

# POTENCIJAL PRIMJENE JAVNO DOSTUPNIH BAZA PODATAKA U SVRHU PROCJENE OPASNOSTI OD POPLAVA MORA U PRIOBALNIM GRADOVIMA REPUBLIKE HRVATSKE

**prof. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
e-mail: gloncar@grad.unizg.hr

**doc. dr. sc. Nino Krvavica, dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Rijeci,  
Građevinski fakultet  
Radmile Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska  
e-mail: nino.krvavica@uniri.hr

**izv. prof. dr. sc. Jadranka Šepić, dipl. ing. fiz.**  
Sveučilište u Splitu,  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
R. Boškovića 33, Split, Hrvatska  
e-mail: jsepic@pmfst.hr

**izv. prof. dr. sc. Damir Bekić, dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
e-mail: damir.bekic@grad.unizg.hr

**izv. prof. dr. sc. Mateo Gašparović**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Geodetski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
e-mail: mgasparovic@geof.unizg.hr

**Tin Kulić, mag. ing. aedif.**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
e-mail: tin.kulic@grad.unizg.hr

U radu je prezentirana potencijalna mogućnost primjene javno dostupnih baza podataka s ciljem procjene opasnosti plavljenja priobalnih gradova Rovinja, Bakra, Zadra, Splita, Ploča i Dubrovnika za malu, srednju i veliku vjerojatnost pojavljivanja visokih razina mora. Proračun površina plavljenja gradova proveden je u GIS sučelju, te je baziran na vremenskim nizovima reziduala modeliranih morskih razina u satnoj rezoluciji za razdoblje 1990. - 2020. te digitalnom modelu visina (EU-DEM\_25), sve iz COPERNICUS baze podataka. Razine mora za tri odabrane vjerojatnosti pojavljivanja na predmetnim lokacijama definirane su analizom ekstremnih vrijednosti nizova maksimalnih vrijednosti po segmentima (uz prilagodbu opće razdiobe ekstremnih vrijednosti) i niza premašaja praga (uz prilagodbu opće Pareto razdiobe). Za potrebe procjene greške rezultata dobivenih korištenjem javno dostupnih baza podataka, komparativno je proveden isti metodološki slijed proračuna, ali baziran na komercijalnim vremenskim nizovima mjerenih razinama mora sa mareografskih postaja, te na detaljnijem digitalnom modelu visina Državne geodetske uprave u rezoluciji 5 m (DGU-DEM\_5).

Rezultati provedenog istraživanja pokazuju da prosječna razlika prognoziranih maksimalnih razina mora iznosi samo -5.7 cm (manje razine mora pri korištenju javnih podataka), dok su procijenjene poplavljene površine prosječno 9 % manje u slučaju primjene javno dostupnih podataka. Shodno dobivenim rezultatima, zaključuje se da je glavni izvor odstupanja procijenjene površine plavljenja uzrokovan razlikom u modelima reljefa te u značajno manjoj mjeri razlikom u podacima o razinama mora iz COPERNICUS baze i izmjerenih mareografskih podataka.

**Ključne riječi:** poplava od mora, COPERNICUS baza podataka, mareografska mjerenja

## 1. UVOD

U razdoblju od 1995. do 2015., poplave su činile 43 % svih dokumentiranih prirodnih katastrofa, zahvatile su 2,3 milijarde ljudi i prouzročile štetu u milijardama dolara (UNISDR, 2015.). Do 2050. godine očekuje se da će porast populacije, klimatske promjene, krčenje šuma, gubitak močvarnih područja i porast razine mora utjecati na 2 milijarde ljudi koji se nalaze u područjima podložnim poplavama (WWAP, 2019.). Priobalna područja posebno su osjetljiva na poplave zbog izloženosti različitim oceanografskim i hidrološkim prilikama. U Europskoj uniji (EU) oko 86 milijuna ljudi živi unutar 10 km od obale (EEA, 2010.). Za očekivati je da će se taj broj u budućnosti povećati zbog migracija i urbanizacije, što može povećati osjetljivost ljudi na poplave (Neumann i sur., 2015.). Pojave poplava su u fokusu nekoliko globalnih dokumenata i sporazuma, od kojih su najvažniji Agenda održivog razvoja UN-a 2030. (Colglazier, 2015.) i Okvir iz Sendaia za smanjenje rizika od katastrofa 2015. – 2030. (UNISDR, 2015.).

Talijanske regije Veneto i Friuli-Venezia Giulia su široko poznate po poplavama mora, a posebno Venecija s lokalnim fenomenom poznatim kao *acqua alta* (Cavaleri, 2000.; Trincardi i sur., 2016.; Cavaleri i sur., 2019.). Međutim, hrvatska obala Jadranskog mora podjednako je izložena poplavama mora, s ponekad još i izraženijim posljedicama (Vilibić i Šepić, 2009.; Međugorac i sur., 2015., 2016., 2018.; Vilibić i sur., 2017.). Obzirom na mjesece u kojima se poplave pojavljuju (pretežito zimski), većina poplava izazvana je sinoptičkim atmosferskim djelovanjem (olujni uspori, Međugorac i sur., 2018.), dok se manji broj događaja potvrđeno može smatrati meteorološkim tsunamijima (Vilibić i Šepić, 2009.; Denamiel i sur., 2019.).

Olujni uspori u pravilu zahvaćaju veće područje (red veličine do nekoliko stotina kilometara), duljeg su trajanja – nekoliko sati do par dana, i najčešće se mogu predvidjeti korištenjem združenih atmosferskih i oceanografskih modela (Cavaleri, 2020.). Izuzev sinoptičkih procesa, odnosno prolaska ciklona nad Jadranom, i dodatni procesi sudjeluju u pojavi ekstremno visokih razina mora. Ti dodatni procesi su oscilacije razine mora na periodima duljim od 10 dana, te plimne oscilacije (Pasarić i sur., 2000.; Pasarić i Orlić, 2001.; Vilibić i sur., 2017.). Na periodima duljim od 10 dana, na razinu mora djeluju sporo-propagirajući atmosferski planetarni valovi koji mogu podignuti razinu mora i za više od 30 cm (Pasarić i Orlić, 2001.), te na taj način stvaraju pogodne uvjete za pojavu poplava uslijed prolaza ciklone. Plimne oscilacije javljaju se zbog privlačnog gravitacijskog djelovanja Mjeseca i Sunca na oceane. U Mediteranu su plimne oscilacije dominantno izazvane plimnim oscilacijama Atlantskog oceana koje se kroz Gibraltar prenose u Mediteran (Pugh, 1996.; Arabelos i sur., 2011.). Plimne oscilacije u Mediteranu su u pravilu slabe (20–30 cm, Lozano i Candela, 1995.; Tsimplis i sur., 1995.). Izuzetak predstavljaju područja Tuniškog zaljeva, gdje raspon plimnih oscilacija može doseći i više od 2 m (Othmani i

sur., 2017.; Sammari i sur., 2006.), te Jadrana, gdje plimne oscilacije u njegovom sjevernom dijelu mogu doseći i 1.2 m. U Jadranu se za značajne tradicionalno uzima 7 plimnih komponenti, 4 poludnevne (M2, S2, N2, K2) i 3 dnevne (K1, O1, P1) koje najviše doprinose visini plimnog signala (Medvedev i sur., 2020.). Naizgled je zamjetna intenzifikacija pojave olujnih uspora tijekom 2010-ih, no istraživanja ukazuju da trend porasta broja događaja nije značajan (Međugorac, 2018.). Također treba napomenuti da poplave uslijed pojave olujnih uspora mogu pogoditi čitav hrvatski dio obale Jadranskog mora (Dević i sur., 2021.).

S druge strane, meteorološki tsunamiji u pravilu pogađaju manja, izolirana područja (red veličine do nekoliko desetaka kilometara pa i manje) te se učestalo javljaju na istim mjestima pogodnih batimetrijsko-topografskih karakteristika primjerice u Veloj Luci na otoku Korčuli ili u Starom Gradu na otoku Hvaru (Vilibić i Šepić, 2009.; Šepić i sur., 2016.), kraćeg su trajanja – nekoliko desetaka minuta, te ih je s trenutno dostupnim modelima i mjernim sustavima nemoguće kvalitetno (kvantitativno) prognozirati (Denamiel i sur., 2019.). Valja napomenuti da već postoji katalog meteoroloških tsunamija vezan uz istočnu obalu jadranskog mora (Orlić, 2015; online verzija: Orlić i Šepić [http://jadrان.izor.hr/sepic/meteotsunami\\_catalogue](http://jadrان.izor.hr/sepic/meteotsunami_catalogue)).

Također je potrebno spomenuti činjenicu da se najintenzivnije poplave u priobalnim područjima javljaju najčešće istovremenim djelovanjem nekoliko čimbenika: visokih plimnih oscilacija, olujnih uspora, seša, površinskih valova uzrokovanih vjetrovom (oceanološki čimbenici) i intenzivnih oborina (meteorološki čimbenik).

Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj (RH, 2019.) naglašava da su poplave jedan od tri neprihvatljiva rizika i proglašava nacionalnim prioritetom kontinuirano smanjivanje rizika ove vrste katastrofe aktivnim javnim politikama. U Hrvatskoj se kroz recentno razdoblje provode aktivnosti usklađivanja regulative u domeni upravljanja rizicima od poplava, implementacijom dviju krovnih direktiva Europske Zajednice, a to su Direktiva 2007/60/EZ o procjeni i upravljanju rizicima od poplava – tzv. Direktiva o poplavama (DP), te Direktiva 2000/60/EZ o uspostavi okvira za djelovanje Zajednice u području vodne politike – tzv. Okvirna direktiva o vodama (ODV). Sadržaj ovih dviju direktiva implementiran je i u Zakon o vodama (NN 66/2019), te u ostale relevantne podzakonske akte. Jedna od obveza preuzetih iz DP-a i ODV-a, a propisanih i Zakonom o vodama je izrada Plana upravljanja vodnim područjima koji obuhvaća upravljanje stanjem voda i upravljanje rizicima od poplava. Za potrebe izrade plana upravljanja rizicima od poplava izrađuje se prethodna procjena rizika od poplava te karte opasnosti i rizika od poplava. Trenutno je u primjeni Plan upravljanja vodnim područjima za plansko razdoblje 2016. – 2021., a u postupku izrade je i Plan upravljanja vodnim područjima za sljedeće šestgodišnje plansko razdoblje 2022. – 2027. Do stupanja na snagu Direktive o poplavama, upravljanje rizicima od poplava uzrokovanih

morem nije bilo u nadležnosti vodnog gospodarstva. U Hrvatskoj i EU opasnosti od poplava s mora procjenjuju se za malu (povratni period 1000 g., vjerojatnost godišnjeg premašaja 0,1 %), srednju (povratni period 100 g., vjerojatnost godišnjeg premašaja 1,0 %) i veliku (povratni period 25 g., vjerojatnost godišnjeg premašaja 4 %) vjerojatnost pojave.

Uobičajena su tri pristupa pri analizi pojavljivanja visokih morskih razina određenog povratnog razdoblja: a) analiza ekstremnih visokih razina mora, b) procjena ekstrema putem konvolucije empiričke razdiobe determinističke komponente (harmonijske oscilacije morskih razina uzrokovanih astronomskim utjecajima) i rezidualne komponente dinamike morskih razina, te c) procjena ekstremnih rezidualnih razina nastalih pod utjecajem atmosferskih djelovanja (primarno vjetera i tlaka) i sumacija sa maksimalnom vrijednosti determinističke komponente razine mora. U svakom od navedenih pristupa, moguća je primjena dvije metodologije: a) metoda maksimuma po segmentima (engl. Block Maxima, BM) i b) metoda premašaja praga (engl. Peak Over Thresholds, POT).

Sagledavajući potrebu poduzimanja aktivnosti vezanih uz poplave uslijed djelovanja mora, prepoznata je važnost detekcije i implementacije relevantnih informacija iz javno dostupnih ili komercijalnih baza podataka. Za provedbu bilo koje analize pojave poplava od mora, primarno su potrebne informacije o dinamici morskih razina i geometriji terena (nadmorske visine priobalnog područja).

S obzirom na navedene postavke i postojeće stanje u procjeni opasnosti od poplava s mora, cilj ovoga rada je da detaljno istraži i ocijeni mogućnosti provođenja takve analize koristeći javno dostupne podatke. U sljedećem poglavlju dan je uvid u raspoložive podatke iz javno dostupne baze Copernicus (morske razine i digitalni model reljefa EU DEM 25), te komercijalno dobavljive podatke mjerenja razine mora na mareografskim postajama Rovinj, Rijeka, Bakar, Zadar, Split, Ploče, Dubrovnik i digitalnog modela terena više rezolucije. Također su dana i objašnjena o primijenjenoj metodologiji procjene vjerojatnosti pojave visokih razina mora. Treće poglavlje je rezervirano za prezentaciju rezultata provedenih analiza, a u četvrtom, zaključnom poglavlju, dan je osvrt na dobivene rezultate provedenog istraživanja s preporukama.

## 2. MATERIJALI I METODE

### 2.1. Kratki prikaz mareografskih mjerenja na Jadranu

Kontinuirana mjerenja razine mora u Jadranu započela su 1854. godine u Trstu (Vilibić i sur., 2005.), dok su kontinuirana mjerenja razine mora na hrvatskoj obali Jadrana započela 1929. godine kada je Prirodoslovno-matematički fakultet instalirao do danas aktivnu mareografsku postaju u Bakru, a Hrvatski hidrografski institut mareografsku postaju u Splitu koja je nažalost uništena za vrijeme bombardiranja tijekom Drugog

svjetskog rata. Tijekom 1955/56., uspostavljena je mreža stalnih mareografskih postaja koju su uz već spomenutu postaju Bakar i obnovljenu postaju Split, činile postaje Hrvatskog hidrografskog instituta Rovinj i Dubrovnik, te postaja Instituta za oceanografiju i ribarstvo (Split) Split-Marjan. Tijekom narednog razdoblja Hrvatski hidrografski institut instalirao je još niz mareografskih postaja, od

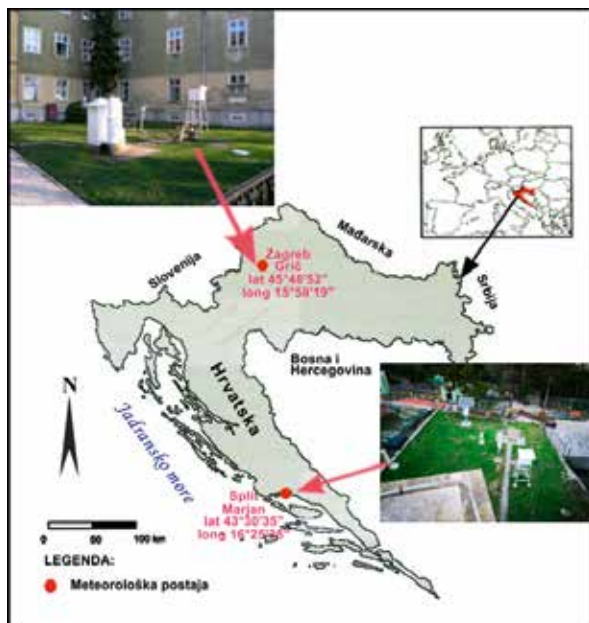
Tablica 1: Mareografske postaje (HHI) korištene u prethodnim razdobljima

Postaja	razdoblje	podaci
Vis	1957.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1954.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1954.php</a>
Ušće Neretve	1957.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1951.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1951.php</a>
Mali Ston	1957. - 1959.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/894.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/894.php</a> ;
Broce	1957. - 1959.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/893.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/893.php</a> ;
Ubli	1987. - 1991.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1718.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1718.php</a> ;
Sućuraj	1987. - 2005.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1706.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1706.php</a> ;
Žirje	1989. - 1991.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1756.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1756.php</a> ;
Zlarin	1983. - 1988.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1578.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1578.php</a> ;
Gaženica	1983. - 1988	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1577.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1577.php</a> ;
Rijeka	1998. - 1999.	<a href="https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1906.php">https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1906.php</a>

kojih su brojne prestale s mjerenjima (tablica 1), dok dvije kontinuirano mjere do danas (postaja Zadar od 1994. do danas, <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1859.php>; postaja Ploče od 2006 do danas, <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/1945.php>). Na hrvatskoj obali Jadrana dostupni su podaci s još tri mareografske postaje, koje su sve u vlasništvu Instituta za oceanografiju i ribarstvo, i to postaje Vela Luka (otok Korčula), Stari Grad (otok Hvar) i Sobra (otok Mljet) koje su instalirane u sklopu projekta MESSI u svrhu praćenja meteoroloških tsunamija, te za koje su 1-minutni podaci dostupni od sredine 2017. godine (<http://jadran.izor.hr/sep/c/messi>, [http://faust.izor.hr/autodatapub/postaje\\_r](http://faust.izor.hr/autodatapub/postaje_r)). Lokacije trenutno aktivnih jadranskih mareografskih postaja označene su žutim kružićima na slici 1.

### 2.2. Modelska analiza dinamike razine mora

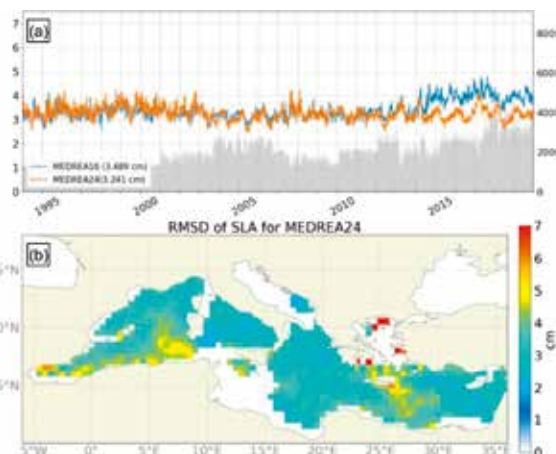
Razine mora na području EU javno su dostupne iz baze podataka Copernicus Marine servisa ([marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)). Razine mora u obliku rezidualne komponente (atmosferski utjecaj) dostupne su za cijelo područje Mediteranskog mora, uključujući i Jadransko more, i to s prostornim rezolucijama 1/16 stupnjeva (približno 6 km; MEDREA16) i 1/24 stupnja (približno 4 km; MEDREA24) sa satnom vremenskom rezolucijom za razdoblje od



Slika 1: Lokacije trenutno aktivnih jadranskih mareografskih postaja

1987. – 2020. godine (Escudier i sur., 2020.). Navedeni podaci rezultat su Mediteranskog prognostičkog sustava, odnosno fizičke reanalize povijesnih događaja pomoću hidrodinamičkog modela Nucleous for European Modelling of the Ocean (NEMO v3.6) u koji je uključena asimilacija *in situ* mjerenja temperature i saliniteta te satelitskih mjerenja razine mora (Escudier i sur., 2020.). Iz usporedbe s višegodišnjim satelitskim opažanjima anomalije morskih razina na području cijelog Mediterana, zaključeno je kako prosječna kvadratna pogreška NEMO modela iznosi 3.241 cm za model veće rezolucije čiji su podaci korišteni i u ovom radu. Pritom, najveće greške su primijećene u područjima u kojima su izmjerene i najveće oscilacije, kao što je to Egejsko more i Alboransko more (slika 2).

Sumacijom determinističke (Janeković, 2005.) i rezidualne (Copernicus baza) komponente morskih razina, dobiveni su konačni vremenski nizovi morskih razina u satnoj rezoluciji za kontinuirano razdoblje 1990. – 2020. godine. U tablici 2 prikazane su amplitude



Slika 2: Rezultati interne validacije Copernicus podataka o razini mora na području Mediterana: a) vremenski niz srednjih kvadratnih razlika između modelske reanalize anomalije razine mora i satelitskih opažanja (MEDREA16 i MEDREA24 ; na apcisi dimenzije u cm), b) prostorna raspodjela srednjih kvadratnih razlika između modelske reanalize i satelitskih opažanja (MEDREA24) (slike su preuzete iz Escudier i sur., 2020. ; RMSD – root mean square deviation / korijen srednjeg kvadratnog odstupanja)

i fazni pomaci za sedam osnovnih konstituenata za proračun determinističke komponente plimnog signala na lokacijama šest mareografskih postaja (Janeković, 2005.). Na slici 3 dan je primjer usporedbe izmjerenih i proračunatih vremenskih nizova morskih razina za poziciju Bakar, za izdvojenu vremensku seriju u kojoj su izmjerene ekstremne razine mora u prosincu 2019. godine.

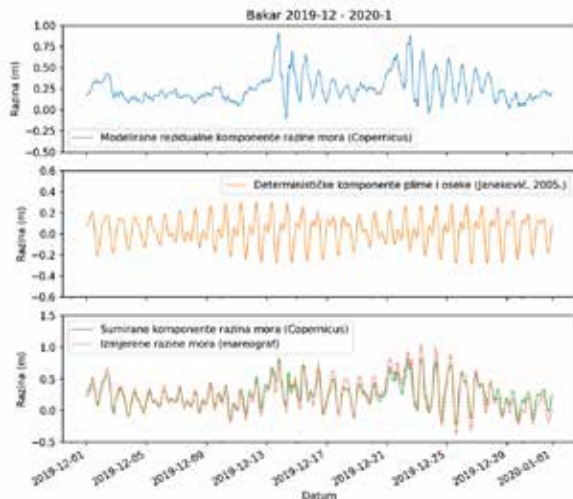
### 2.3. Procjena ekstremnih vrijednosti razine mora

Procjena ekstremnih vrijednosti razine mora na odabranih šest lokacija provedena je na nizu izmjerenih podataka (mareografi) i modelske reanalize (Copernicus) prema metodologiji predloženoj u recentnim radovima Arnsa i sur. (2013.), Wahla i sur. (2017.) te Fanga i sur. (2021.). Osnovni koraci u analizi ekstrema grafički su prikazani na slici 4, a sastoje se od sljedećih koraka i postupaka:

- **Uklanjanje trenda:** Od originalnog zapisa

Tablica 2: Amplitude i fazni pomaci za 7 osnovnih konstituenata za proračun determinističke komponente plimnog signala na lokacijama Rovinj (prvi red), Bakar (drugi red), Zadar (treći red), Split (četvrti red), Ploče (peti red) i Dubrovnik (šesti red) (Janeković, 2005.)

O1		P1		K1		N2		M2		S2		K2	
amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	Faza	amp	faza
(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)
4.85	56.8	5.70	61.9	16.71	68.4	3.29	271.4	18.51	270.4	10.94	276.7	2.97	272.0
4.41	53.1	5.00	65.4	14.06	67.4	1.96	252.0	10.32	250.1	5.75	250.4	1.71	235.4
6.1	229.7	3.23	226.4	0.98	241.7	0.83	219.5	13.44	62.7	4.15	55.7	4.44	52.5
2.79	40.5	3.02	51.1	8.70	54.7	1.08	126.0	8.27	124.8	5.60	126.6	1.69	124.6
2.55	42.7	2.63	46.2	7.93	52.0	1.54	119.4	9.31	119.7	6.41	121.8	1.94	114.9
1.82	41.4	1.85	55.4	5.03	57.0	1.38	101.6	9.43	102.8	5.81	107.4	1.84	104.6



Slika 3: Usporedba izmjerenih i proračunatih vremenskih nizova morskih razina za Bakar (PMF-Zagreb) u prosincu 2019. godine (0.00 - službena geodetska nula Republike Hrvatske HVR571)

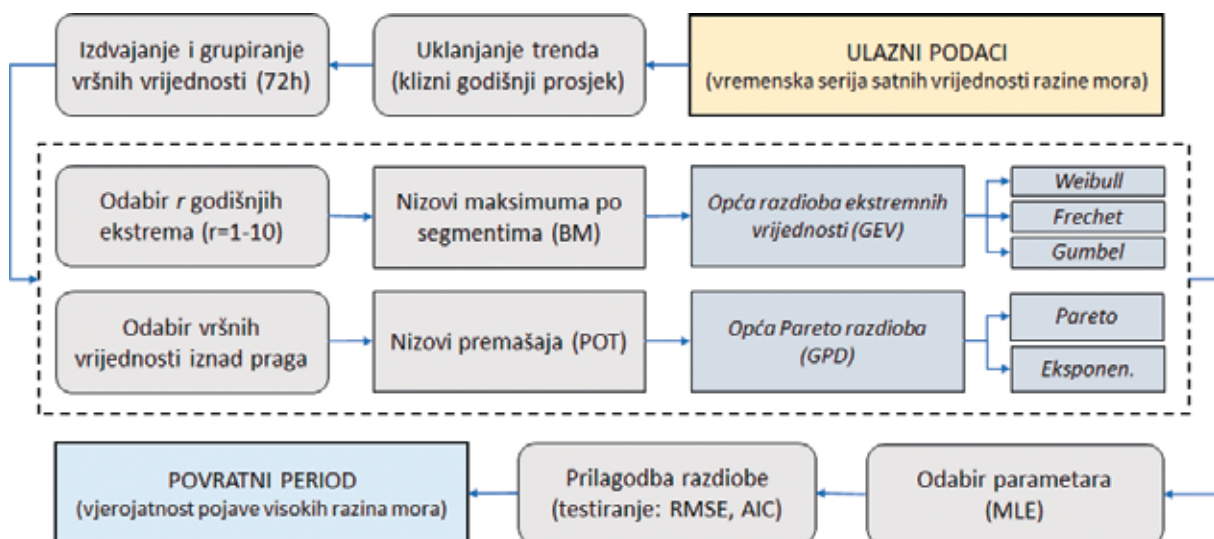
vremenskog niza satnih razina mora oduzeta je srednja godišnja razina mora izračunata pomoću kliznog godišnjeg prosjeka.

- **Grupiranje vršnih vrijednosti:** Kako bi se osigurala nezavisnost ekstrema razmatrana je samo po jedna vršna vrijednost unutar vremenskog razdoblja od 3 dana (72h).
- **Odabir ekstremnih vrijednosti:** Korištena su dva standardna pristupa kako bi se odabrali odgovarajući ekstremi: a) nizovi maksimuma po segmentima (engl. block maxima, BM) koji odgovaraju općoj razdiobi ekstremnih vrijednosti (engl. generalized extreme value, GEV) te b) nizovi premašaja praga (engl. peak over threshold, POT) koji odgovaraju općoj Paretovoj razdiobi (engl. generalized Pareto distribution, GPD). U slučaju BM pristupa korišten je segment od godine dana te su analize provedene za  $r = 1$  do 10 najviših

vrijednosti u svakom segmentu. U slučaju POT pristupa, ekstremi su definirani kao sve vrijednosti koje premašuju definirani prag. Odabir praga proveden je za različite vrijednosti koje definiraju jednaki broj prosječnih ekstrema godišnje kao i kod BM metode (prosječno  $r = 1$  do 10 ekstrema godišnje).

- **Odabir parametara:** Odabir parametara GEV razdiobe u slučaju BM pristupa, odnosno parametara GPD razdiobe u slučaju POT pristupa, proveden je prema metodi procjene maksimalne vjerodostojnosti (engl. maximum likelihood estimation, MLE). Treba napomenuti da se GEV razdioba svodi na Weibull, Frechet i Gumbel razdiobe, dok se GPD razdioba svodi na Paretovu razdiobu i eksponencijalnu razdiobu, ovisno o parametrima oblika razdiobe.
- **Prilagodba razdiobe:** GEV i GPD razdiobe prilagođene su ekstremima s ciljem definiranja pripadnih visokih razina mora za vjerojatnosti godišnjeg premašaja (VGP) od 0,1 %, 1,0 % i 4,0 %. Procjena i testiranje prilagodbe (engl. goodness of fit) navedenih razdioba provedeni su pomoću dviju statističke mjere: srednje kvadratne pogreške (engl. root mean square error, RMSE) i Akaike informacijskog kriterija (engl. Akaike Information Criterion, AIC).

U prvom koraku potrebno je korigirati originalni zapis vremenskog niza satnih razina mora kako bi se uklonio višegodišnji trend promjena srednjih razina mora (SRM) uslijed klimatskih varijabilnosti i promjena (kao što je izdizanje razine mora) te kako bi se osigurao stacionaran i homogen niz podataka. Naime, niz podataka mora biti stacionaran, što znači da se srednja vrijednost i standardna devijacija niza ne mijenja u vremenu (Coles, 2001.). Uobičajena metoda za uklanjanje trenda je procjena linearne regresije i njezina primjena na nizu podataka za cjelokupno promatrano razdoblje (minimalno 30 godina).



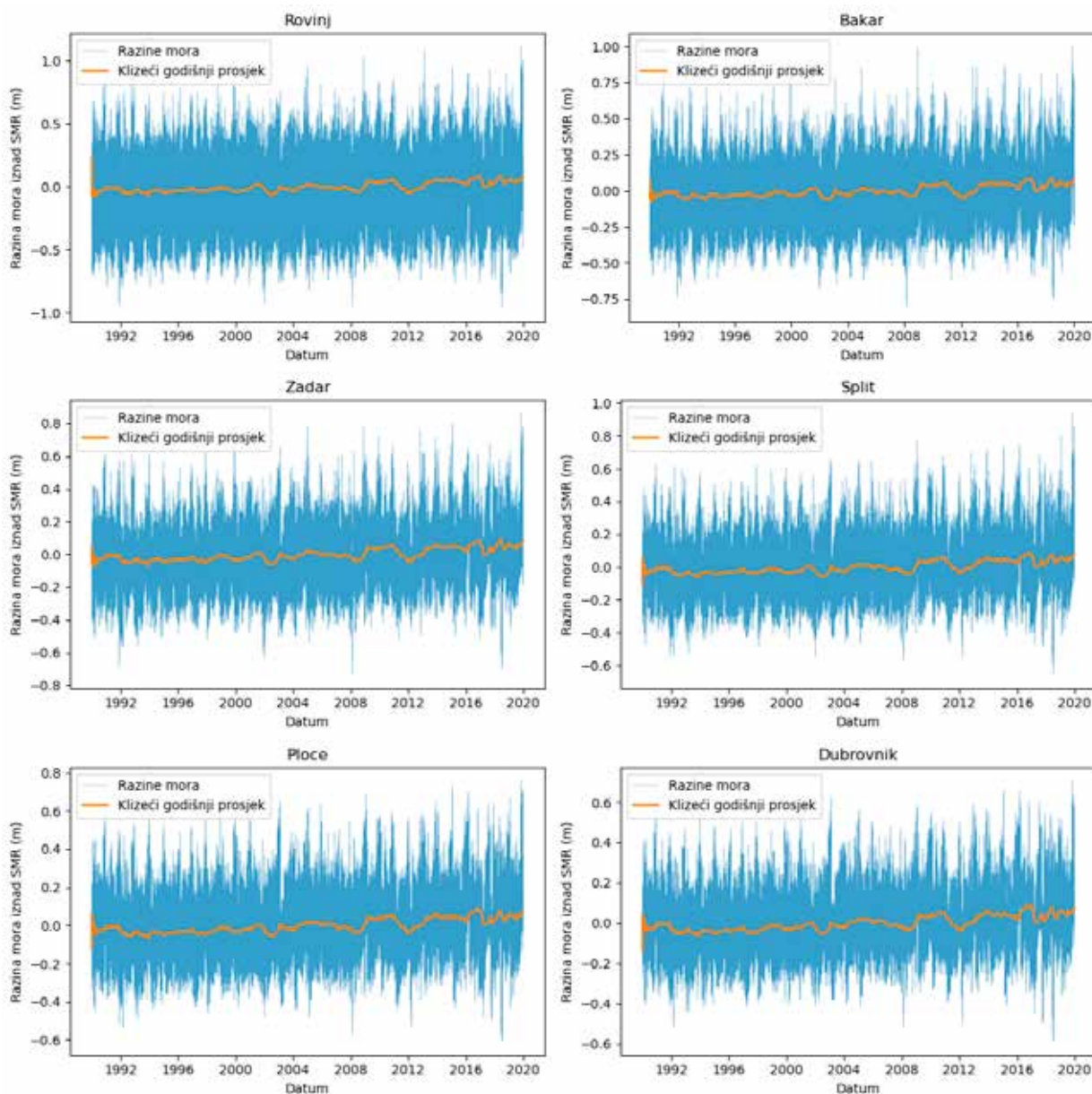
Slika 4: Radni dijagram metodologije procjene ekstremnih vrijednosti visokih razina mora

Međutim u prirodi, vremenska promjena srednjih razina mora može biti izrazito nelinearna zbog ubrzanja i usporavanja promjene SRM-a te dugoperiodičnih oscilacija (višegodišnjih), stoga se klizeći godišnji prosjek smatra pouzdanijom metodom uklanjanja trenda u nizu morskih razina te se češće koristi u recentnim analizama ekstrema (Arns i sur. 2013., Wahl i sur., 2017.). Na slici 5 prikazane su originalne razine mora za svih šest postaja (izvor: Copernicus) s klizeći godišnji prosjek na osnovi kojega je uklonjen višegodišnji trend.

U drugom koraku potrebno je niz trenutnih (u ovom slučaju satnih) vrijednosti razine mora reducirati na vršne vrijednosti (maksimalne dnevne razine mora) te iste grupirati kako bi se osigurao nezavisan niz podataka. Nezavisni događaji u ovom slučaju su definirani s razmakom od 3 dana (72h) između dvaju događaja. Ovo

trajanje je procijenjeno u prethodnim istraživanjima kao prosječno vrijeme tijekom kojeg olujni uspori utječu na razine mora u priobalnom području (Fang i sur., 2021.).

Treći se korak sastoji od odabira reprezentativnih ekstrema iz cjelokupnog uzorka. U slučaju BM pristupa koji odgovara GEV razdiobi, odabire se  $r$  najviših vrijednosti unutar svake godine. Naime, iako se u nekim analizama ekstrema u obzir uzimaju samo godišnji maksimumi (npr. Acero i sur., 2011.), kvalitetniji rezultati mogu se dobiti na uzorku s više vrijednosti, kada su oni dostupni (Coles, 2001.). Treba napomenuti kako je moguće da druga ili treća najveća vrijednost u određenoj godini može biti veća od godišnjeg maksimuma iz neke druge godine unutar promatranog niza. Stoga je u ovom slučaju provedena analiza za  $r = 1$  do 10 najviših vrijednosti u svakoj godini. Za očekivati je kako će se s povećanjem



Slika 5: Vremenski nizovi razina mora iz Copernicus servisa s klizećim godišnjim prosjekom na svih šest lokacija (SMR- srednja razina mora za originalni zapis vremenskog niza satnih razina mora iz Copernicus servisa)

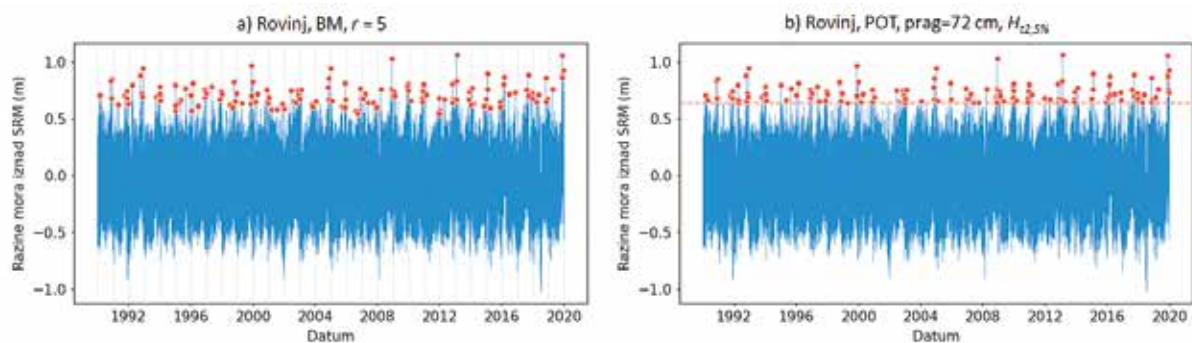
broja vršnih vrijednosti u svakoj godini smanjiti varijanca i poboljšati odabir parametara odgovarajuće teoretske razdiobe. Međutim, istodobno postoji opasnost da će se odabrati prevelik broj neekstremnih događaja, što može povećati pristranost modela. Stoga je odabir odgovarajuće vrijednosti  $r$  kompromis između pristranosti i varijance (Coles, 2001.). Za područje Mediterana autori Tsimplis i Blackman (1997.), Marcos i sur. (2009.), Šepić i sur., (2021.) sugeriraju izbor vrijednosti  $r = 5$ .

POT metoda je, u ovome kontekstu, učinkovitiji pristup jer u odabir ulaze sve ekstremne vrijednosti koji premašuju određeni prag. Umjesto odabira fiksnog broja događaja u svakoj godini (u slučaju BM pristupa), POT pristup se zasniva na racionalnijoj definiciji ekstremnih događaja i u pravilu rezultira pouzdanijim uzorkom niza podataka. Primjerice, Cunnane (1973.) je zaključio kako POT pristup uvijek rezultira nižom varijancom u odnosu na odabir godišnjih maksimuma, pod uvjetom da je prag odabran na način da uzorak sadrži barem 1.65 uzoraka godišnje. Međutim, izbor praga premašenja nije posve proizvoljan. Slično kao i kod odabira broja godišnjih uzoraka u slučaju BM pristupa, premala vrijednost praga rezultira velikim brojem ekstrema koji mogu narušiti asimptotske karakteristike modela i povećati pristranost, dok usvajanje previsoke vrijednosti praga dovodi do malog broja ekstrema i potencijalno velike varijance (Arns i sur., 2013.). Također, s obzirom na to da povratna razdoblja vezana uz procjenu ekstrema morskih razina generalno nadmašuju razdoblja praćenja dinamike razine mora i po nekoliko puta, odabir praga može uzrokovati velike razlike u području ekstrapolacije. Kako bi se rezultati POT pristupa mogli usporediti s BM pristupom,

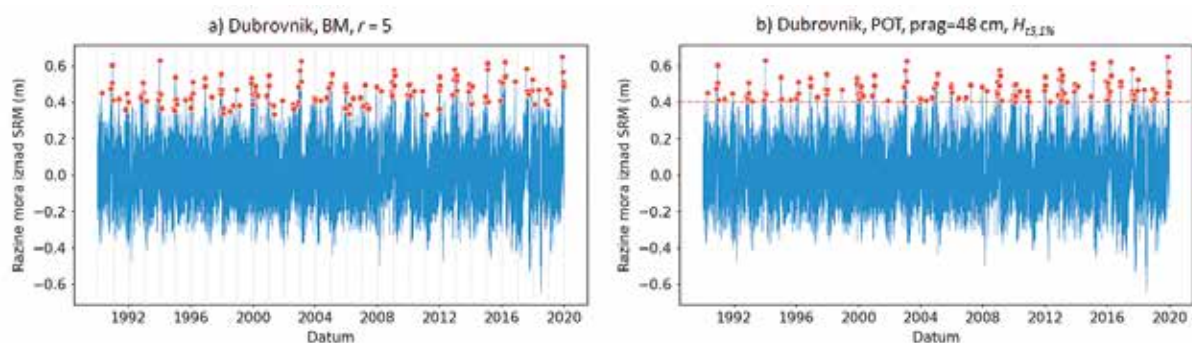
provedena je analiza za različite pragove definirane trajanjima koji rezultiraju premašenjem jednakog broja ekstrema kao i u slučaju BM pristupa (prosječno od 1 do 10 ekstrema godišnje). Primjerice, u Rovinju, razina mora 0.9 % trajanja definira prag od 80 cm iznad SMR koji rezultira sa uzorkom od 58 ekstrema, što čini prosječno 2 ekstrema godišnje (niz od 29 godina) i usporedivo je s  $r = 2$  u slučaju BM pristupa; razina mora 1.4 % trajanja definira prag od 77 cm iznad SMR koji rezultira sa uzorkom od 87 ekstrema, što čini prosječno 3 ekstrema godišnje i usporedivo je s BM pristupom i  $r = 3$ , itd. Trajanja za određivanje praga u slučaju POT pristupa koji rezultiraju rasponom  $r = 1$  do 10 konzistentni su za svih šest postaja i kreću se u rasponu od 7.4 % ( $r = 10$ ) do 0.4 % ( $r = 1$ ).

Na slikama 6 i 7 prikazan je primjer odabira ekstrema prema BM i POT pristupu za postaje Rovinj i Dubrovnik za  $r = 5$  (BM pristup), odnosno za trajanje 2,5 % s pragom od 72 cm iznad SMR (POT pristup za Rovinj) i za trajanje 3,1 % s pragom od 48 cm iznad SMR (POT pristup za Dubrovnik). Iako je u oba slučaja uzet približno jednak broj ekstrema, može se primijetiti kako su u slučaju BM pristupa u niz podataka uključene niže vrijednosti u usporedbi s POT pristupom.

Tri najčešće korištene metode za procjenu parametara razdiobe su metoda momenata (engl. Method of Moments, MOM), metoda linearnih momenata (engl. Method of L-moments, LMOM) te metoda procjene maksimalne vjerodostojnosti (engl. Maximum Likelihood Estimation, MLE). S obzirom na to da je osjetljivost analize ekstrema na metodu procjene parametara razdiobe vrlo slaba u odnosu na ostale elemente, kao



Slika 6: Odabir ekstrema na lokaciji Rovinj prema BM pristupu ( $r = 5$  ekstrema godišnje) i prema POT pristupu (prag 72 cm,  $H_{2,5\%}$ )



Slika 7: Odabir ekstrema na lokaciji Dubrovnik prema BM pristupu ( $r = 5$  ekstrema godišnje) i prema POT pristupu (prag 48 cm,  $H_{3,1\%}$ )

što su, odabir metode uklanjanja trenda i odabir broja ekstrema, odnosno praga za odabir prekoračenja (Wahl i sur., 2017.), ovdje je odabrana MLE metoda za procjenu parametara razdiobe u skladu s recentnim istraživanjima na ovu temu (Arns i sur., 2013., Fang i sur., 2021.).

U metodi nizova maksimuma po segmentima koristi se opća razdioba ekstremnih vrijednosti (engl: generalized extreme value distribution – GEV) definirana izrazom:

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{z-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \text{ ako je } \xi \neq 0 \quad (1)$$

$$G(z) = \exp \left\{ -\exp \left[ - \left( \frac{z-\mu}{\sigma} \right) \right] \right\}, \text{ ako je } \xi = 0 \quad (2)$$

gdje su:  $z$  vrijednost kontinuirane slučajne varijable;  $\mu$ ,  $\sigma$  i  $\xi$  parametri položaja, skaliranja i oblika koji zadovoljavaju uvjete  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$  i  $-\infty < \xi < \infty$ . Za slučaj kada je  $\xi = 0$  opća razdioba ekstrema svodi se na Gumbelovu razdiobu, kada je  $\xi > 0$  na Fréchetovu razdiobu te kada je  $\xi < 0$  na Weibullovu razdiobu. Kod  $\xi > 0$  (Fréchetova razdioba) rep razdiobe sporije opada nego u slučaju Gumbelove razdiobe, dok je u slučaju  $\xi < 0$  (Weibullova razdioba) obratno.

Veličina uzorka je uobičajeno relativno mala, pa procijenjene vrijednosti u području malih vjerojatnosti iskazuju i visoki stupanj nepouzdanosti. Prepoznavanje tog svojstva poslužilo je kao motivacija za iznalazjenje sofisticiranijih metoda koje se oslanjaju na veći skup podataka u istom vremenskom razdoblju, poput metode nizova premašaja.

Metoda nizova premašaja (engl: Peaks-over-threshold – POT) sadržana je u konzistentnom prilagođavanju opće Paretove (GPD) ili neke druge razdiobe skupu vršnih vrijednosti koje premašuju definiranu rubnu vrijednost, odnosno prag (Pickands, 1971., 1975., Davidson i Smith, 1990.). Premašenje izmjerene vrijednosti iznad postavljenog praga u pretpostavlja se kao Poissonov proces sa parametrom  $\lambda_u$  koji predstavlja prosječni broj premašenja praga tijekom godine sa odgovarajućom neovisnom razdiobom koja u slučaju GPD ima oblik :

$$G(z) = 1 - \left[ 1 + \xi \frac{z}{\sigma^*} \right]^{-1/\xi}, \text{ ako je } \xi \neq 0 \quad (3)$$

$$G(z) = \exp \left[ 1 - \exp \left( - \frac{z}{\sigma^*} \right) \right], \text{ ako je } \xi = 0 \quad (4)$$

gdje su:  $\sigma^*$ ,  $\xi$  parametri skaliranja i oblika GPD.

Ukoliko je  $\xi < 0$ , GPD ima gornje ograničenje  $-\sigma^* / \xi$  (gornja krajnja točka GPD). Na taj način premašenje vrijednosti u modelirane sa GPD ne može biti veće od  $-\sigma u / \xi$ , odnosno varijabla ne može premašiti vrijednost  $x^* = u - \sigma u / \xi$  (gornji limit za varijablu od interesa, konkretno razina mora). Za slučaj  $\xi = 0$  GPD se svodi na

eksponencijalnu razdiobu, a za slučaj  $\xi > 0$  na Paretovu razdiobu. Parametri GPD su jednoznačno povezani sa parametrima pripadne GEV, pri čemu je parametar oblika istovjetan a odnos vrijednosti parametra skaliranja u GPD i GEV je dan izrazom  $\sigma^* = \sigma + \xi (u - \mu)$ .

Ocjena prilagodbe navedenih razdioba nizu podataka provodi se pomoću statističkih mjera srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error*, RMSE) te Akaike informacijskog kriterija (eng. *Akaike information criterion*, AIC). Niže vrijednosti RMSE/AIC upućuju

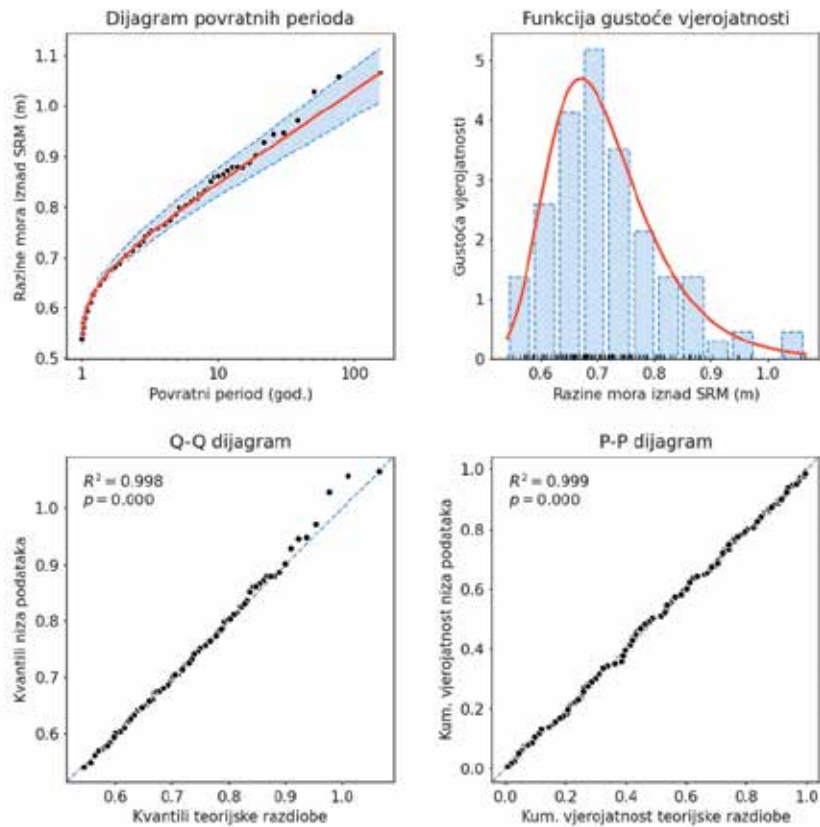
na kvalitetniji model i bolju prilagodbu. Na slici 8 i 9 prikazani su rezultati analize ekstrema za Rovinj prema GM i POT pristupu za  $r = 5$ .

## 2.4. Utjecaj klimatskih promjena

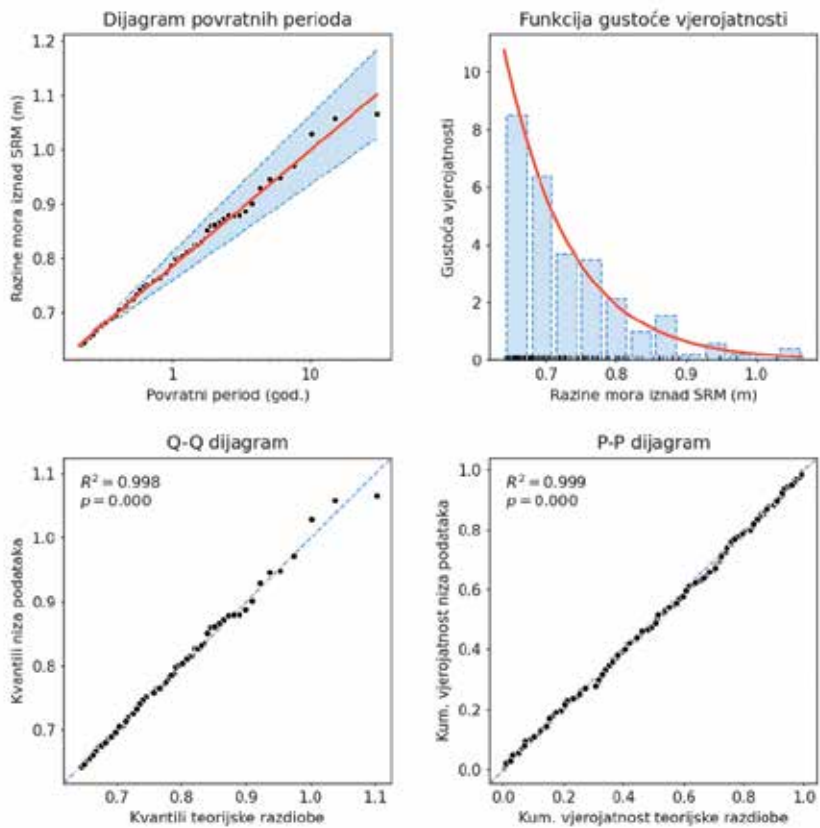
Za procjenu utjecaja klimatskih promjena na ekstremno visoke razine mora duž jadranske obale mogu se iskoristiti rezultati numeričkih klimatoloških oceanografskih modela za područje Jadranskog mora. Uzima se srednji modelirani porast razine mora, te se srednja vrijednost porasta razine mora u promatranom razdoblju nadodaje na prethodno izračunate raspodjele ekstremnih razina mora. Na taj način se dobivaju očekivane ekstremne razine mora u budućem razdoblju, uz uvažene klimatske promjene. Tijekom posljednjih 120 godina bilježi se kontinuiran rast razine mora na globalnoj razini, uz ubrzanje rasta tijekom posljednjih nekoliko desetljeća. Oppenheimer i sur. (2019.) navode da je srednji porast razine mora tijekom 1901. – 1990. godine iznosio 1.4 mm/godina, tijekom 1970. – 2015. je iznosio 2.1 mm/godina, tijekom 1993. – 2015. je iznosio 3.2 mm/godina, a tijekom 2006. – 2015. čak 3.6 mm/godina. Procjena porasta bazirana je na mareografskim i satelitskim (od 1993.) mjerenjima. Dominantan uzrok porasta razine mora trenutno je topljenje ledenjaka i

ledenih pokrova (grenlandski i antartički ledeni pokrov), a nešto manje širenje volumena uslijed zagrijavanja oceana. Očekivani daljnji porast razine mora uvelike će ovisiti o emisiji stakleničkih plinova, odnosno o njihovoj budućoj koncentraciji u atmosferi. Porast razine mora i druge klimatske promjene tradicionalno se prognoziraju





Slika 8: Dijagram povratnih perioda funkcija gustoće vjerojatnosti te Q-Q i P-P dijagram za lokaciju Rovinj, BM pristup (GEV razdioba) i 5 ekstreme godišnje



Slika 9: Dijagram povratnih perioda, funkcija gustoće vjerojatnosti te Q-Q i P-P dijagram za lokaciju Rovinj, POT pristup (GPD razdioba) i prag od 72 cm ( $H_{12,5\%}$ ) s prosječno 5 ekstreme godišnje

za četiri scenarija buduće koncentracije stakleničkih plinova: RCP2.6 (smanjenje emisije stakleničkih plinova, počevši od 2020. do 2100. – s dolaskom na nulu 2100. godine), RCP4.5 (smanjenje emisije stakleničkih plinova počevši od 2040.), RCP6.0 (smanjenje emisije stakleničkih plinova počevši od 2080) i RCP8.5 (povećanje emisije stakleničkih plinova).

Na području Jadrana očekuje se srednji porast razine mora u iznosu od 50 do 80 cm do kraja 21. stoljeća (IPCC, 2021). Uslijed očekivanog porasta razine mora, ekstremno visoke razine mora će postati puno učestalije. Očekuje se da će se, duž europskih obala, ekstremne razine mora s vjerojatnosti godišnjeg premašaja od 1 % do kraja 21. stoljeća povećati za 50 – 90 cm, te da će epizode ekstremnih razina mora koje trenutno imaju VGP od 1 %, do 2100. godine poprimiti vjerojatnost godišnjeg premašaja od čak 33 % (Vousdoukas i sur., 2017.). U okviru ovdje provedenog istraživanja koristiti se pesimistična procjena povećanja ekstremne razine mora uslijed klimatskih promjena od 90 cm za vjerojatnost godišnjeg premašaja od 1 %.

## 2.5. Digitalni model reljefa i visina

### 2.5.1. Digitalni model visina Državne geodetske uprave (DGU-DEM\_5)

Digitalni model reljefa (DMR) predstavlja skup položajno i visinski određenih točaka i geometrijskih elemenata poput prijelomnica, linija oblika i površina isključenja potrebnih za prikaz Zemljine površine. DMR Državne geodetske uprave (DGU) nastaje fotogrametrijskom stereoizmjerom temeljem zračnih snimaka prostorne rezolucije od oko 30 cm (engl. Ground sampling distance – GSD). Navedeni model reljefa izrađen je u kartografskoj projekciji HTRS96/TM na elipsoidu GRS80, a zadnje ažuriranje je napravljeno 2019. godine (DGU, 2018.). Interpolacijom vektorskih podataka DMR-a moguće je izraditi pravilnu mrežu (grid)

visinskih točaka koja u rasterskom obliku predstavlja Zemljinu površinu koju nazivamo Digitalni model visina (engl. Digital elevation model – DEM). Za potrebe ovog rada napravljen je Digitalni model visina sa prostornom rezolucijom od 5 m, uz korištenje formalnog imena DGU-DEM\_5. Navedeni DGU-DEM\_5 pogodan je za procjenu opasnosti od poplava te provedbu analiza reljefa poput izračuna nagiba i ekspozicija, izradu slojnica i drugo.

### 2.5.2. Javno dostupni digitalni visinski modeli

Za potrebe procjene opasnosti od poplava moguće je koristiti i mnoge dostupne globalne digitalne modele visina (GDEM) poput ASTER (engl. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Nagasawa, 2014.), SRTM (engl. Shuttle Radar Topography Mission, Wang i sur. 2012), EU-DEM (Azizian i Brocca, 2020.). ASTER GDEM 3. verzije od 2019. globalno je dostupan u 30-m rezoluciji, a nastao je na bazi stereoskopske korelacije iz satelitskih snimaka. SRTM GDEM je nastao primjenom radarske interferometrije temeljem radara sa sintetičkim otvorom antene (engl. synthetic-aperture radar – SAR). Globalno dostupan u prostornoj rezoluciji 1 lučne sekunde (30 m) od 2013. godine (3. verzija). EU-DEM izrađen od strane Europske komisije temeljem kombinacije SRTM i ASTER GDEM-a. Verzija 1.1 dostupna je od 2016. godine za područje Europske unije u prostornoj rezoluciji od 25 m. U ovom radu za ovu podlogu korišteno je formalno ime EU-DEM\_25.

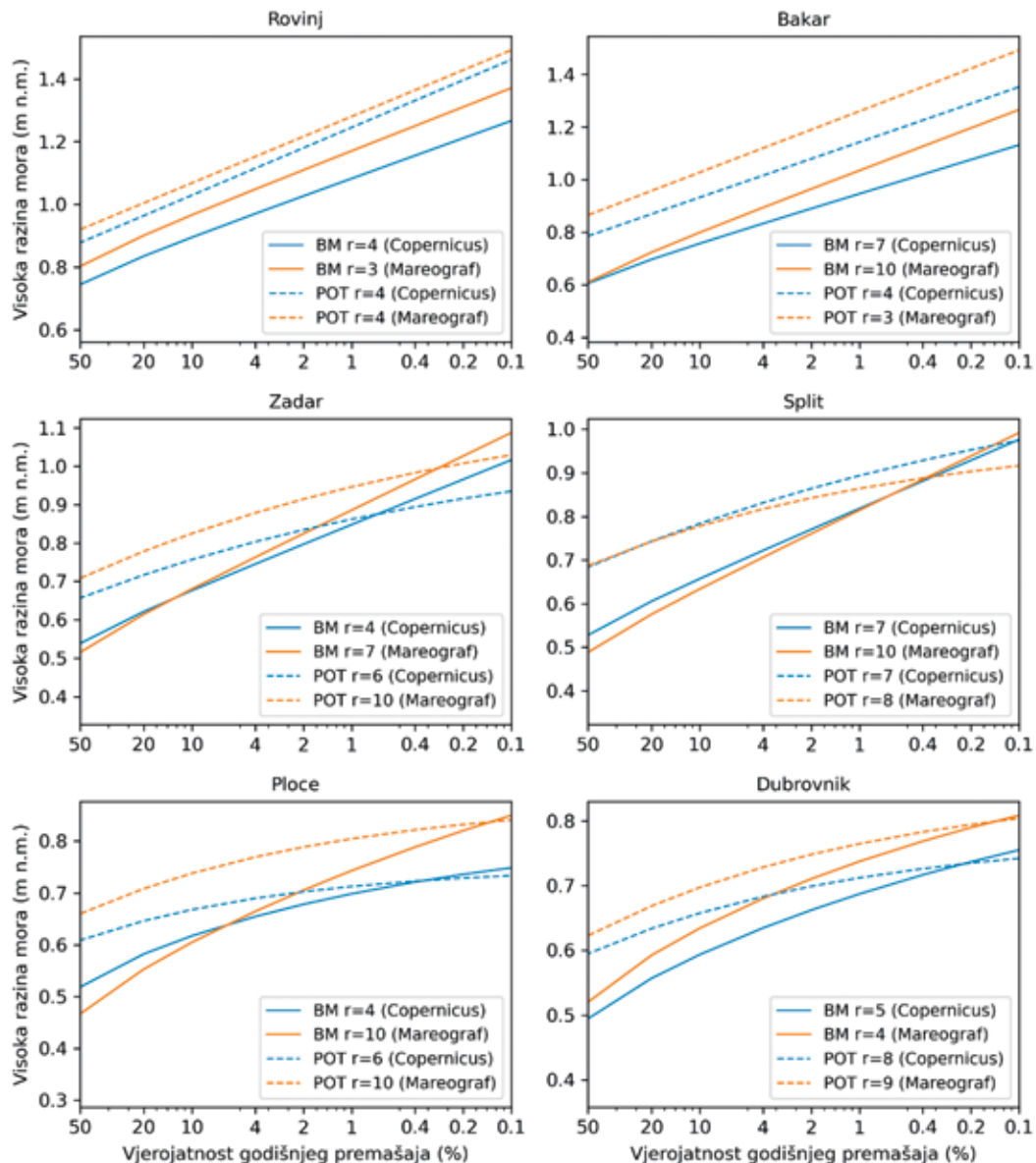
## 3. REZULTATI

### 3.1. Procjena ekstremnih razina mora

Proračunate vjerojatnosti i očekivane maksimalne razine mora prikazane su grafički na slici 10 za vjerojatnosti godišnjih premašaja od 50 % do 0,1 % (što odgovara povratnim periodima od 2 do 1000 godinu) te numerički u tablici 3 za vjerojatnosti godišnjih premašaja od 4 %, 1 % i 0,1 %, koje odgovaraju pojavama velike,

Tablica 3: Očekivane maksimalne razine mora u odnosu na HVRS71 za vjerojatnosti godišnjih premašaja od 4 % (velika vjerojatnost), 1 % (srednja vjerojatnost) i 0,1 % (mala vjerojatnost). (Coper. – temeljem podataka iz baze Copernicus; mareo. – temeljem podataka sa mareografa)

BM	Rovinj (cm)		Bakar (cm)		Zadar (cm)		Split (cm)		Ploče (cm)		Dubrovnik (cm)	
	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.
VGP												
4,0 %	97.1	104.9	83.4	89.4	74.5	76.3	72.2	70.7	65.5	66.4	63.5	68.0
1,0 %	108.2	117.1	94.6	103.5	84.8	88.6	81.8	81.4	69.8	74.3	68.7	73.7
0,1 %	126.7	137.1	113.2	126.6	101.6	108.7	97.6	99.2	74.9	85.0	75.5	80.8
POT	Rovinj (cm)		Bakar (cm)		Zadar (cm)		Split (cm)		Ploče (cm)		Dubrovnik (cm)	
VGP	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.
4,0 %	111.5	115.3	101.6	112.0	80.3	87.9	83.2	81.7	69.0	76.9	68.3	72.8
1,0 %	124.5	128.0	114.3	126.0	86.2	94.6	89.4	86.4	71.2	80.4	71.2	76.5
0,1 %	146.1	149.2	135.2	149.2	93.5	103.0	97.4	91.6	73.3	84.1	74.2	80.4



Slika 10: Proračunate vjerojatnosti i očekivani maksimumi razine mora za vjerojatnosti godišnjih premašaja od 50 % do 0,1 % u odnosu na HVRS71

srednje i male vjerojatnosti za procjenu poplava. Pritom su dane usporedbe vjerojatnosti pojave ekstrema proračunate na temelju vremenskih nizova iz javno dostupne baze podataka Copernicus te na temelju izmjerenih vremenskih nizova s mareografa. Iz danih prikaza može se zaključiti kako ekstremne razine mora opadaju od sjevera prema jugu, pri čemu se najveći ekstremi mogu očekivati u Rovinju i u Bakru, a najmanji u Pločama i Dubrovniku. Također, može se zaključiti da su proračunati ekstremi razine mora u pravilu veći ako se koriste izmjereni podaci s mareografa u odnosu na Copernicus bazu podataka, s jedinom iznimkom u Splitu gdje su dobiveni suprotni rezultati. Ekstremne razine mora s mareografa su u prosjeku veće za 5,7 cm, odnosno 5,7 %, pri čemu je najveća razlika u apsolutnom iznosu od 14 cm prisutna u Bakru za VGP 0,1 %, a u postotnom iznosu od 12,8 % u Pločama, također za VGP 0,1 %.

Također, na slici 10 dane su i usporedbe dvaju različitih pristupa proračuna vjerojatnosti – prema metodi nizova maksimuma po segmentima (BM) te prema metodi nizova premašaja (POT) – što je i pobliže objašnjeno u prethodnom poglavlju. Treba napomenuti da se u BM pristupu koristi generalizirana razdioba ekstrema koja se ovisno o statističkim obilježjima niza svodi na Gumbelovu, Fréchetovu ili Weibullovu razdiobu. Slično tome u POT pristupu se koristi generalna Paretova razdioba koja se svodi na eksponencijalnu ili Paretovu razdiobu. Navedene razdiobe imaju primjetno drugačiji oblik. Primjerice za Rovinj je mjerodavna Gumbelova razdioba (BM pristup), odnosno eksponencijalna razdioba (POT pristup) koje u logaritamskom mjerilu imaju približno linearnu formu, dok je za Dubrovnik mjerodavna Weibullova razdioba (BM), odnosno Paretova razdioba (POT) koje obje u logaritamskom mjerilu poprimaju nelinearnu formu s vrlo

blagim rastom ekstrema za manje vjerojatnosti godišnjih premašaja. U pravilu, pri malim vjerojatnostima POT pristup daje više vrijednosti ekstrema za istu vjerojatnost premašaja, međutim u iznimnim slučajevima (npr. Zadar i Split), BM pristup daje ipak nešto veće vrijednosti za najmanju vjerojatnost premašaja. Zaključno, s gledišta sigurnosti, u nastavku rada će se koristiti POT pristup koji daje nešto veće vrijednosti ekstremnih razina mora.

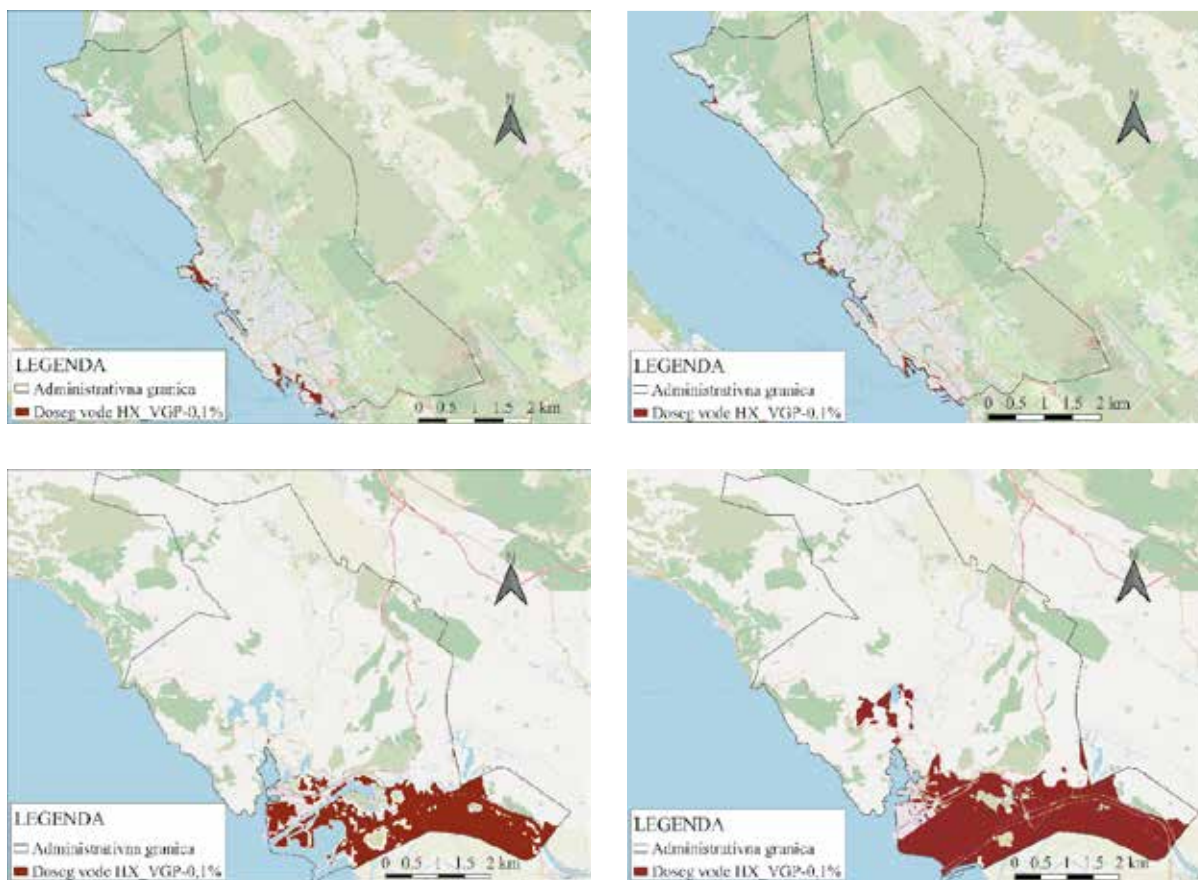
Rezultati prikazani na slici 10 i u tablici 3 u suglasju su sa rezultatima slične analize napravljene za interval mjerenja 1955. - 2004. (Domijan i sur. 2007.), za vjerojatnost godišnjeg premašaja 1 % i lokacije Rovinj (+125 cm), Split (+93 cm) i Dubrovnik (+69 cm).

### 3.2. Procjena opasnosti od poplava mora u priobalnim gradovima

Na slici 11 grafički je prikazana usporedba doseg vode za administrativna područja gradova Zadra i Ploče pri pojavi maksimalne razine mora vjerojatnosti godišnjeg premašaja 0,1 % dobivene na temelju statističke analize podataka iz baze Copernicus i podataka s mareografa. Doseg maksimalne razine mora dobiven na temelju podataka iz Copernicus baze izračunat je s obzirom na javno dostupni digitalni model visina EU-DEM\_25. Za rezultate dobivene na temelju podataka zabilježenih na mareografima doseg vode izračunat je s obzirom na digitalni model visina DGU-DEM\_5.

U tablici 4 prikazana je usporedba površina plavljenja terena unutar administrativnih granica gradova Rovinja, Bakra, Zadra, Splita, Ploča i Dubrovnika temeljem prethodno objašnjenog pristupa obrade podataka dobivenih iz korištenih baza podataka (Copernicus i registracija na mareografima). U tablici 5 prikazana je usporedba kao i u tablici 4, s razlikom da je u obzir uzet i doprinos klimatskih promjena u vidu pesimistične procjene porasta razine mora od 90 cm na području svih gradova.

Dobiveni rezultati procijenjenih površina plavljenja pokazuju da primjena podataka o morskim razinama iz COPERNICUS baze, zajedno sa podacima o visinama iz DEM 25, rezultira manjim površinama za prosječno 7 % (BM i VGP 1 %) i 17 % (BM i VGP 0,1 %) te 7 % (POT i VGP 4 %), 9 % (POT i VGP 1 %) i 11 % (POT i VGP 0,1 %) za sve analizirane lokacije. U slučaju analize BM i VGP 4 % površina plavljenja dobivena pomoću COPERNICUS baze s visinama preuzetim iz EU-DEM\_25 u prosjeku je približno jednaka površini dobivenoj na temelju mareografskih podataka i visina iz DGU-DEM\_5 (veća je za prosječno 0,2 %). Maksimalno podbacivanje u procjeni površine plavljenja pojavljuje se na lokaciji Bakar (86 % manja površina kod BM i VGP 4 %, 82 % manja površina kod BM i VGP 1 %, te 77 % manja površina kod BM i VGP 0,1 %).



Slika 11: Plavljena područja za gradove Zadar (gore) i Ploče (dolje) za maksimalnu razinu mora vjerojatnosti godišnjeg premašaja 0,1 % dobivenu na temelju Copernicus baze podataka (lijevo) i mjerenja na mareografu (desno) bez utjecaja klimatskih promjena

**Tablica 4:** Površine plavljenja priobalnog područja u km<sup>2</sup> za odgovarajuće maksimalne razine mora u odnosu na HVRS71 za VGP 4 % (velika vjerojatnost), 1 % (srednja vjerojatnost) i 0,1 % (mala vjerojatnost). (Coper. – temeljem podataka iz baze Copernicus ; mareo. – temeljem podataka sa mareografa)

BM	Rovinj		Bakar		Zadar		Split		Ploče		Dubrovnik	
	VGP	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.
4,0 %	0.272	0.786	0.004	0.026	0.517	0.379	0.634	0.234	14.811	23.159	0.195	0.248
1,0 %	0.285	0.830	0.005	0.030	0.570	0.469	0.663	0.271	14.956	23.381	0.200	0.267
0,1 %	0.306	0.906	0.009	0.037	0.643	0.662	0.720	0.343	15.122	23.659	0.206	0.291
POT	Rovinj		Bakar		Zadar		Split		Ploče		Dubrovnik	
	VGP	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.
4,0 %	0.290	0.823	0.005	0.026	0.542	0.463	0.668	0.271	14.933	23.451	0.200	0.264
1,0 %	0.306	0.872	0.009	0.037	0.579	0.525	0.690	0.288	15.001	23.543	0.201	0.277
0,1 %	0.339	0.957	0.013	0.044	0.611	0.606	0.719	0.309	15.072	23.637	0.205	0.290

**Tablica 5:** Očekivana površina plavljenja priobalnog područja u km<sup>2</sup> za odgovarajuće maksimalne razine mora u odnosu na HVRS71 za vjerojatnost godišnjeg premašaja 1,0 % uz utjecaj klimatskih promjena

BM	Rovinj		Bakar		Zadar		Split		Ploče		Dubrovnik	
	Scenarij	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.	mareo.	Coper.
Stanje klimatskih promjena VGP 1,0 %	0.424	1.239	0.021	0.063	1.189	1.375	1.038	0.900	17.569	25.631	0.267	0.684

Uzimajući u obzir utjecaj klimatskih promjena kroz rast razine mora od 90 cm na svim analiziranim lokacijama, površine poplavlivanja vezane uz BM i VGP 1 % povećavaju se za 49 % u Rovinju, za 287 % u Bakru, za 109 % u Zadru, za 57 % u Splitu, za 17 % u Pločama i za 33 % u Dubrovniku (COPERNICUS baza i DEM 25), te za 49 % u Rovinju, za 109 % u Bakru, za 193 % u Zadru, za 233 % u Splitu, za 10 % u Pločama i za 156 % u Dubrovniku (mareografi i DMR-DGU).

#### 4. ZAKLJUČAK

Poračunate su površine plavljenja za gradove Rovinj, Bakar, Zadar, Split, Ploče i Dubrovnik, za malu (vjerojatnost godišnjeg premašaja 0,1 %, povratni period 1000 g.), srednju (vjerojatnost godišnjeg premašaja 1,0 %, povratni period 100 g.) i veliku vjerojatnost pojavljivanja poplave od mora (vjerojatnost godišnjeg premašaja 4,0 %, povratni period 25 g.). Pri procjeni plavljenih površina koristila su se dva izvora podataka. Prvi se oslanja na javno dostupne baze podataka (COPERNICUS – reziduali razine mora u satnoj rezoluciji podataka za razdoblje 1990. – 2020. i digitalni model visina EU-DEM\_25), drugi na komercijalno dostupne baze podataka (izmjerene razine mora na mareografskim stanicama za razdoblje

1990. – 2020. i digitalni model visina DGM-DEM\_5). Razine mora na predmetnim lokacijama za malu, srednju i veliku vjerojatnost pojavljivanja definirane su dvojako: analizom ekstremnih vrijednosti po segmentima nizova (uz prilagodbu opće razdiobe ekstremnih vrijednosti) i analizom niza premašaja praga (uz prilagodbu opće Paretove razdiobe).

Po pitanju razlike u prognoziranom maksimalnim razinama mora utvrđeno je da primjena podataka iz COPERNICUS baze rezultira sa srednjim greškama (engl: average error) od -3.3 cm (BM i VGP 4 %), -5.1 cm (BM i VGP 1 %) i -8.0 cm (BM i VGP 0,1 %), te -5.5 cm (POT i VGP 4 %), -5.9 cm (POT i VGP 1 %) i -6.3 cm (POT i VGP 0,1 %) za sve analizirane lokacije. Pri tome se maksimalne apsolutne greške pojavljuju na lokaciji Bakar uz primjenu POT metode (-10.4 cm za veliku vjerojatnost., -11.7 cm za srednju vjerojatnost i -14.0 cm za malu vjerojatnost).

Dobiveni rezultati procijenjenih površina plavljenja pokazuju da primjena podataka o morskim razinama iz COPERNICUS baze, zajedno sa podacima o visinama iz DEM 25, rezultira manjim površinama plavljenja za približno 10 % (BM i VGP) na svim analiziranim lokacijama. Jedino u slučaju analize velike vjerojatnosti (4 %) površina plavljenja (COPERNICUS i EU-DEM\_25)

približno je jednaka površini dobivenoj na temelju mareografskih podataka i visina iz DGU-DEM\_5. Maksimalno podbacivanje u procjeni površine plavljenja pojavljuje se na lokaciji Bakar.

Utjecaj klimatskih promjena sa usvojenom projekcijom rasta razine mora od 90 cm rezultira povećanjem površina poplavlivanja u scenariju VGP 1 % za 49 % (Rovinj), 287 % (Bakar), 109 % (Zadar), 57 % (Split), 17 % (Ploče) i 33 % Dubrovnik (COPERNICUS baza i DEM 25), te za 49 % (Rovinj), 109 % (Bakar), 193 % (Zadar), 233 % (Split), 10 % (Ploče) i 156 % (Dubrovnik) (mareografi i DMR-DGU).

Obzirom na dobivene rezultate provedenog istraživanja može se zaključiti da javno dostupni podaci

iz COPERNICUS baze – reziduali razina mora i EU DEM 25 – predstavljaju dobru osnovu za procjenu površina poplavlivanja priobalnog područja od mora čime se omogućava značajna financijska ušteda u odnosu na primjenu vrlo skupo dobavljenih podataka mjerenja sa mareografskih postaja i detaljnijeg modela reljefa (npr. DGU-DEM\_5).

U nastavku istraživanja planirano je proširiti ovdje provedene analize poplava od mora sa sagledavanjem složenih poplava u urbanim područjima koje se mogu očekivati uslijed kombiniranog djelovanja visokih razina mora, gravitacionih vjetrovnih valova te velikih protoka rijeka ili jakih kratkotrajnih oborina. ■

## LITERATURA:

- Arabelos, D. N., Papazachariou, D. Z., Contadakis, M. E., Spatalas, S. D. (2011.): A new tide model for the Mediterranean Sea based on altimetry and tide gauge assimilation, *Ocean Science*, 7, str. 429-444.
- Azizian, A., Brocca, L. (2020.): Determining the best remotely sensed DEM for flood inundation mapping in data sparse regions, *International Journal of Remote Sensing*, 41 (5), str. 1884-1906.
- Acero, F. J., García, J. A., Gallego, M. C. (2011.): Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula, *Journal of Climate*, 24 (4), str. 1089-1105.
- Arns, A., Wahl, T., Haigh, I. D., Jensen, J., Pattiaratchi, C. (2013.): Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise. *Coastal Engineering*, 81, str. 51-66.
- Cavaleri, L. (2000.): The oceanographic tower Acqua Alta – activity and prediction of sea states at Venice, *Coastal Engineering*, 39 (1), str. 29-70.
- Cavaleri, L., Bajo, M., Barbariol, F., Bastianini, M., Benetazzo, A., Bertotti, L., Chiggiato, J., Davolio, S., Ferrarin, C., Magnusson, L., Papa, A., Pezzutto, P., Pomaro, A., Umgiesser, G. (2019.): The October 29, 2018 storm in Northern Italy – An exceptional event and its modeling, *Progress in Oceanography*, str. 178, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102178>.
- Cavaleri, L., Bajo, M., Barbariol, F., Bastianini, M., Benetazzo, A., Bertotti, L., Chiggiato, J., Ferrarin, C., Trincardi, F., Umgiesser, G. (2020.): The 2019 flooding of Venice and its implications for future predictions, *Oceanography*, 33, str. 42-49.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., Dorazio, P. (2001.): An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208), London: Springer, 208 str.
- Colglazier, W. (2015.): Sustainable development agenda: 2030, *Science*, 349(6252), str. 1048-1050.
- Cunnane, C. (1973.): A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction, *Journal of hydrology*, 18(3-4), str. 257-271.
- Davison, A.C., Smith, R.L. (1990.): Models for exceedances over high thresholds (with discussion). *J. Roy. Stat. Soc.*, 52B, str. 393-442.
- Denamiel, C., Šepić, J., Ivanković, D., Vilibić, I. (2019.): The Adriatic Sea modelling suite: Evaluation of the meteotsunami forecast component, *Ocean Modelling*, 135, str. 71-93.
- Dević, T., Šepić, J., Koračin, D. (2021.): The northern and the eastern Adriatic Sea floods: connecting the extreme sea levels to cyclone pathways, EGU21-8201 vPICO, <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-8201.html>
- DGU (2018.): Katalog podataka v1.11., Republika Hrvatska, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Domijan, N., Čupić, S.A., Mihanović, H., Leder, N., Strinić, G., Gržetić, Z. (2007.): A reappraisal of the extreme sea levels along the Croatian Adriatic coast, *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.*, 38, str 138.
- EEA (2010.): Annual Report 2010 and Environmental statement 2011, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark
- 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) Data set, Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). [https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_006\\_004\\_E3R1](https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1)
- Fang, J., Wahl, T., Zhang, Q., Muis, S., Hu, P., Fang, J., Shi, P. (2021.): Extreme sea levels along coastal China: uncertainties and implications. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(2), str. 405-418.
- IPCC (2021.): Summary for Policymakers. U: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb,

- M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.) . Cambridge University Press. U tisku
- Janeković, I., Kuzmić M. (2005.): Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.*, 23(10), str. 3207–3218.
- Lozano, C. J., Candela, J. (1995.): The M(2) tide in the Mediterranean Sea: Dynamic analysis and data assimilation. *Oceanologica acta*, 18(4), str. 419–441.
- Marcos, M., Tsimplis, M. N., Shaw, A. G. P. (2009.): Sea level extremes in southern Europe, *Journal of Geophysical Research*, 114, C01007.
- Medvedev, I. P., Vilibić, I., Rabinovich, A. B. (2020.): Tidal resonance in the Adriatic Sea: Observational Evidence, *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 125, e2020JC016168, <https://doi.org/10.1029/2020JC016168>.
- Međugorac, I., Pasarić, M., Orlić, M. (2015.): Severe flooding along the eastern Adriatic coast: the case of 1 December 2008, *Ocean Dynamics*, 65, str. 817–830.
- Međugorac, I., Pasarić, M., Pasarić, Z., Orlić, M. (2016.): Two recent storm-surge episodes in the Adriatic, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(3), str. 589–596.
- Međugorac, I., Orlić, M., Janeković, I., Pasarić, Z., Pasarić, M. (2018.): Adriatic storm surges and related cross-basin sea-level slope, *Journal of Marine Systems*, 181, str. 79–90.
- Nagasawa, R. (2014.): Potential flood hazard assessment by integration of ALOS PALSAR and ASTER GDEM: a case study for the Hoa Chau commune, Hoa Vang district, in central Vietnam, *Journal of Applied Remote Sensing*, 8 (1), 083626.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., Nicholls, R. J. (2015.): Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding – a global assessment, *PloS one*, 10(3), e0118571.
- Oppenheimer, M., Glavovic, B.C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A.K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., Sebesvari, Z. (2019.): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M. (urednici.) .
- Orlić, M. (2015.): The first attempt at cataloguing tsunami-like waves of meteorological origin in Croatian coastal waters, *Acta Adriatica*, 56(1), str. 83–96.
- Othmani, A., Bejaoui, B., Chevalier, C., Elhmaidi, D., Devenon, J. L., Aleya, L. (2017.): High-resolution numerical modelling of the barotropic tides in the Gulf of Gabes, eastern Mediterranean Sea (Tunisia), *Journal of African Earth Sciences*, 129, str. 224–232.
- Pasarić, M., Pasarić, Z., Orlić, M. (2000.): Response of the Adriatic Sea level to the air pressure and wind forcing at low frequencies (0.01 – 0.1 cpd), *Journal of Geophysical Research*, 105, str. 11423–11439.
- Pasarić, M., Orlić, M. (2001.): Long-term meteorological preconditioning of the North Adriatic coastal floods, *Continental Shelf Research*, 21, str. 263–278.
- Pickands, J. (1971.): The two-dimensional Poisson process and extremal processes, *Journal of Applied Probability*, 8, str. 745–756.
- Pickands, J. (1975.): Statistical inference using extreme order statistics, *Annals of Statistics*, 3, str. 119–131.
- Pugh, D.T. (1996.): Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections), Chichester, UK. John Wiley & Sons, Ltd., 486 str.
- Sammari, C., Koutitonsky, V. G., Moussa, M. (2006.): Sea level variability and tidal resonance in the Gulf of Gabes, Tunisia, *Continental Shelf Research*, 26 (3), str. 338–350.
- Šepić, J., Međugorac, I., Janeković, I., Dunić, N., Vilibić, I. (2016.): Multi-meteotsunami event in the Adriatic Sea generated by atmospheric disturbances of 25–26 June 2014, *Pure and Applied Geophysics*, 173 (12), str. 4117–4138.
- Šepić, J., Pasarić, M., Međugorac, I., Vilibić, I., Karlović, M., Mlinar, M. (2021.): Climatology and process-oriented analysis of the Adriatic sea-level extremes, EGU21-4090 vPICO.
- Trincardi, F., Barbanti, A., Bastianini, M., Benetazzo, L., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Papa, A., Pomaro, A., Sclavo, M., Tosi, L., Umgiesser, G. (2016.): The 1966 flooding of Venice: What time taught us for the future, *Oceanography*, 29 (4), str. 178–186.
- Tsimplis, M. N., Proctor, R., Flather, R. A. (1995.): A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research*, 100 (C8), str. 16223–16239.
- Tsimplis, M. N., Blackman, D. (1997.): Extreme sea-level distribution and return periods in the Aegaen and Ionian Seas, *Estaruine, Coastal and Shelf Science*, 44 (1), str. 79–89.
- UNISDR, U. (2015.): Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030, In *Proceedings of the 3rd United Nations World Conference on DRR*, Sendai, Japan, str.14–18.
- Vilibić, I., Šepić, J., Pasarić, M., Orlić, M. (2017.): The Adriatic Sea: A long-standing laboratory for sea level studies, *Pure and Applied Geophysics*, 174, str. 3765–3811.
- Vilibić, I., Šepić, J. (2009.): Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: Overview, *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, str. 904–917.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L. (2017.): Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts, *Earth's Future*, 5, str. 304–323.
- WWAP (2019.): The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind, (UNESCO World Water Assessment Programme)
- Wahl, T., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Arns, A., Dangendorf, S., Hinkel, J., Slangen, A. B. (2017.): Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis, *Nature communications*, 8(1), str. 1–12.

Wang, W., Yang, X., Yao, T. (2012.): Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet, *Hydrological Processes*, 26 (2), str. 213-225.

## POTENTIALS FOR IMPLEMENTING PUBLICLY AVAILABLE DATABASES FOR COASTAL FLOOD HAZARD ASSESSMENT IN COASTAL TOWNS OF THE REPUBLIC OF CROATIA

**Abstract.** The paper presents potentials of implementing publicly available databases with the aim to assess flood hazards in the coastal towns of Rovinj, Bakar, Zadar, Split, Ploče and Dubrovnik for a low, medium and high probability of high sea-level occurrences. The calculation of flooded town areas is performed in the GIS interface and based on time series of modelled sea level residuals in hourly resolution for the period of 1990-2020, as well as the digital elevation model (EU-DEM\_25) from the COPERNICUS database. The sea levels for the 3 selected probabilities of occurrence on the subject locations were determined by analysing extreme values of the series with maximum values according to segments (while adapting the general distribution of extreme values) and the series of exceedances over thresholds (while adapting the general Pareto distribution). In order to estimate errors of the results obtained by using publicly available databases, the same methodological calculation sequence was carried out for a comparison purpose, but based on the commercial values of the time series of sea levels measured at mareographic stations, and the more detailed digital elevation model of the State Geodetic Administration in 5m resolution (DGU-DEM\_5).

The results of the conducted investigation indicate that the average difference from the forecast maximum level is only -5.7 cm (lower sea levels when using public data), while the estimated flooded areas are on average 9% smaller when using publicly available data. Accordingly, it has been concluded that the main source of deviation from the estimated flooded area is caused by a difference in relief models and, to a significantly smaller extent, by a difference in sea level data from the COPERNICUS base and measured mareograph data.

**Key words:** costal floods (storm surge), COPERNICUS database, mareograph (tide gauge) measurements

## DAS ANWENDUNGSPOTENTIAL VON ÖFFENTLICH ZUGÄNGLICHEN DATENBANKEN IN DER ABWÄGUNG DES MEERESHOCWASSERRISIKOS IN KÜSTENSTÄDTEN KROATIENS

**Zusammenfassung.** In der Arbeit wird die Möglichkeit der Anwendung von öffentlich zugänglichen Datenbanken dargestellt, mit dem Ziel die Überschwemmungsgefahr in den Küstenstädten Rovinj, Bakar, Zadar, Split, Ploče und Dubrovnik für niedrige, mittlere und hohe Wahrscheinlichkeit des Meeresspiegelanstiege einzuschätzen. Die Berechnung der Überschwemmungsfläche dieser Städte wurde an der GIS Schnittstelle durchgeführt und basierte auf die Zeitreihen von Residuen der modellierten Meeresspiegel in stündlicher Auflösung für den Zeitraum 1990-2020 sowie auf einem digitalen Höhenmodell (EU-DEM\_25), welche im Erdbeobachtungsprogramm COPERNICUS enthalten sind. Die Meeresspiegel für die drei gewählten Auftretenswahrscheinlichkeiten in diesen Städten wurden durch die Analyse von Extremwerten der Reihen von Maximalwerten nach Segmenten (mit Anpassung der allgemeinen Verteilung der Extremwerte) und der Reihe von Schwellenüberschreitung (mit Anpassung der allgemeinen Pareto-Verteilung) definiert. Um die Fehler der in der Anwendung von öffentlich zugänglichen Datenbanken ermittelten Ergebnisse abzuschätzen, wurde der gleiche methodische Ablauf vergleichend durchgeführt, der allerdings auf den kommerziellen Zeitreihen von an den Gezeitenstationen gemessenen Meeresspiegeln sowie auf einem detaillierten digitalen Höhenmodell des Kroatischen geodätischen Verwaltung in einer Auflösung von 5 m (DGU-DEM\_5) basierte.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung zeigen, dass der durchschnittliche Unterschied zwischen den prognostizierten maximalen Meeresspiegeln nur -5,7 cm beträgt (niedrigere Meeresspiegel im Falle von öffentlich zugänglichen Daten), während die prognostizierten Überschwemmungsflächen durchschnittlich 9% kleiner sind im Falle der Anwendung von öffentlich zugänglichen Daten. Folglich wird geschlossen, dass die Abweichungen der prognostizierten Überschwemmungsflächen vor allem durch den Unterschied in den Geländemodellen verursacht werden und viel weniger durch den Unterschied zwischen den Daten über Meeresspiegeln aus der Datenbank COPERNICUS und den gemessenen mareographischen Daten.

**Schlüsselwörter:** Meereshochwasser, Datenbank COPERNICUS, mareographische Messungen