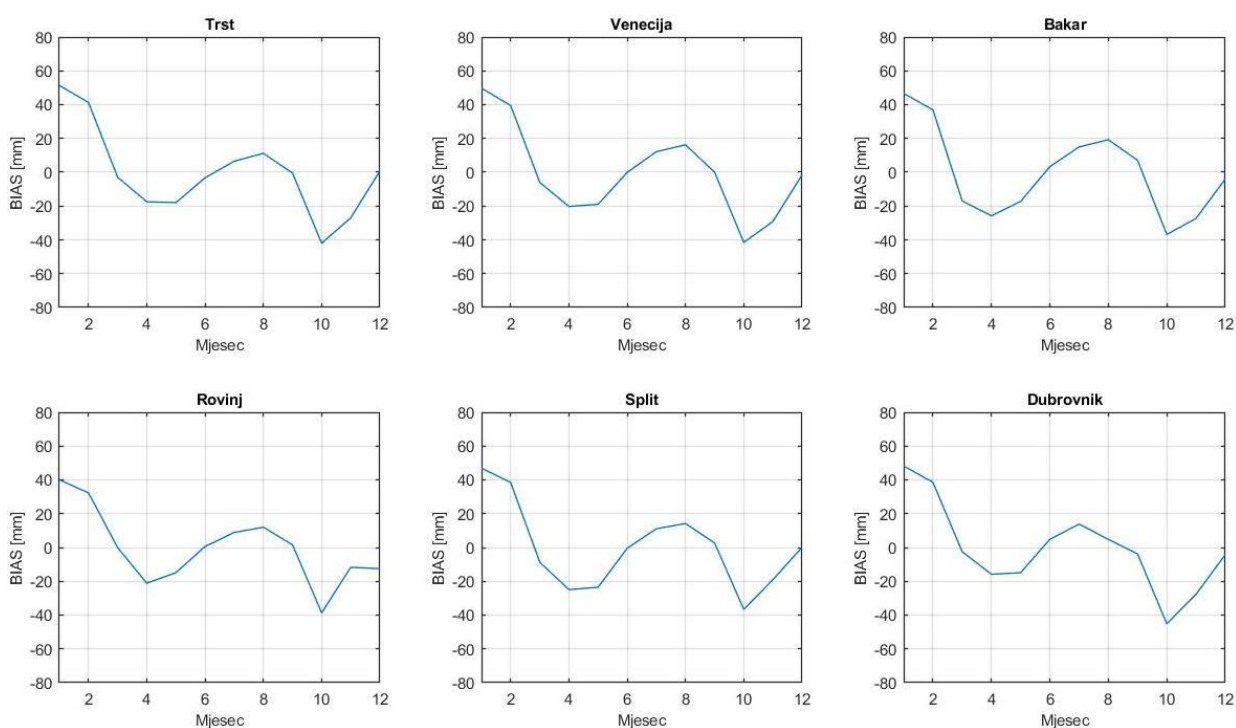
Tablica 5. Usporedba izmjerenog i modeliranog trenda [mm/god] za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
Izmjereni trend (mm/god)	3.59	5.23	3.44	2.89	3.45	4.07
Modelirani trend (mm/god)	1.48	1.65	1.53	1.58	1.55	1.71
Razlika (mm/god)	2.11	3.58	1.91	1.31	1.90	2.36

Podaci koje model uzima u obzir su razina mora, *in-situ* temperatura-salinitet (TS) profili i površinska temperatura mora. U proračun je uključeno i podizanje razine mora zbog otapanja ledenjaka i termalna ekspanzija zbog koje je na većem dijelu Sredozemlja razina mora najveća u kolovozu i rujnu [12]. Nakon trendova uzeo sam srednje mjesečne vrijednosti za svaku postaju, te usporedio izmjereni i modelirani godišnji hod za sve promatrane postaje.

Bias ukazuje na izraženu sklonost modela da reproducira veće razine mora od izmjerenih tijekom zimskih mjeseci (siječanj i veljača), te niže razine mora u listopadu na svim postajama (**Slika 17**).

Godišnji hod je najbolje reproduciran za ljetne mjesece. Također, primjećuje se izraženiji bias na postajama sjevernog Jadrana u odnosu na južnije postaje (Split i Dubrovnik) te postaje koje nisu izolirane prema otvorenom moru (Rovinj), što još jednom potvrđuje utjecaj rezolucije modela. RMSE vrijednost izračunata kao razlika srednjeg godišnjeg hoda modela i mjerenja najviša je na postajama Bakar i Split, a najniža u Rovinju. (**Tablica 6**).



Slika 17. Bias modela za godišnji hod na postajama Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Tablica 6. RMSE izmjerenih i modeliranih srednjih mjesečnih vrijednosti razine mora za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik.

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
RMSE (mm)	4.30	4.43	4.62	4.03	4.44	4.32

Prema izmjerenim podacima, na svim postajama detektirana je izražena promjena režima 1997. godine, a na polovini mjernih postaja (Trst, Venecija i Dubrovnik) izražena promjena režima zabilježena je i 2009. godine (**Tablica 7**).

Tablica 7. Godina promjene režima za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik. Najjače promjene su podcrtane.

Postaja	Trst	Venecija	Bakar	Rovinj	Split	Dubrovnik
Mjerenje	<u>1997,2009</u>	<u>1997,2009</u>	<u>1997</u>	<u>1997</u>	<u>1997</u>	<u>1997,2009</u>
Model	<u>2008</u>	<u>2008</u>	<u>2008</u>	<u>2008</u>	<u>2008</u>	<u>2008</u>

Promjene režima na modeliranim podacima slabije su izražene, a među njima se ističe samo 2008. godina. Ova promjena se podudara s promjenom koja je 2009. primijećena u izmjerenim podacima.

5. Poopćenje analize na Sredozemno more

Usporedbom mjerenih i modeliranih podataka uočio sam visoku korelaciju za sve mjerne postaje, manji bias modela, zadovoljavajuću sposobnost modela da reproducira kretanje razine mora u cijelom promatranom razdoblju, uključujući reprodukciju godišnjeg hoda i promjena režima.

Uz nedostatke, koji su uglavnom povezani s rezolucijom i nemogućnosti prepoznavanja lokalnih i ekstremnih fenomena, model se može smatrati prihvatljivim za korištenje. S obzirom na to, izračunao sam i trendove, sezonski hod te promjene režima za cijelo Sredozemno more iz modeliranih podataka reanalize Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis. Zanimala me analiza za cijelo dostupno razdoblje, pa sam preuzeo podatke za 1987-2020 jer više ne uspoređujem s mjerenjima.

5.1. Trend razine mora

Kao što se vidi u **Tablici 5** te na **Slici 8**, model reproducira predznak i prostornu distribuciju (iako ne i točan iznos) izmjerenih trendova, a koji ukazuju na rast srednje razine mora na svim postajama u Jadranu. Istraživanja ukazuju da je ovaj trend globalan, te je karakterističan za veći dio Sredozemnog mora [3].

Podaci reanalize (**Slika 18**) ukazuju na to da razina mora raste gotovo na cijelom obalnom području Sredozemlja i to izraženije na istočnom Sredozemlju (1.5 – 4 mm/god), a slabije izraženo na zapadnom Sredozemlju (0 – 1 mm/god), posebno uz Gibraltar gdje je prisutan i blago negativan trend (oko -1 mm/god).

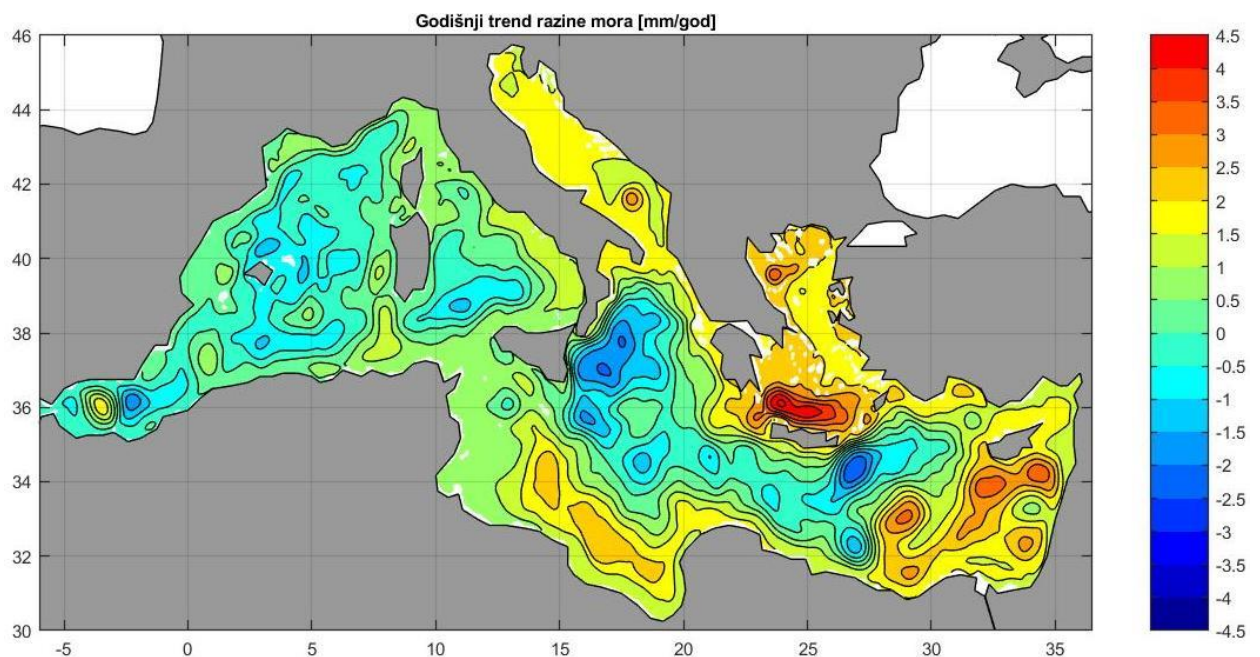
Najizraženiji pozitivan trend bilježi se u Egejskom moru i istočnom dijelu Levantskog mora (1.5 - 4.5mm/god). Izražen pozitivan trend bilježi se još i na Jadranskom moru i na krajnjem jugu Sredozemlja (1.5 - 2.5 mm/god). Otvoreno Balearsko i Alboransko more imaju blago negativan trend, kao i Jonsko more.

Ekstremne vrijednosti kreću se od -2.5 mm/god (područje jugoistočno od Krete) do 4.5 mm/god (Egejsko more sjeverno od Krete). Prostornoj varijabilnosti značajno doprinose područja na kojima se nalaze izraženi vrtlozi (**Slika 19**).

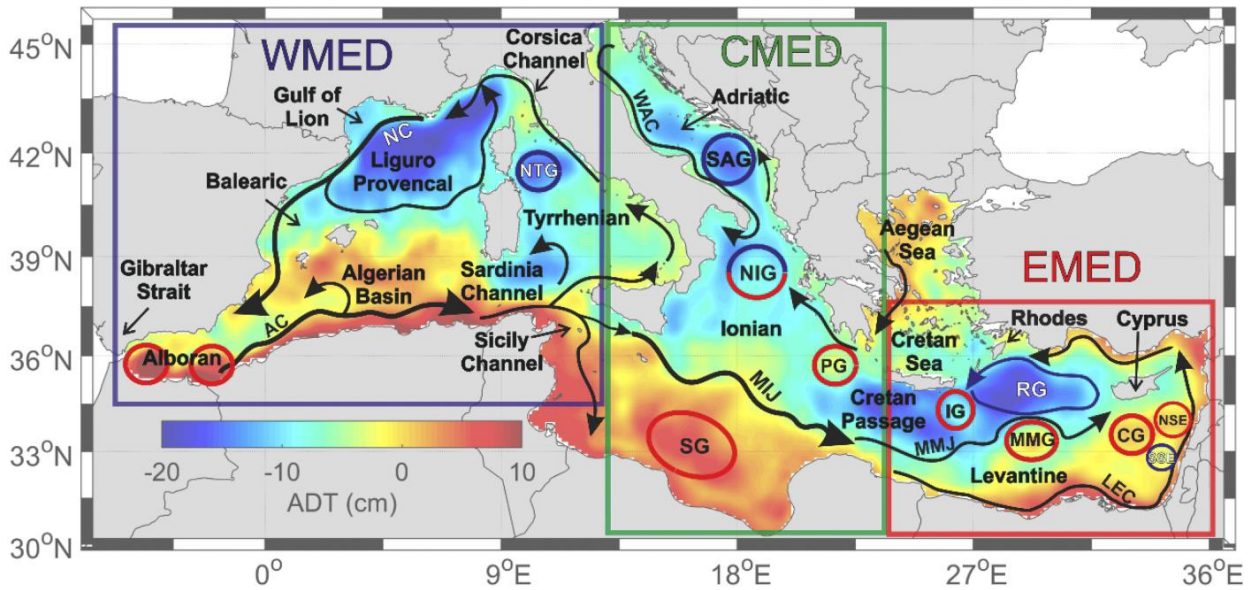
U zapadnom Sredozemlju po pozitivnom odstupanju ističe se anticiklonalni Zapadni alboranski vrtlog (do +1.85 mm/god), a po negativnom ciklonalni Južni tirenski i Lionski vrtlog (do -1.30 mm/god).

Na istočnom Sredozemlju, u Jadranskom moru, ističe se pozitivno odstupanje (do +2.8 mm/god) u Južnom jadranskom vrtlogu, anticiklonalni Sidra vrtlog (do +2.5 mm/god) u istoimenom zaljevu, te još tri anticiklonalna vrtloga u Levantskom moru: Ciparski, Shikmona, Mersa-Matruh (do +3.5 mm/god).

Najizraženiji negativni trend (do -2.5 mm/god) otkriven je na području jugoistočno od Krete, i povezan je s vrtlogom Ierapetra. Također, značajan negativan trend vidljiv je i u Jonskom moru (do -2.1 mm/god). Izražene promjene trenda unutar vrtloga javljaju se dominantno zbog promjene cirkulacije. Primjerice, početkom 1990-ih godina došlo je do obrata cirkulacije u Jonskom moru, pri čemu je anticiklonalni vrtlog (karakteriziran pozitivnom razinom mora u središtu) oslabio i prešao u ciklonalni vrtlog (karakteriziran negativnom razinom mora u središtu) – posljedično, na ovom području detektiraju se negativni trendovi srednje razine mora [13][14].



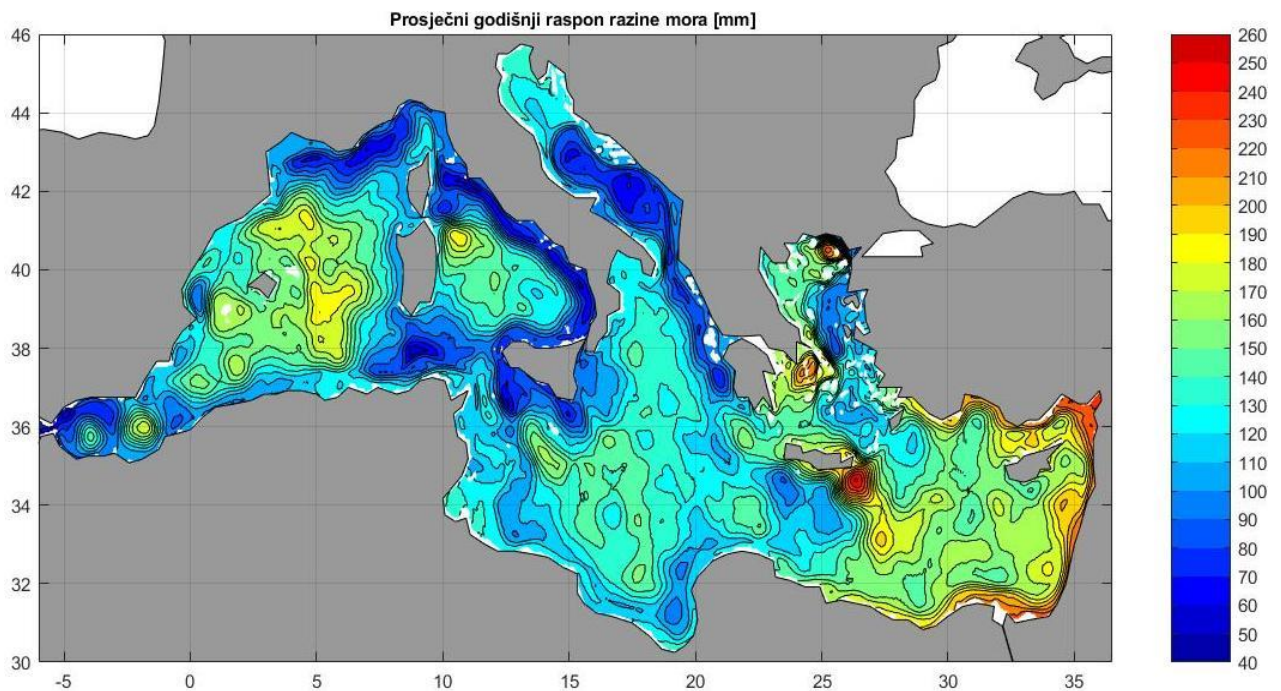
Slika 18. Godišnji trend razine mora na Sredozemlju u razdoblju 1987-2020. prema modelu Copernicus Mediterranean Sea Physics Reanalysis



Slika 19. Geografija Sredozemnog mora superponirana na obojenoj karti srednje apsolutne dinamičke topografije u razdoblju 1993-2019. prema modelu CMEMS. Na karti su crnim strelicama prikazane glavne struje i cirkulacijske strukture. Crvenim krugovima prikazani su anticiklonalni, a modrim ciklonalni vrtlozi. Sredozemno more je, na slici, podijeljeno na zapadno (WMED), srednje (CMED) i istočno (EMED). Akronimi: AW, Atlantska voda; LIW, Levantska intermedijalna voda; DW, gusta voda; IW, intermedijalna; NIG, Sjeverni jonski vrtlog; AC, Alžirska struja; NC, Sjeverna struja; NTG, Sjeverni tirenski vrtlog; SG, Sidra vrtlog; MIJ, Srednja jonska struja; SAG, Južni jadranski vrtlog; WAC, Zapadna jadranska struja; PG, Pelopski vrtlog; MMJ, Srednja sredozemna struja; LEC, Libijsko-egipatska struja; IG, Ierapetra vrtlog; RG, Rodos vrtlog; MMG, Mersa-Matruh vrtlog; CG, Ciparski vrtlog; SSE, Južni Shikmona vrtlog; and NSE, Sjeverni Shikmona vrtlog [15].

5.2. Godišnji hod srednje razine Sredozemnog mora

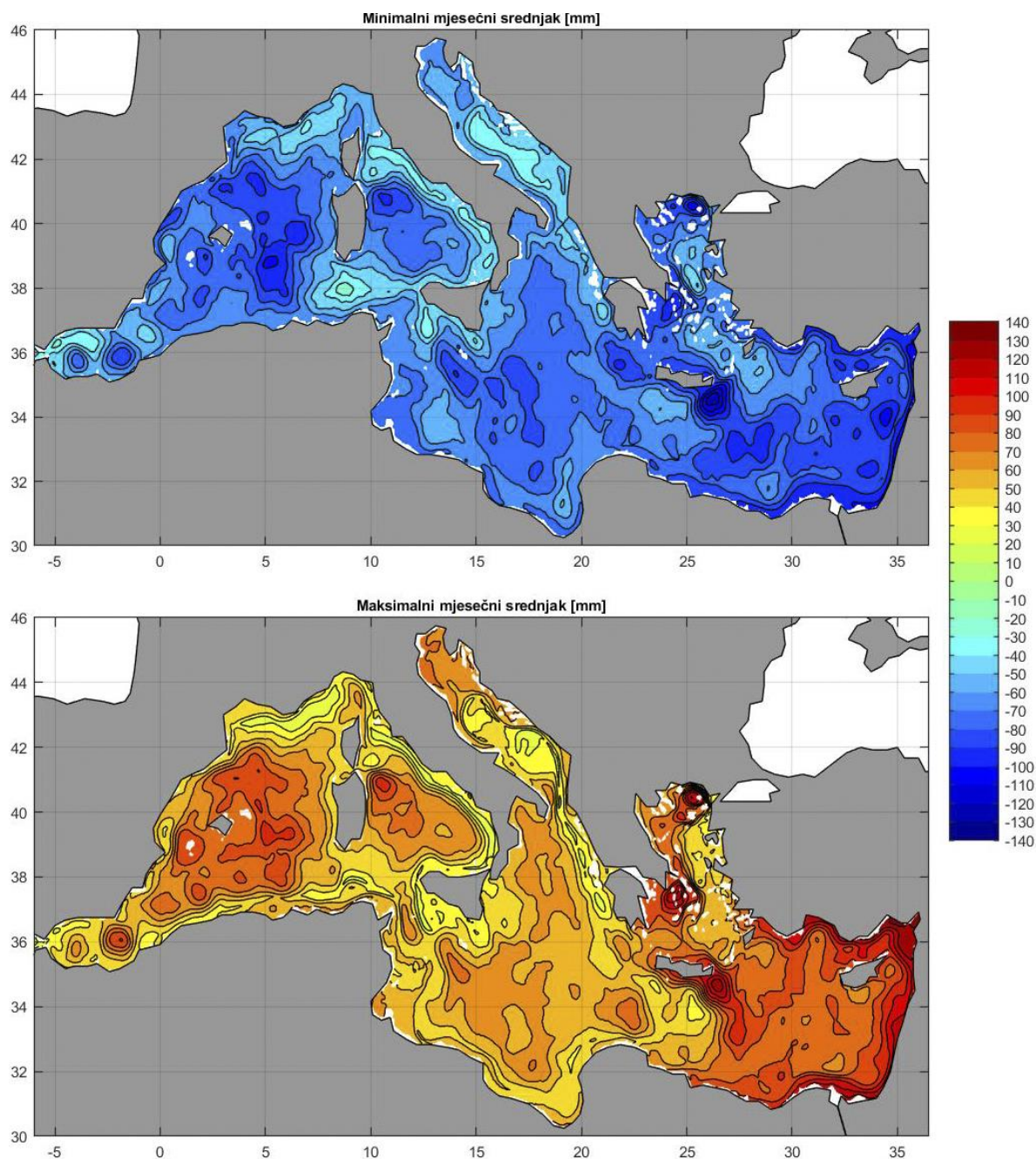
Reanaliza godišnjeg hoda razine mora otkriva nam da su razlike između mjeseca s najnižom i mjeseca s najvišom razinom mora izraženije na istočnom Sredozemlju. Godišnji hod je najslabije izražen u srednjem i južnom Jadranu, te na istočnim obalama Tirenskog mora (**Slika 20**).



Slika 20. Prosječni godišnji raspon razine mora

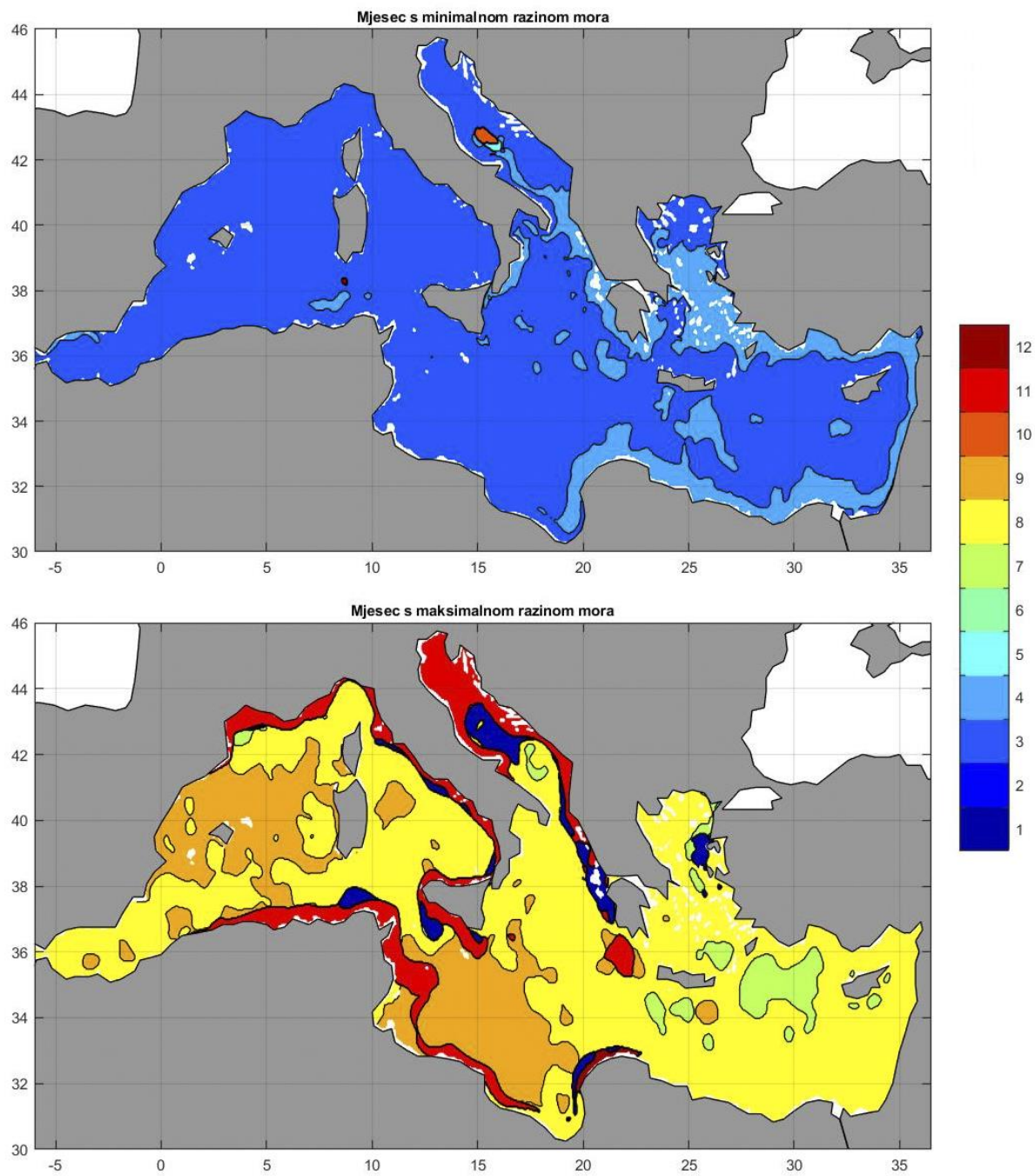
Na Jadranskom moru se najveći raspon srednjeg godišnjeg hoda bilježi na sjevernom dijelu, a na Sredozemlju na istočnoj obali Levantskog mora te unutar Iarapetra vrtloga. Općenito, raspon srednje godišnje razine mora na Jadranu se kreće od 40 do 150 mm, a u preostalom dijelu Sredozemnog mora do 260 mm.

Minimalni mjesečni srednjak razine mora na Jadranu iznosi 40 do 70 mm ispod prosjeka, na zapadnom Sredozemnom moru od 20 do 100 mm, a na istočnom od 40 do 140 mm (**Slika 21**). Maksimalna mjesečni srednjak na Jadranu se kreće od 20 do 80 mm, na zapadnom Sredozemnom moru do 100 mm, a na istočnom do 140 mm s maksimumom u Levantskom moru.



Slika 21. Minimalne i maksimalne srednje mjesečne vrijednosti razine mora.

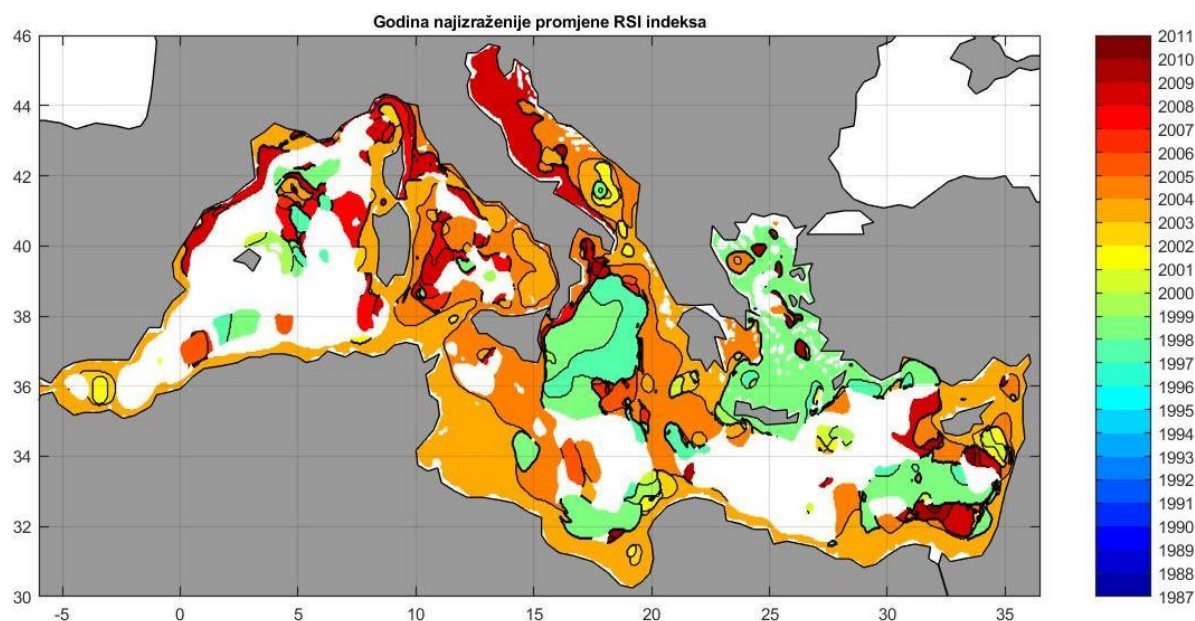
Gotovo na cijelom Sredozemnom moru i većem dijelu Jadranskog mora ožujak je mjesec s prosječno najnižom razinom mora u godini. U istočnom Sredozemnom moru uže područje uz obalu minimalne srednje mjesečne vrijednosti bilježi u travnju (**Slika 22**). Što se tiče najviše mjesečne razine mora, ona se u prosjeku na većem dijelu Sredozemlja bilježi u kolovozu, no lokalne razlike su velike. Jug Sredozemnog mora i Balearsko more maksimalne srednje mjesečne razine mora bilježe u rujnu, a veći dio Jadranskog mora, te obala Tirenskog mora i južnog Sredozemnog mora maksimalne vrijednosti može očekivati u studenom.



Slika 22. Mjeseci s minimalnom i maksimalnom srednjom razinom mora.

5.3. Promjene klimatskih režima

Nakon određivanja godišnjeg hoda odredio sam promjene režima (odnosno RSI indeksa) na prostoru Sredozemnog mora. Prema modelu, najsnažnija promjena režima na većem dijelu Jadranskog mora dogodila se 2008. godine, osim na krajnjem jugu i dijelu otvorenog mora srednjeg i južnog Jadrana gdje se ističe promjena 2003. godine (**Slika 23**).

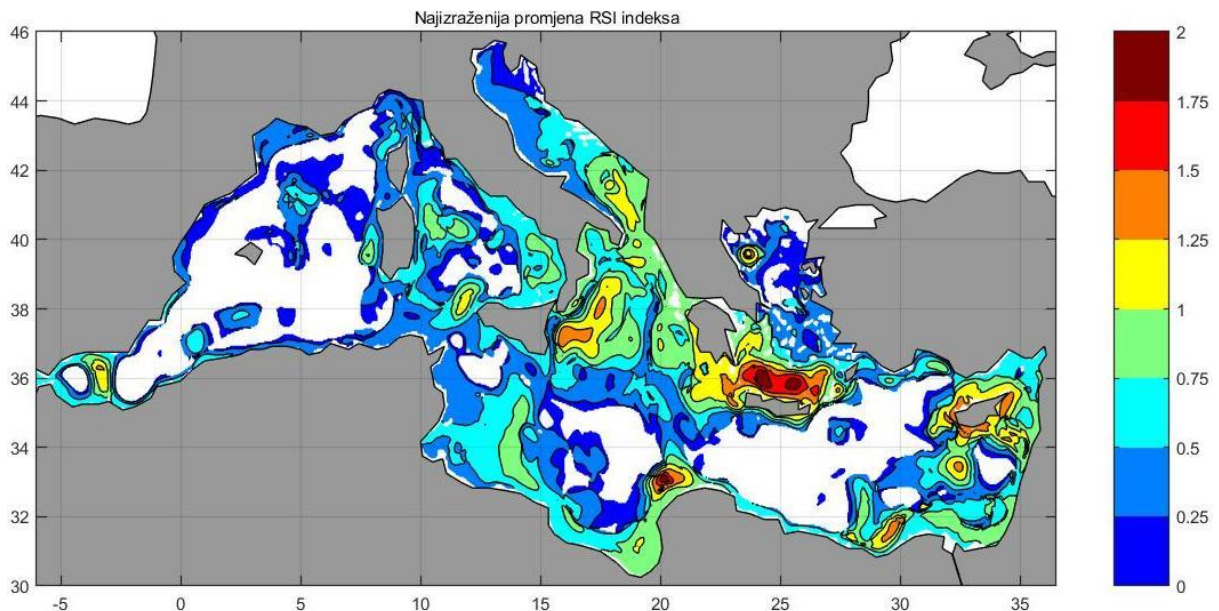


Slika 23. Godina s najjačom promjenom RSI indeksa na Sredozemlju.

Promjena režima oko 2003. godine dominantna je u većem dijelu obalnog područja Sredozemnog mora, sa značajnim razlikama na području Egejskog i Jonskog mora gdje se ističe promjena oko 1998. godine. Zanimljivo je da je ova godina u kojoj se na mjerenim nizovima bilježi promjena režima i u Jadranskom moru, ali ne i na modeliranim. Na otvorenom moru zapadnog i nešto manjeg dijela istočnog Sredozemlja postoje područja na kojima se promjena režima u promatranom razdoblju nije dogodila.

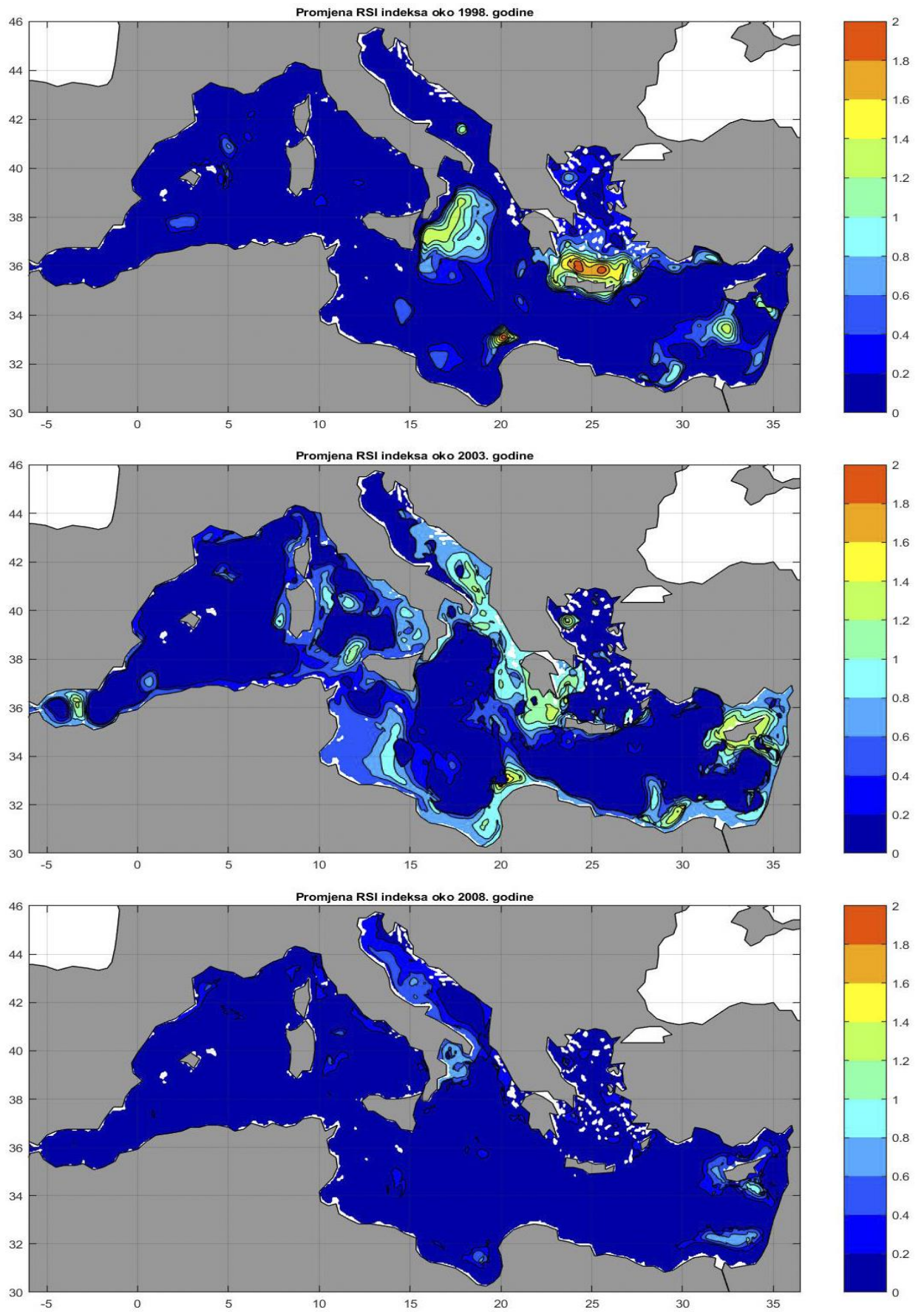
Na cijelom obalnom području Sredozemnog mora u promatranom razdoblju došlo je barem jednom do promjene režima, a općenito su promjene RSI indeksa izraženije na području istočnog Sredozemlja s ekstremnim maksimalnim vrijednostima u Egejskom (Kretskom) moru (**Slika 24**). Od ostalih područja može se izdvojiti još Levantsko more (područje oko Cipra), Jonsko more i južni dio Jadranskog mora (**Slika 24**).

Najizraženije modelirane promjene režima vidljive su u područjima gdje se nalaze vrtlozi, što ukazuje na promjene cirkulacijskih režima. Područja stalnih strujanja poput Alžirske struje (AC), Sjeverne struje (NC), Srednje jonske struje (MIJ), Libijsko-egipatske struje (LEC) i Zapadne jadranske struje (WAC) imaju vrlo male promjene režima ili ih nemaju uopće.



Slika 24. Najizraženija promjena RSI indeksa na Sredozemlju u razdoblju 1987-2020. godine.

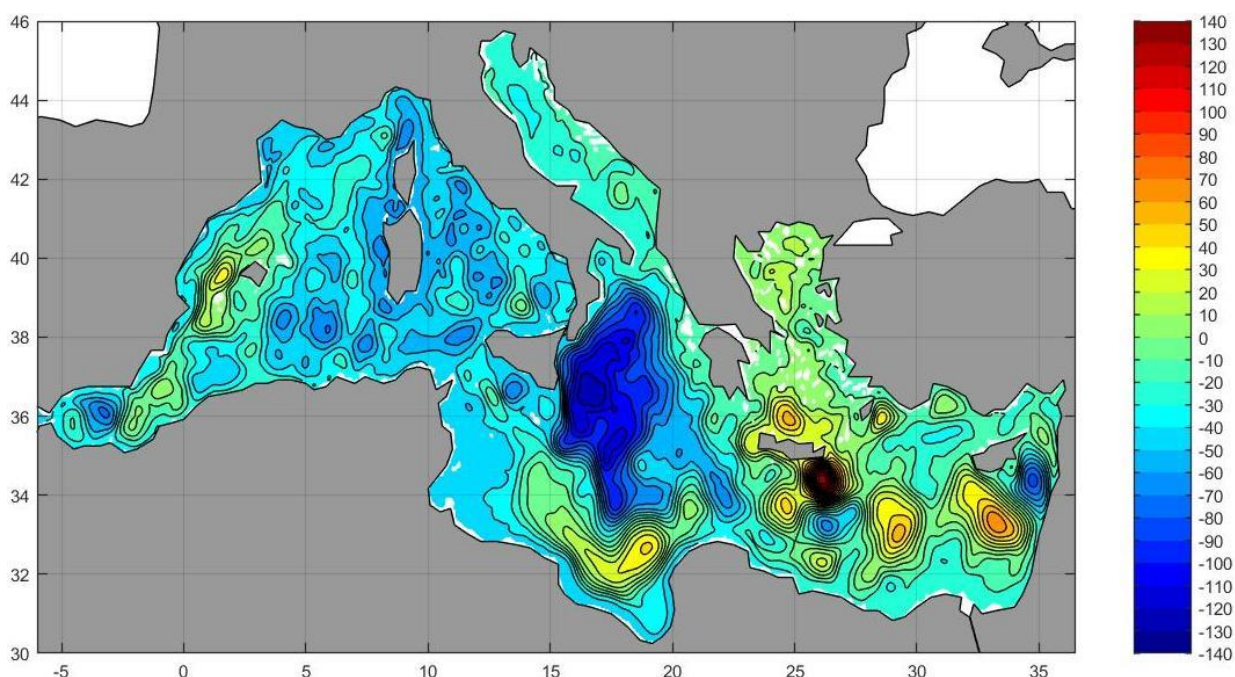
Promjena režima oko 2003. godine dominantna je na površinom najvećem dijelu Sredozemnog mora. Ova promjena obuhvaća cijelo južno obalno područje istočnog i zapadnog bazena, cijelo obalno područje Tirenskog, Jonskog i Levantskog mora, te dio srednjeg i južnog Jadranskog mora (**Slika 25**). Promjena RSI indeksa 2003. godine varira u prostoru, ali stupnjevito raste od zapadnog prema istočnom dijelu područja. Cijelo Egejsko more, otvoreno Jonsko i dio Levantskog mora najznačajniju promjenu prošli su 1998. godine. Ova promjena režima površinom je druga najveća na Sredozemlju, a po maksimalnim iznosima RSI indeksa je i najjača. Ova promjena posebno se ističe na području Kretskog mora te sjevernog Jonskog vrtloga. Na području Jonskog mora promjena ukazuje na završetak razdoblja u kojem je cirkulacijom sjevernog Jonskog mora dominirao anticiklonalni vrtlog te početak razdoblja u kojem je cirkulacijom dominirao ciklonalni vrtlog [16]. Može se primijetiti kako su neka područja Egejskog, Jonskog i Levantskog mora doživjela promjene 1998. i 2003. godine. Trećom istaknutom promjenom režima obuhvaćen je cijeli Jadran, sjeverno obalno područje Jonskog mora, istočno obalno područje Tirenskog mora, te dio Levantskog mora, najizraženije oko Cipra.



Slika 25. Promjena RSI indeksa u režimima 1998., 2003. i 2008. godine

5.3.1. Utjecaj promjene režima 1998. godine na razinu Sredozemnog mora

Promjena režima 1998. godine najviše se ističe na području Jonskog mora, čija je srednja godišnja razina te godine bila značajno niža od srednje godišnje razine za razdoblje 1987-2020 godine. Odstupanja na ovom području kreću se od -10 do -125 mm (**Slika 26**). Kao što je već navedeno, Jonski je vrtlog u ovom razdoblju prešao iz anticiklonalne u izraženu ciklonalnu fazu, pri čemu ciklonalnu fazu karakterizira niža razina mora u Jonskom moru [9].

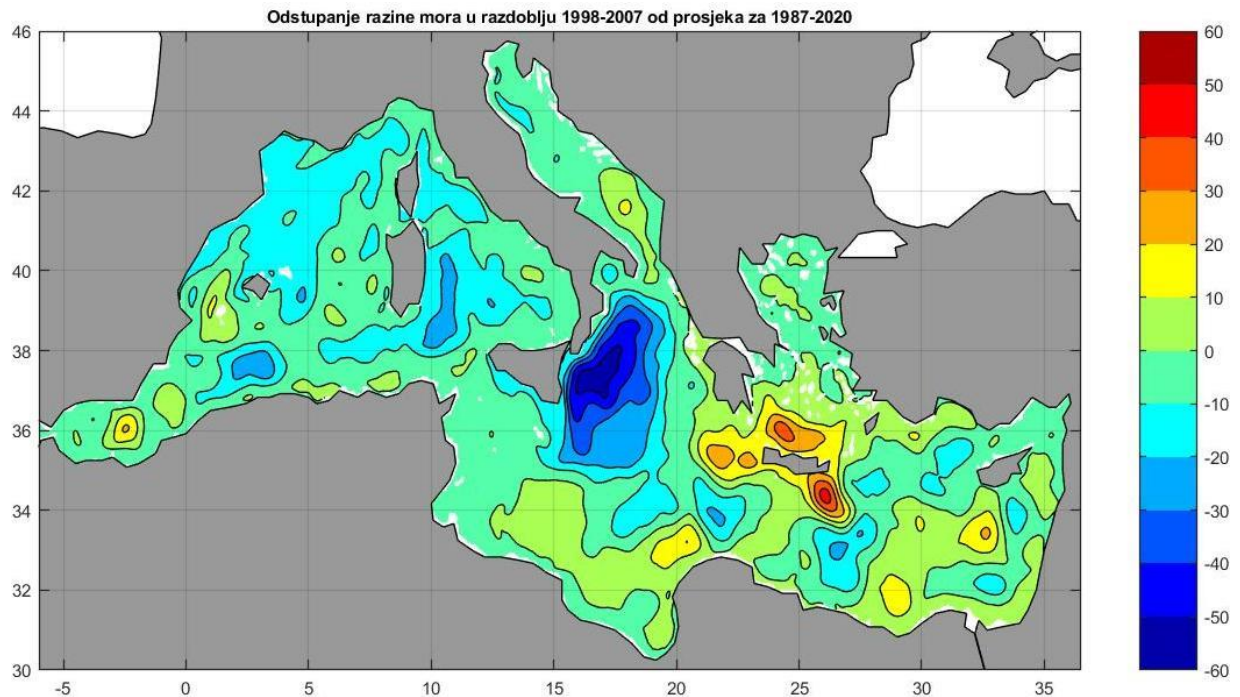


Slika 26. Odstupanje razine mora 1998. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

Uz Jonsko more, u većem dijelu zapadnog Sredozemlja razina mora 1998. godine je također bila niža od prosječne. Srednja razina Tirenskog mora i većeg dijela Balearskog mora iznosila je od -65 do 0 mm. Pozitivna odstupanja, do 35 mm, modelirana su na krajnjem zapadu Sredozemnog mora.

Na Jadranskom moru također su reproducirane razine mora do 35 mm niže od prosječnih, što je predznakom u skladu s mjerenjima (**Slika 3**), ali ne i apsolutnim iznosom koji je u modelu podcijenjen. Od izraženijih pozitivnih odstupanja ističe se južna obala istočnog Sredozemlja i Levantsko more. Najviše vrijednosti ima vrtlog Ierapetra (do +150 mm), te Kretski i Mersha-Matruh vrtlog, koji su očito u tom razdoblju bili u snažnoj anticiklonalnoj fazi.

S obzirom na to da je za duljinu trajanja režima odabran period od $l = 10$ godina, odredio sam odstupanje srednje razine mora u razdoblju 1998-2007 godine u odnosu na cijelo reanalizirano razdoblje 1987-2020. (Slika 27).



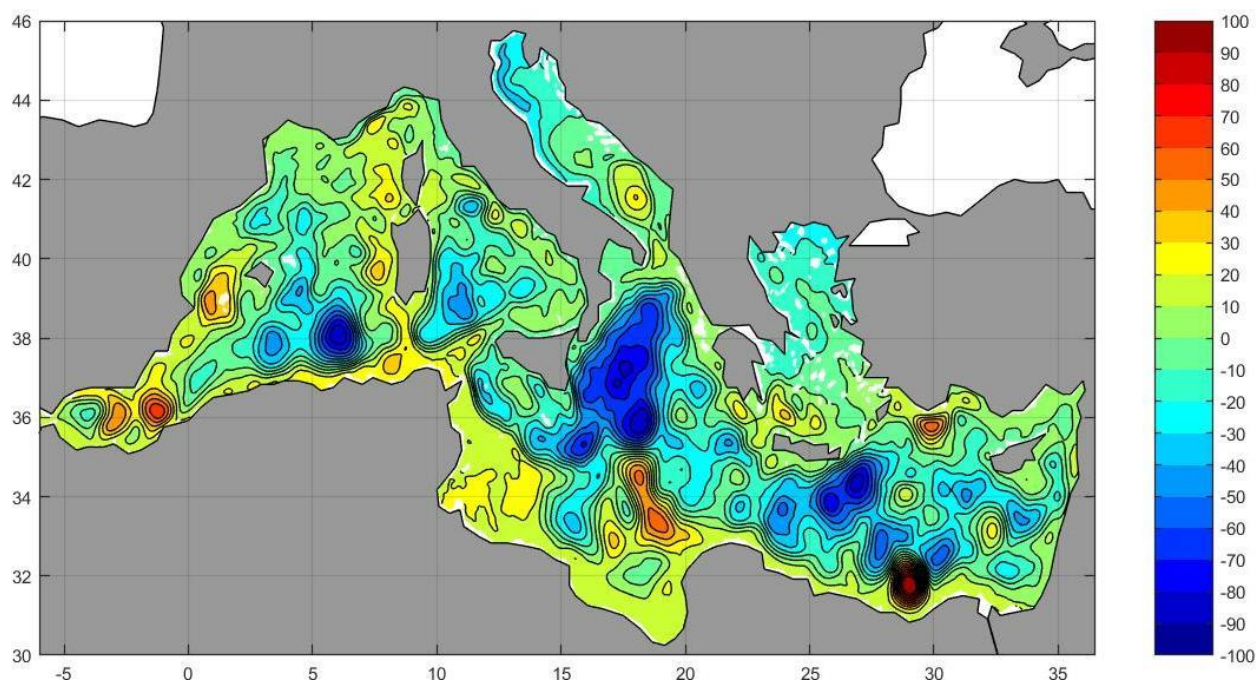
Slika 27. Odstupanje razine mora 1998-2007. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

Najveća odstupanja u ovom razdoblju primjećuju se u Jonskom moru (do -60 mm) koje je gotovo cijelom svojom površinom ispod prosjeka za promatrano razdoblje. Jedino izraženije pozitivno odstupanje ima Pelopski vrtlog (do +25 mm). Uz manje iznimke, poput Alboranskog vrtloga (+20 mm), veći dio zapadnog Sredozemnog bazena je malo ispod prosjeka (od -25 do 0 mm).

Egejsko more, u kojem se ova promjena također izraženo osjetila, ima izraženo pozitivno odstupanje u području sjeverno od Krete (do +35 mm). Levantsko more uglavnom bilježi razine oko prosjeka, uz iznimku anticiklonalnih vrtloga Ierapetra (do +45 mm), Ciparski (do +25 mm) i Mersha-Matruh (do +10 mm). Na sjevernom i srednjem Jadranu razina mora je neznatno ispod prosjeka, dok je u ciklonalnom južnom Jadranskom vrtlogu iznad prosjeka (do +13 mm), što ukazuje na slabiji vrtlog od prosjeka. Mjerenja u Jadranskom moru pokazuju da se u tom razdoblju razina mora na postajama kretala oko srednje razine, odnosno oko 0 mm (Slika 3), a modelirane vrijednosti od -10 do +13 mm.

5.3.2. Utjecaj promjene režima 2003. godine na razinu Sredozemnog mora

Promjena režima 2003. godine obuhvaća većinu obalnog područja (Slika 23, Slika 25). Na Slici 28 vidljivo je da je za cijelo južno obalno područje Sredozemlja te za istočnu obalu Balearskog mora (Sardinija i Korzika) te godine reproducirana od 10 do 40 mm viša srednja razina mora u odnosu na razdoblje 1987-2020. Do 10 mm viša razina razina modelirana je i na istočnoj obali Jonskog mora (Grčka) te na istočnoj obali Levantskog mora.



Slika 28. Odstupanje razine mora 2003. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

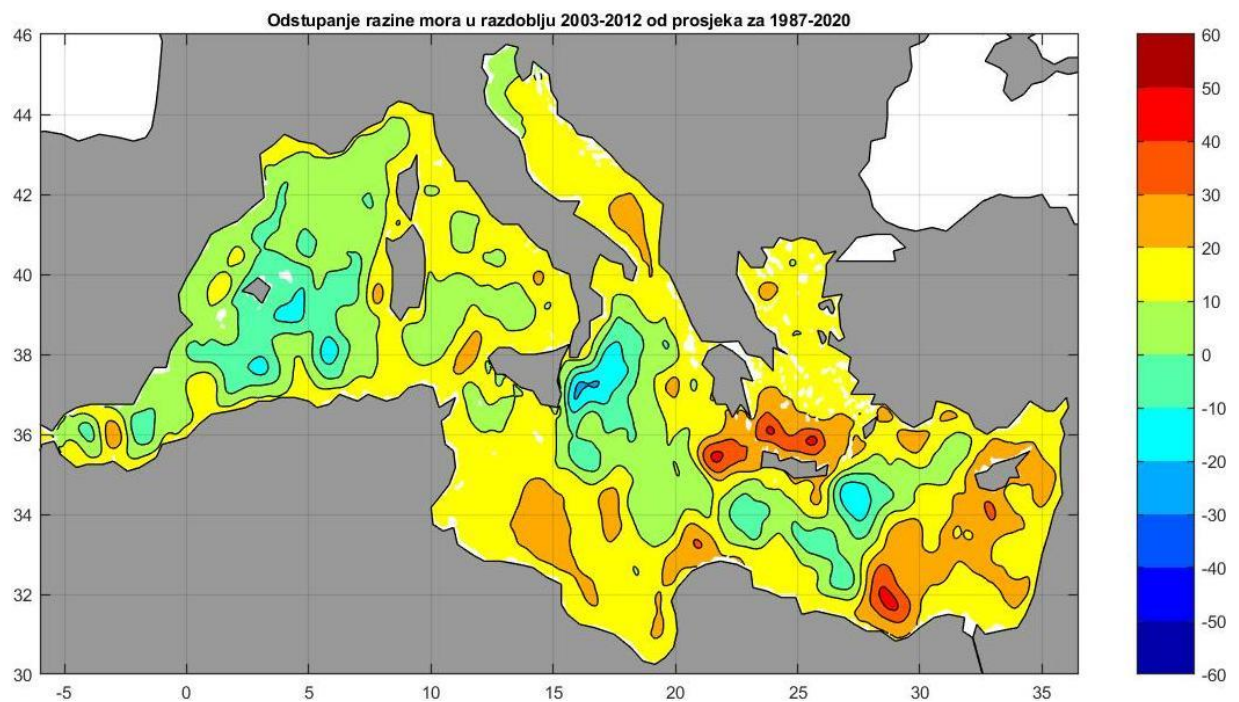
Na Balearskom moru, posebno južni dio, izraženo je negativno odstupanje (do -90 mm). Veliko područje Jonskog mora čiji je vrtlog 2003. godine bio u ciklonalnoj fazi [9] također ima izraženo negativno odstupanje (do -90 mm), kao i otvoreno Levantsko more.

Na većem dijelu Jadranskog mora, osim otvorenog južnog dijela reproducirano je negativno odstupanje (od -35 mm na sjevernom dijelu do +30 mm na otvorenom moru južnog Jadrana). Otvoreno Tirensko more i veći dio Egejskog mora su ispod prosjeka (od -30 do 0 mm). U desetgodišnjem razdoblju od 2003. do 2012. godine vidljivo je pozitivno odstupanje na cijelom području istočnog Sredozemnog mora, te na cijeloj južnoj obali oba bazena. Najveća negativna odstupanja (do -20 mm) su u manjem zapadnom pojasu

otvorenog Jonskog mora, te na zapadnom Levantskom moru i dijelu Balearskog mora (Slika 29).

Egejsko more bilježi pozitivno odstupanje (10 - 30 mm), uz zadržano (u odnosu na prethodno razdoblje) izraženo pozitivno odstupanje sjeverno od Krete (do +40 mm), zbog čega nije došlo do promjene režima. Istočno i južno obalno područje Levantskog mora također bilježi promjenu režima te je razina mora na njemu viša za 10 do 45 mm. Tirensko more, posebno obalno područje, u ovom razdoblju ima 15 do 25 mm višu razinu mora.

U Jadranskom moru promjena režima 2003. godine dogodila se na južnom i dijelu srednjeg Jadrana (Slika 25). Odstupanje od prosjeka je na cijelom području bilo pozitivno, od 7 mm na krajnjem sjeveru do 27 mm u južnom Jadranskom ciklonalnom vrtlogu.

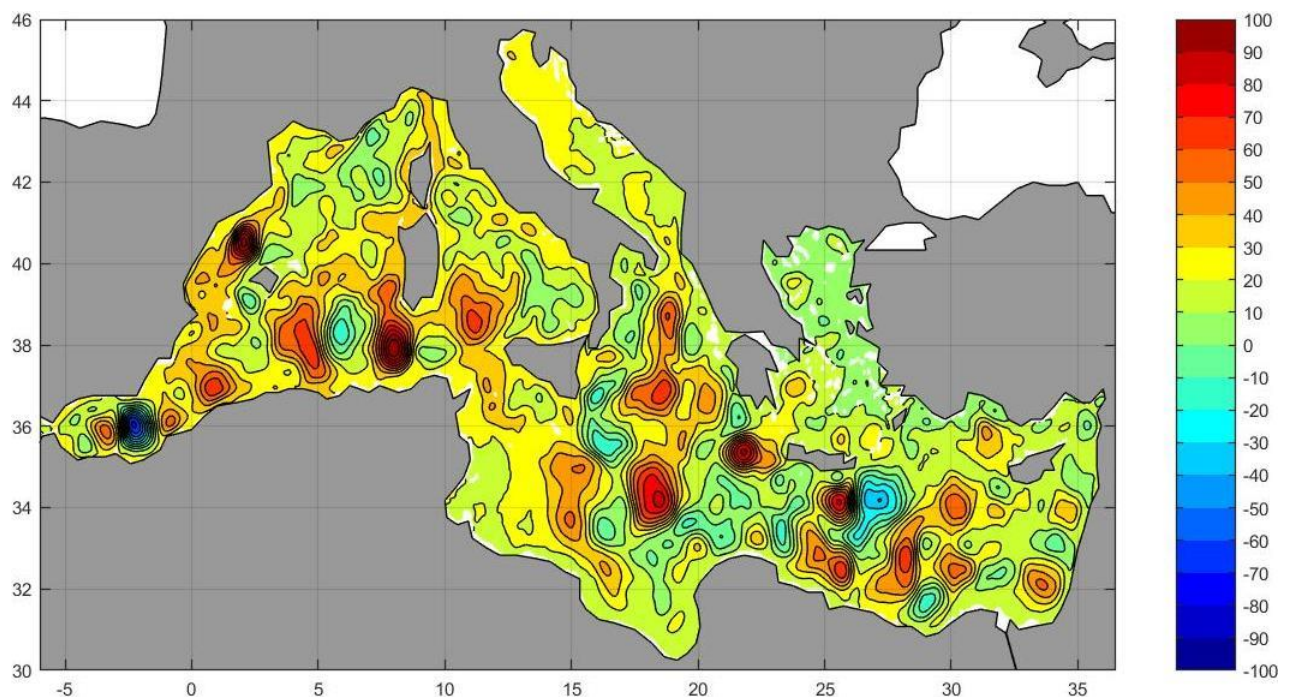


Slika 29. Odstupanje razine mora 2003-2012. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

5.3.3. Utjecaj promjene režima 2008. godine na razinu Sredozemnog mora

Promjena režima 2008. godine bila je regionalnog karaktera (**Slika 25**) te se uglavnom osjetila na području sjevernog dijela Sredozemlja (veći dio Jadranskog mora, istočna obala Tirenskog mora i sjeverni dio Jonskog mora).

U ovoj promjeni režima za cijeli Jadran reproducirana je od 10 do 30 mm viša srednja razina mora u odnosu na cijelo promatrano razdoblje (1987-2020.). Veće pozitivno odstupanje modelirano je za sjeverni Jadran i za područje Otrantskih vrata (**Slika 30**).



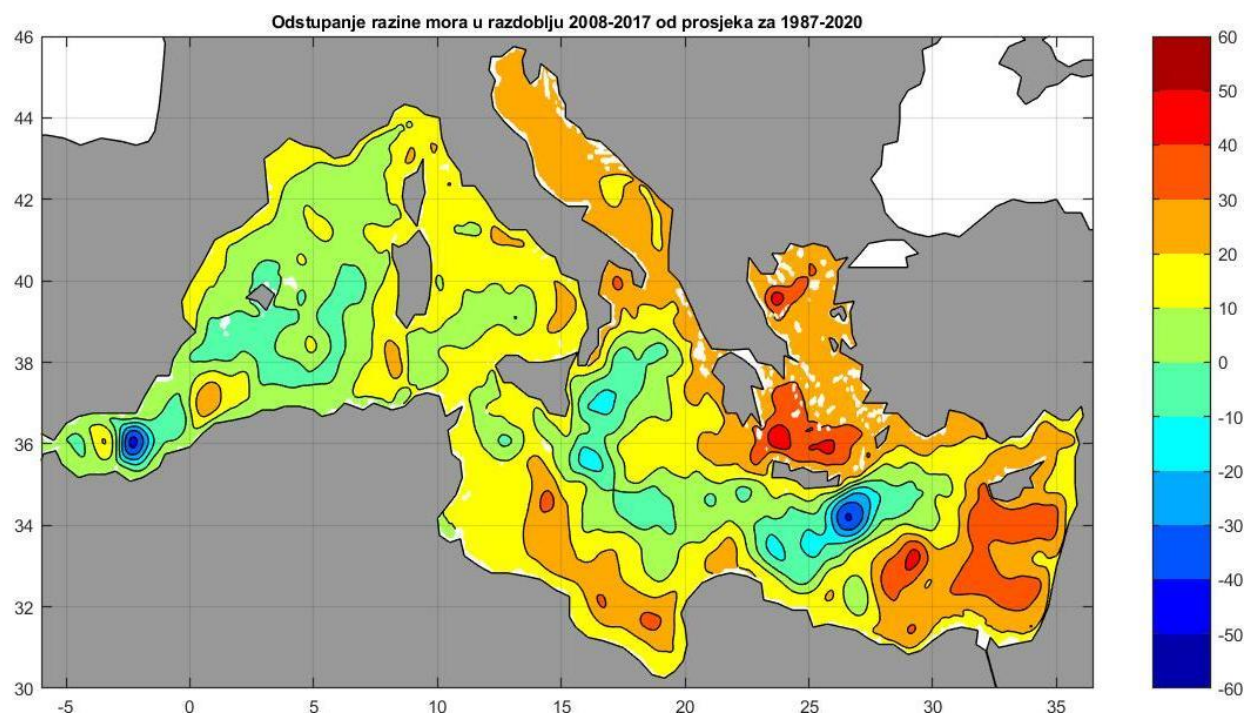
Slika 30. Odstupanje razine mora 2008. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

Pozitivno odstupanje od oko 25 mm modelirano je i za istočnu obalu Tirenskog mora, te sjeverozapadno obalno područje Balearskog mora gdje je promjena režima ove godine također bila najizraženija. Na području cijelog Sredozemlja vidljiva su uglavnom pozitivna odstupanja koja su, za razliku od 2003., sada izraženija na otvorenom moru, uz iznimku Jadrana.

Prilikom promatranja promjene režima srednje razine mora, treba imati na umu da se na zapadnom i južnom Sredozemnom moru viši rasponi godišnjeg hoda bilježe dalje od obale,

dok se na Jadranu i istočnom Sredozemnom moru viši rasponi godišnjeg hoda bilježe uz obalu (**Slika 20**).

U razdoblju od 2008. do 2017. godine nastavlja se režim povišene razine mora (od +10 do +30 mm) na obalnim područjima istočnog Sredozemlja. Cijelo Egejsko more, posebno sjeverno od Krete, ostaje iznad prosjeka (20-50 mm), kao i istočno Levantsko more (od 15 mm uz obalu do 45 mm na otvorenom moru (**Slika 31**).



Slika 31. Odstupanje razine mora 2008-2017. godine u odnosu na srednju vrijednost 1987-2020.

Najjače negativno odstupanje vezano je uz vrtlog Ierapetra jugoistočno od Krete (do -40 mm), a slabija negativna odstupanja (do -15 mm) postoje još na otvorenom Jonskom moru. Na području Jadrana, koji je cijeli prošao kroz promjenu režima, razina mora viša je za 18 do 30 mm od prosjeka. Na sjevernim obalama Balearskog i obalnim područjima Tirenskog mora razina mora viša je od prosjeka je od 10 do 25 mm, a na sjeveru Jonskog mora do 35 mm.

6. Diskusija i zaključci

U ovom radu analizirao sam podatke o razini mora na 6 mjernih postaja na Jadranu u razdoblju od 1987. do 2018. godine. Za postaje Trst, Venecija, Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik određena je srednja razina mora i trend njenog kretanja. Osim kretanja razine mora u cijelom razdoblju, odredio sam i godišnji hod srednje razine mora te promjene režima. Među promatranim postajama otkrivena je visoka korelacija izmjerenih podataka (**Tablica 1**), te je na svim postajama zabilježen uzlazni linearni trend rasta srednje razine mora.

Na svim mjernim postajama izražen je godišnji hod srednje razine mora. Sezonske oscilacije razine Jadranskog mora dominantno su potaknute godišnjim tokom topline i vode na površini mora, što ima za posljedicu rast i pad volumena gornjih slojeva i promjenu razine mora – sterički efekt [17]. Velike sezonske varijacije toka topline nad Jadranom dominantno se očituju u stvaranju, razvoju i razgradnji termokline i toplinskom širenju. Najviše razine mora javljaju se tijekom nestanka piknokline u jesen (listopad–prosinac), a najniže u proljeće i ljeto. Minimalna vrijednost razine mora u ožujku posljedica je zimskog hlađenja mora, a niska razina mora tijekom ljeta izrazito negativne bilance vode na površini (najjače isparavanje i najmanja količina oborina) [18].

Najmanja standardna devijacija razine mora bilježi se tijekom ljetnih, a najveća tijekom zimskih mjeseci, što ukazuje na ovisnost o stabilnosti vremena. Srednje vrijednosti tlaka zraka znatno više osciliraju u hladnom, nego li u toplom dijelu godine [19].

Promatranjem mjesečnih podataka i njihovog odstupanja od prosjeka vidljivo je da uz sezonska odstupanja postoje i promjene režima neovisne o godišnjim dobima. Zbog toga sam odredio godine s najznačajnijim promjenama režima. Na većini postaja najznačajnije promjene režima dogodile su se 1997. i 2009. godine.

Kao i u slučaju mjerenja, podaci modela Mediterranean Sea Physics Reanalysis ukazuju na uzlazni linearni trend te godišnjih hod, s minimalnim i maksimalnim vrijednostima u istim mjesecima kao i u izmjerenim podacima. Prilikom analize treba uzeti u obzir da je ukupan trend kretanja razine mora rezultat dekadske varijabilnosti razine mora te trenda, pri čemu na trend dominantno utječe sterički efekt, rast razine mora zbog otapanja ledenjaka, te atmosferski uvjeti i vertikalno gibanje tla (model ne uzima u proračun vertikalno gibanje

tla). Korištenjem Rodionovog algoritma, pokazalo se da model kao godinu najznačajnije promjene režima na Jadranskom moru vidi 2008. godinu.

Analizom mjerenih i modeliranih podataka uočavaju se sličnosti između izračunatih trendova, sezonalnosti i promjene režima. Bias modeliranih u odnosu na izmjerene podatke je malen, dok je varijanca najizraženija na postajama sjevernog Jadrana. Prema izmjerenim vrijednostima vidljivo je da varijabilnost ovisi o dubini, geografskom položaju i reljefu postaje. Na varijabilnost utječe više parametara, a općenito je povećana u plitkim, zatvorenim morima i kanalima.

Kod usporedbe mjerenja i modela treba imati na umu da je rezolucija modela $1/24^\circ$ (oko 4 kilometra) zbog čega se ne mogu prepoznati lokalni fenomeni, pa i sami položaj nekih postaja poput Bakra. Iako model u proračun uključuje podizanje razine mora zbog topljenja ledenjaka, tok atlantske vode kroz Gibraltar i termalnu ekspanziju, pojave poput vertikalnog kretanja tla nisu uzete u obzir pa to na lokacijama poput Venecije stvara značajne razlike u mjerenom i modeliranom trendu razine mora [8].

Usporedbom podataka mjernih postaja i modela utvrdio sam zadovoljavajuću sposobnost modela da reanalizira kretanje razine mora u različitim vremenskim intervalima, te sam iskoristio modelirane podatke da reanaliziram trend razine mora, sezonalnost i promjene režima na području cijelog Sredozemlja i to za razdoblje od 1987. do 2020.

Razina mora u većem dijelu Sredozemlja raste (**Slika 18**), a to je posebno izraženo na istočnom Sredozemlju (do 4.5 mm u Egejskom moru). Ipak, postoje područja u kojima je zabilježen negativan trend poput vrtloga Ierapetra i Jonskog mora (do -2.1 mm/god).

Anomalija u Jonskom moru posljedica je promjene cirkulacije. Od 1987. do 1997. godine u Jonskom moru bio je izražen anticiklonalni vrtlog (karakteriziran povišenom razinom mora u središtu) koji je 1998. prešao u ciklonalnu fazu (karakterizirana sniženom razinom mora u središtu) u kojoj je bio sve do 2005. godine, kada je ponovno zavladao kraća faza anticiklonalnog vrtloga do 2010. godine [20]. Tada je nastupila nova ciklonalna faza sve do 2016., pa uz kraću anticiklonalnu fazu 2017-2018., ponovno od 2019. do kraja promatranog razdoblja [21].

Raspon godišnjeg hoda najniži je na području Jadrana, a najviši na istočnim obalama Levantskog mora (**Slika 21**). Na Jadranu se najveći raspon bilježi na sjevernom dijelu, te u obalnim područjima manje dubine. Na razinu Jadranskog mora posebno utječe ciklonalna aktivnost tijekom hladnijeg dijela godine, te efekt olujnog uspora koji je posljedica

sniženog tlaka zraka i višednevnog puhanja juga. Većina intenzivnih ciklona u Sredozemlju formira se na području Tirenskog te propagira iznad Tirenskog i Jadranskog mora. [22]

U zapadnom Sredozemlju prosječni godišnji raspon razine mora uglavnom je viši na otvorenom moru, no minimalne vrijednosti nisu smještene na samoj obali, već u neposrednoj blizini što ukazuje na utjecaj atmosferskih poremećaja na razinu mora u područjima manje dubine. Općenito, na cijelom području Sredozemnog mora veći raspon modeliran je i na područjima vrtloga, što karakterizira njihovu sezonalnost. Na istočnom Sredozemlju prosječni godišnji raspon razine mora raste, te je najveći na obalnom području Levantskog mora i otvorenom Jonskom moru.

Na velikom dijelu Sredozemnog mora ožujak je mjesec s najnižom prosječnom razinom mora, osim u dijelu obalnog područja istočnog Sredozemnog mora gdje se minimalni prosjek očekuje u travnju. Kolovoz je mjesec s maksimalnom srednjom razinom mora za veći dio Sredozemnog mora, no lokalne razlike su velike. Tako se primjerice za veći dio Jadranskog mora maksimalne vrijednosti reproduciraju u studenom, kao i na obalnom području sjevernog Sredozemnog mora te na sjevernoj obala Afrike. Ova razlika na području Jadrana i obalama zapadnog Sredozemlja posljedica je osjetljivosti na atmosferski utjecaj. Prosječna temperatura Sredozemnog mora najniža je tijekom ožujka (14.1°C), a najviša u kolovozu (24.3°C), pa iz **Slike 22** možemo zaključiti da najveći utjecaj na većini područja ima termalna ekspanzija [23].

Zbog visoke prostorne korelacije između anomalije razine mora i površinske temperature mora u istočnom Sredozemlju, trend kretanja površinske temperature ukazuje na jačanje termosteričkog efekta, koji je glavni faktor kontrole trenda razine mora. Razina mora i njegova površinska temperatura rastu (ili padaju) zajedno istovremeno na istočnom Sredozemlju jer termosterički efekt ima jak utjecaj na razinu mora istočnog Sredozemlja, posebno u Levantskom moru. Ovo objašnjava i veliki raspon između maksimalne i minimalne srednje mjesečne vrijednosti razine mora [24].

Najznačajnije promjene režima na cijelom Sredozemlju dogodile su se oko 1998. i 2003. godine. Na Jadranu je najizraženija promjena bila oko 2008. godine. Općenito, RSI indeks izraženije se mijenjao na istočnom Sredozemlju.

U razdoblju od 1987. do 1997. u Jonskom moru prevladavalo je jako anticiklonalno strujanje, karakterizirano do 70 mm višom srednjom petgodišnjom razinom mora na tom području u razdoblju 1987-1991. koju je model reproducirao (**Slika A u prilogu**). S ovim se podudara jačanje Jadranskog ciklonalnog vrtloga, karakteriziranog do 50 mm nižom srednjom petgodišnjom razinom mora u vrtlogu za razdoblje 1987-1991. (**Slika A u prilogu**).

U razdoblju 1992-1996. nastavlja se značajna pozitivna anomalija u Jonskom moru, koja se pomiče prema zapadu i sjeveru područja. Jadransko more u ovom razdoblju bilježi u većem dijelu područja dodatan pad razine mora u odnosu na razdoblje 1987-1991. pa se srednje vrijednosti cijelog područja Jadrana kreću od 25 do 45 mm ispod prosjeka (**Slika A u prilogu**).

1998. godine javlja se promjena režima koja je bila najizraženija na području Jonskog mora te u južnom Egejskom moru sjeverno od Krete. Početkom 1998. godine Jonsko more prelazi u ciklonalno strujanje te u njemu ostaje do kraja 2004. godine. U razdoblju 1997-2002. srednja petgodišnja reproducirana razina mora pada do 70 mm ispod prosjeka, dok je u južnom Jadranu vidljivo slabljenje ciklonalnog vrtloga i manje pozitivno odstupanje do 10 mm. Razina većeg dijela Jadranskog mora ostaje do 10 mm ispod prosjeka, što je manji rast u odnosu na razdoblje 1992-1996 (**Slika A u prilogu**).

Model u ovom slučaju na Jadranu vidi promjenu režima samo na uskom području južne Jadranske ciklone, dok su mjerenja jasno istaknula 1997. godinu na svim postajama. Na postajama Bakar, Rovinj, Split i Dubrovnik to je najjača promjena režima (**Slika 7**). Usporedbom mjerenih (**Slika 3**) i modeliranih (**Slika 8**) vrijednosti srednje godišnje razine mora vidljivo je da je u početnom razdoblju (1987-1997.) na svim postajama mjereno značajno negativno odstupanje koje je na svim postajama padalo 70 do 100 mm ispod prosjeka, dok su podaci modela ukazivali na vrijednosti uglavnom neznatno niže od prosjeka. Razlog manje točnosti i lošijeg prepoznavanja promjene režima 1997. godine na Jadranu vjerojatno se krije u nedostatku točnijih podataka satelitskih mjerenja koji su dostupni od 1993. godine [20].

Na **slici 27** vidljivo da se u desetgodišnjem razdoblju 1998-2007. ističe ciklonalni Jonski vrtlog (do 60 mm ispod prosjeka) i slabiji ciklonalni vrtlog u Jadranskom moru (do 20 mm iznad prosjeka).

Analizom najznačajnije promjene režima na Sredozemlju (2003) vidljivo je da cijeli obalni pojas južnog dijela područja ima značajno povišenu razinu mora, te istočna obala Jonskog i Levantskog mora. 2003. godine započinje slabljenje ciklonalnog vrtloga u Jonskom moru te je u razdoblju 2005-2010. cirkulacija u Jonskom moru u anticiklonalnoj fazi.

Srednja razina mora u razdoblju 2002-2006. (**Slika B u prilogu**) na zapadu Jonskog mora i dalje je do 50 mm ispod prosjeka dok su ostala područja od -10 do +10 mm u odnosu na prosječne vrijednosti. Slabljenje ciklonalnog Jonskog vrtloga i prelazak u anticiklonalnu fazu praćen je i slabljenjem ciklonalne cirkulacije u južnom Jadranu pa je na tom području u razdoblju 2002-2006. razina mora narasla do 30 mm iznad prosjeka. Na istočnoj obali Jadrana također je zabilježena manja promjena režima, a razina mora je porasla do 20 mm iznad prosjeka.

Posljednja značajnija promjena režima dogodila se oko 2008. godine i bila je regionalnog karaktera te se najviše osjetila na području Jadranskog i sjevernog dijela Jonskog mora. Na području Jonskog mora od 2005. godine javlja se anticiklonalni vrtlog čija cirkulacija traje do 2010. godine. Srednja razina Jonskog mora te sjevernog i srednjeg Jadrana od razdoblja 2002-2006. do 2007-2011. raste za 40 do 50 mm, a promjena cirkulacije vidljiva je i u Tirenskom moru kod Sardinijskog kanala i sjevernog Tirenskog vrtloga gdje razina mora također raste za 50 mm (**Slika B u prilogu**).

Na prikazu srednje razine mora (**Slika 31**) model je reproducirao do 30 mm više razine mora na većem dijelu Jadrana u razdoblju 2008-2017. U preostalom dijelu Sredozemlja bilježi se nastavak pozitivnog odstupanja od 10 do 40 mm koje je izraženije u istočnom bazenu.

Na cijelom promatranom razdoblju vidljivo je podudaranje promjene režima u Jadranskom moru s promjenom cirkulacije u Jonskom moru: srednje razine mora u razdobljima 1987-1991 i 1992-1996 otkrivaju izraženo anticiklonalno strujanje sa značajno povišenom razinom mora i ciklonalno strujanje u Jadranskom moru sa značajno nižom razinom mora u vrtlogu (**Slika A u prilogu**).

U razdobljima 1997-2001. i 2002-2006. u kojima je cirkulacija Jonskog mora bila u prosjeku većinski ciklonalna, vidljivo je slabljenje ciklonalnog vrtloga u južnom Jadranu. Potom je uslijedila ciklonalna faza s kraćim prekidima, te je razina Jadranskog mora sve više rasla.

Dekadske promjene režima 1998. i 2003. najvjerojatnije su se dogodile zbog promjene cirkulacije, što je vidljivo po promjeni RSI indeksa (**Slika 25**) i odstupanju razine mora od prosjeka u vrtlozima i okolnom području (**Slika 27**, **Slika 29** i **Slika 31**). Osim prijelaza između ciklonalnih i anticiklonalnih faza, vrtlozi također mogu mijenjati dimenzije i položaj u prostoru ovisno o atmosferskim uvjetima, kretanju ciklonalnih poremećaja i vjetru.

Ono što nije moguće otkriti iz obrađenih podataka je uzrok promjena cirkulacije koje su izazvale detektirane promjene režima, kao ni utjecaj navedenih promjena na jačinu stalnih i sezonalnih strujanja Sredozemnog mora. Uz atmosfersko forsiranje, steričko širenje, rast razine mora zbog topljenja leda, ulogu vjerojatno imaju i dekadске promjene NAO indeksa te lateralno forsiranje od strane Atlantskog oceana kroz Gibraltarski prolaz. Za daljnje istraživanje bilo bi korisno uzeti podatke o smjeru i brzini morskih struja i cirkulacijskih sustava na području cijelog Sredozemlja te otkriti kakva je njihova sezonalnost, trend i dekadska kretanja. Ovakve informacije pomogle bi detaljnije definirati povezanost cirkulacije Jadranskog i Jonskog mora, te kakav ona utjecaj ima na kemijski sastav, temperaturu, salinitet i bioraznolikost. Također, podaci o višegodišnjem hodu tlaka zraka pomogli bi otkriti koliki je i kakav atmosferski utjecaj na područjima koja su izrazito osjetljiva na meteorološke uvjete, kao što je Jadransko more i obalno područje zapadnog Sredozemlja.

Literatura

- [1] Jadransko more. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 19.7.2022.
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=28478>.
- [2] Sredozemno more. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 22. 7. 2022.
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57614>.
- [3] URL: <https://www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-sea-level-rise>
- [4] URL: <https://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>
- [5] Google Maps 2022. Pristupljeno: 15.5.2022. <https://www.google.com/maps>
- [6] Escudier, R., Clementi, E., Omar, M., Cipollone, A., Pistoia, J., Aydogdu, A., Drudi, M., Grandi, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Masina, S., Coppini, G., & Pinardi, N. (2020). Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Currents) (Version 1) set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).
https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1
- [7] Rodionov, S. N., 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts, *Geophysical Research Letters*, 31, L09204, DOI:10.1029/2004GL019448
- [8] Zerbini, Susanna & Bruni, Sara & Errico, Maddalena & Santi, Efsio. (2015). Space geodetic activities, from the early days to present, with focus on the northeastern Adriatic. *Rendiconti Lincei. Scienze fisiche e naturali*. DOI: 26. 10.1007/s12210-015-0399-0.
- [9] Wöppelmann, G., and M. Marcos (2012), Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion, *J. Geophys. Res.*, 117, C01007, DOI:10.1029/2011JC007469
- [10] Vilibić, I., Šepić, J., Pasarić, M. et al. The Adriatic Sea: A Long-Standing Laboratory for Sea Level Studies. *Pure Appl. Geophys.* 174, 3765–3811 (2017). DOI:
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1625-8>

- [11] Bakar, Republika Hrvatska, Google Maps 2022. Pristupljeno: 15.5.2022.
<https://www.google.com/maps>
- [12] Karina von Schuckmann, Pierre-Yves Le Traon, Ananda Pascual, Pierre Brasseur, Katja Fennel, Samy Djevidnia, et al. (2018) Copernicus Marine Service Ocean State Report, Journal of Operational Oceanography, 11:sup1, S1-S142, DOI:
<https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1489208>
- [13] Pinardi, N., Zavatarelli, M., Adani, M., Coppini, G., Fratianni, C., Oddo, P., et al. (2015). Mediterranean Sea large-scale low-frequency ocean variability and water mass formation rates from 1987 to 2007: A retrospective analysis. Progress in Oceanography, 132, 318–332. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.11.003>
- [14] Gačić, M., Civitarese, G., Eusebi Borzelli, G. L., Kovačević, V., Poulain, P. M., Theocharis, A., et al. (2011). On the relationship between the decadal oscillations of the northern Ionian Sea and the salinity distributions in the eastern Mediterranean. Journal of Geophysical Research: Oceans. DOI:<https://doi.org/10.1029/2011JC007280>.
- [15] Menna, M.; Gačić, M.; Martellucci, R.; Notarstefano, G.; Fedele, G.; Mauri, E.; Gerin, R.; Poulain, P.-M. Climatic, Decadal, and Interannual Variability in the Upper Layer of the Mediterranean Sea Using Remotely Sensed and In-Situ Data. Remote Sens. 2022, 14, 1322. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14061322>
- [16] Liu, F., Mikolajewicz, U. & Six, K.D. Drivers of the decadal variability of the North Ionian Gyre upper layer circulation during 1910–2010: a regional modelling study. Clim Dyn 58, 2065–2077 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05714-y>
- [17] I. Vilibić, et al., "A new approach to sea level observations in Croatia", Geofizika, vol.22, br. 1, str. 21-57, 2005. [Online]. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/136>. [Citirano: 05.09.2022.]
- [18] URL:
http://baltazar.izor.hr/azopub/indikatori_podaci_sel_detalji2?p_id=125&p_ind_tekst=d&p_ind_br=5F02&p_godina=2007&p_prikaz_graf=d&p_opis=&p_definicija=&p_pravni_okvir=&p_prikaz_sli=
- [19] Lončar, E. & Šinik, N. (1993). NEKE OSOBINE GODIŠNJEG HODA TLAKA ZRAKA U HRVATSKOJ. Hrvatski meteorološki časopis, 28 (28), 81-88. Retrieved from <https://hrcak.srce.hr/68212>
- [20] Mihanović, H., I. Vilibić, N. Dunić, and J. Sepić (2015), Mapping of decadal middle Adriatic oceanographic variability and its relation to the BiOS regime, J. Geophys. Res. Oceans, 120, 5615–5630, DOI:10.1002/2015JC010725

[21] Mihanović H, Vilibić I, Šepić J, Matic F, Ljubešić Z, Mauri E, Gerin R, Notarstefano G and Poulain P-M (2021) Observation, Preconditioning and Recurrence of Exceptionally High Salinities in the Adriatic Sea. *Front. Mar. Sci.* 8:672210. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.672210>

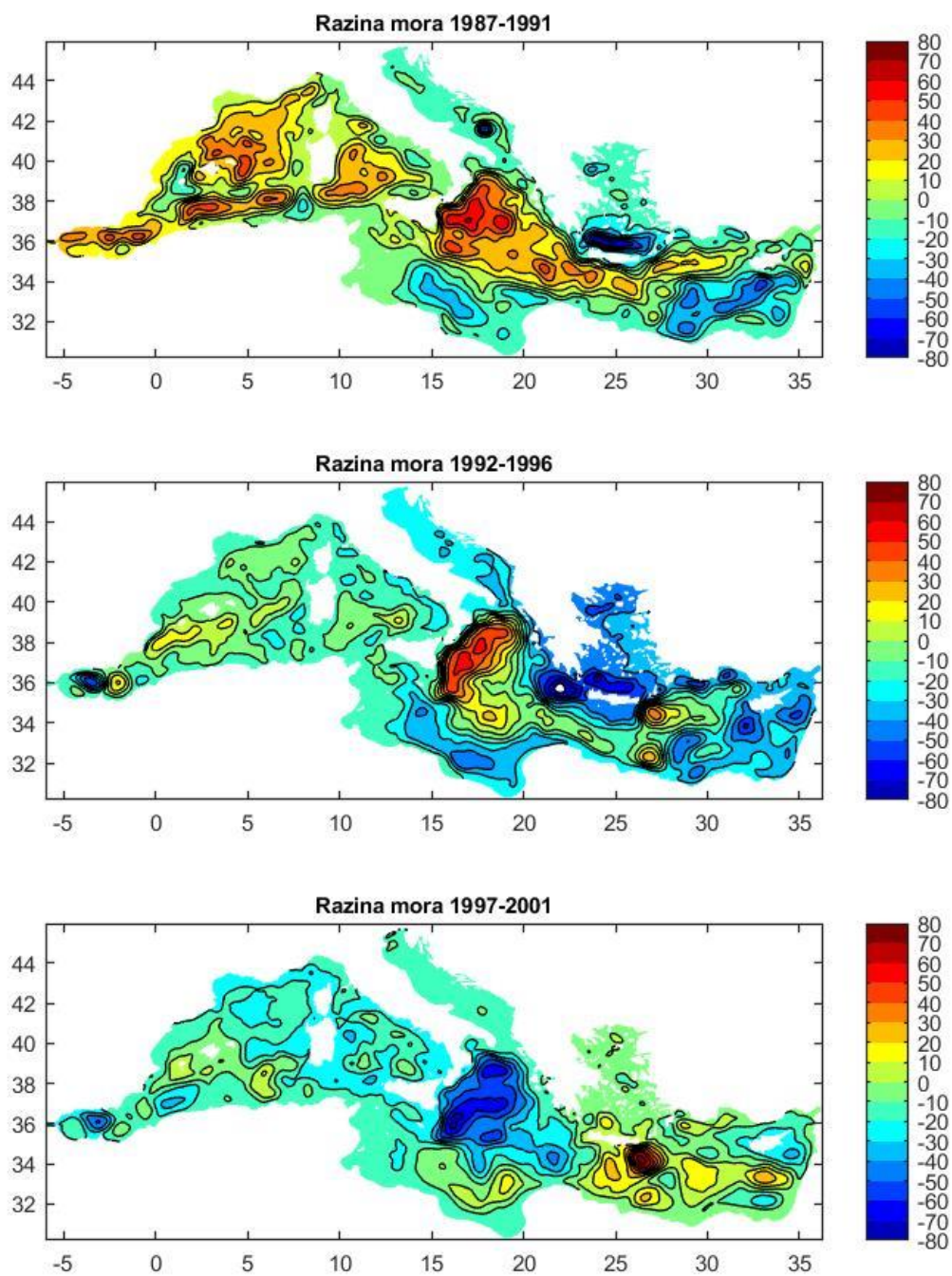
[22] Flaounas E, Davolio S, Raveh-Rubin S, Pantillon F, Miglietta M M, Gaertner M A, Hatzaki M, Homar V, Khodayar S, Korres G, Kotroni V, Kushta J, Reale M, and Ricard D: Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts, *Weather Clim. Dynam.*, 3, 173–208, DOI: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>,2022.

[23] Sakalli, Abdulla. (2017). Sea surface temperature change in the mediterranean sea under climate change: A linear model for simulation of the sea surface temperature up to 2100. *Applied Ecology and Environmental Research.* 15. 707-716. DOI: 10.15666/aeer/1501_707716.

[24] Mohamed, Bayoumy & Mohamed, Abdallah & Alam El-Din, Khaled & Nagy, Hazem & Shaltout, Mohamed. (2019). Inter-Annual Variability and Trends of Sea Level and Sea Surface Temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 Years. *Pure and Applied Geophysics.* DOI: 176. 10.1007/s00024-019-02156-w.

Prilog

Slika A. Petogodišnja srednja razina mora za razdoblja 1987-1991, 1992-1996 i 1997-2001



Slika B. Petogodišnja srednja razina mora za razdoblja 2002-2006, 2007-2011 i 2012-2016

