

# Numerički proračuni međudjelovanja fluida i konstrukcije

---

**Bakica, Andro**

*Source / Izvornik:* **Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, Split, 14.-17. rujna, 2023. : zbornik radova, 2023, 140 - 145**

**Conference paper / Rad u zborniku**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.18>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:676916>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-22**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.13>

## OBALNA RANJIVOST I PLOVLJENJE NASELJA KAO POSLJEDICA PODIZANJA MORSKE RAZINE

**Andrea Tadić<sup>1</sup>, Igor Ružić<sup>1</sup>, Čedomir Benac<sup>1</sup>, Nino Krvavica<sup>1</sup>, Dado  
Jakupović<sup>2</sup>, Gorana Ljubičić<sup>2</sup>, Vedrana Petrović<sup>2</sup>**

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska, [andrea.tadic@uniri.hr](mailto:andrea.tadic@uniri.hr)

(2) Javna ustanova Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, Hrvatska

### Sažetak

Razina mora nastavlja rasti sve većom brzinom. Predviđa se da će događaji praćeni ekstremnim razinama mora, a koji su bili povijesno rijetki, postati češći na mnogim mjestima do 2050. godine. U ovom je radu prikazana analiza obalne ranjivosti povezana s porastom razine mora provedena za obalu Primorsko-goranske županije računajući standardno korišten indeks obalne ranjivosti (CVI). CVI je prilagođen razvedenoj hrvatskoj obali i definiran preko pet reprezentativnih varijabli. Rezultati pokazuju kako je manji dio Županije ranjiv, ali da su posebno ugrožena niska naseljena područja. Stoga su se za četiri najranjivija naselja provele analize plavljenja povezane s porastom morske razine. Preduvjet za kvalitetne analize su i precizne geodetske podloge. U ovom su slučaju podloge bili trodimenzionalni oblaci točaka. Analize plavljenja pokazuju da se razina rizika razlikuje od lokacije do lokacije te da će provedba mjera adaptacije zahtijevati pojedinačan pristup svakom ranjivom području.

*Ključne riječi: adaptacija, klimatske promjene, rast morske razine, obalna ranjivost, obalno plavljenje*

## COASTAL VULNERABILITY AND FLOODING OF SETTLEMENTS DUE TO SEA LEVEL RISE

### Abstract

The sea level continues to rise at an accelerating pace. Events associated with extreme sea levels, which were rare in the past, will become more frequent in many places by 2050. This paper presents an analysis of coastal vulnerability to sea level rise conducted for the coast of Primorje-Gorski Kotar County. The commonly used Coastal Vulnerability Index (CVI) was adapted for the indented Croatian coast and defined by five representative variables. The results show that only a small part of the county is vulnerable, but that the low-lying, populated areas are particularly vulnerable. Therefore, coastal flooding analyses were also made for the four most threatened settlements. A prerequisite for high-quality analyses is accurate geodetic data. In this case, the topographic data were three-dimensional point clouds. The flooding analyses show that the risk varies from place to place and that the implementation of adaptation measures requires an individual approach for each area at risk.

*Keywords: adaptation, climate change, sea level rise, coastal vulnerability, coastal flooding*

## 1. Uvod

Porast morske razine predstavlja egzistencijalnu prijetnju za priobalne zajednice i njihovo kulturno naslijeđe. Mnogi vrijedni lokaliteti hrvatske prirodne, povijesne i kulturne baštine smješteni su u blizini morske razine (MR) te će u slučaju velikog porasta razine mora biti izloženi poplavlivanju, pa i zauvijek izgubljeni ako se ne poduzmu zaštitne mjere. Procjene rasta srednje razine mora na hrvatskoj obali u rasponu su od 0,32 m do 0,65 m do 2100. godine, pri čemu neke procjene sežu i do vrijednosti od 1,1 m [1]. Kada se na njih pribroje utjecaji povremenih ekstremnih razina mora u rasponu od 0,84 m do 1,15 m, dobivaju se ekstremne povremene razine na kraju stoljeća u rasponu od oko 1,4 m do 2,2 m. Dugoročno gledajući, porast MR-a potencijalno je jedan od najskupljih učinaka klimatskih promjena na hrvatsku obalu [2]. Stoga je tijekom 2020. izrađena *Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora* [3]. U skladu s preporukama Protokola o integriranom upravljanju obalnim područjem Sredozemlja iz 2008. godine [4] ova će se Analiza uzimati u obzir kao stručna podloga prilikom izrade budućih izmjena i dopuna Prostornog plana Primorsko-goranske županije (PGŽ). Međutim, ocjena ranjivosti obalne linije bila je samo prvi korak prema umanjeњу negativnih posljedica podizanja razine mora. Projekt je zahtijevao i provedbu druge faze kako bi se konkretnije odredile moguće mjere zaštite što je podrazumijevalo detaljnije analize ugroženih lokacija na geodetskim podlogama centimetarske točnosti. U ovom su radu opisani osnovni rezultati ovih dviju faza projekta.

## 2. Metodologija istraživanja

### 2.1. Određivanje indeksa obalne ranjivosti

Obalna ranjivost određivala se dodjeljivanjem indeksa obalne ranjivosti (CVI, engl. *coastal vulnerability index*) [5]. Ovo je standardna metoda, ali s obzirom na karakteristike hrvatske obale, ipak je zahtijevala značajne prilagodbe. Osnovna korištena geodetska podloga bio je digitalni model terena rezolucije 25 m. Nakon prikupljanja geodetskih podloga prvi je korak bilo definiranje varijabli koje određuju obalnu ranjivost. Odabrano je njih pet: (a) geološka građa, (b) obalni nagib u odnosu na odrone i klizanja, (c) značajna visina vala, (d) obalno plavljenje, (e) postojanje žala. Ranjivost se procjenjivala na obalnoj liniji (OL) ukupne duljine 1.189 km, točkasto na svakih 25 m obalne linije. Svakom dijelu OL-a dodijeljena je vrijednost 1 – 5, najprije po svakoj pojedinoj varijabli (podindeksu), a u konačnici je izračunat i zbirni indeks obalne ranjivosti (CVI<sub>z</sub>) prema izrazu (1). Dodjeljivanje podindeksa i detaljniji metodološki okvir opisan je u objavljenoj studiji [3].

$$CVI_z = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 - e^2}{5}} \quad (1)$$

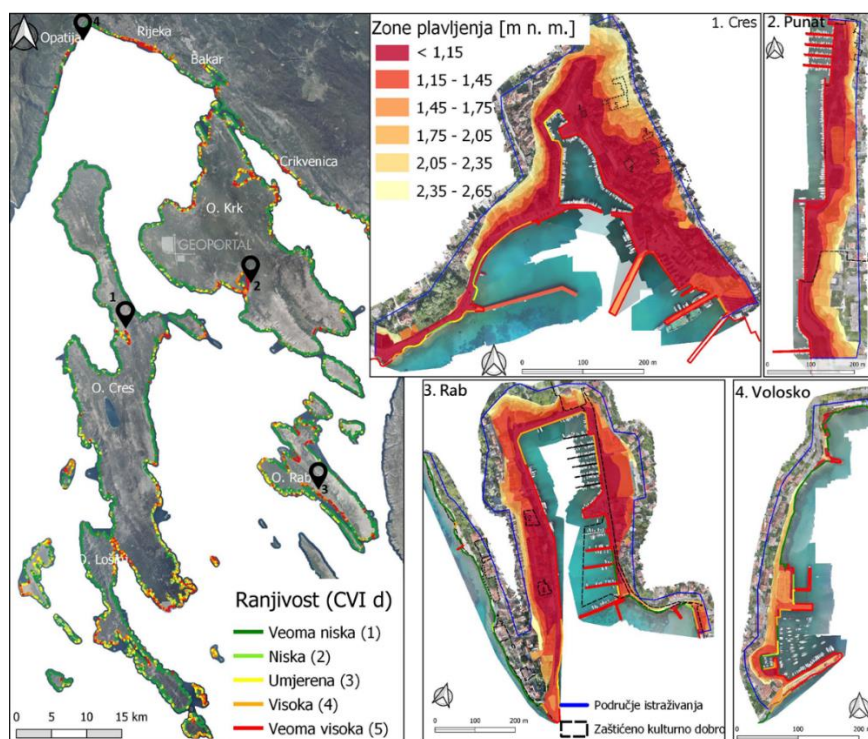
### 2.2. Analize obalnog plavljenja

Na temelju karte ranjivosti na obalno plavljenje i dostupnosti podloga odabrana su četiri naselja za detaljnije analize plavljenja, a to su Cres, Rab, Punat i Volosko (Slika 1.) Analize

plavljenja obalnih naselja za današnje i predviđeno stanje provedene su korištenjem 3D oblaka točaka i digitalnih ortofoto snimki snimljenih pomoću bespilotne letjelice (DJI Phantom 4 Advanced). Analizirano je šest scenarija razina mora, od 1,15 m n. m. (trenutna zabilježena plavljenja) do predviđenih ekstrema. U QGIS-u (v.3.16) su na temelju oblaka točaka određene veličine plavljenih površina, prostorna raspodjela relativnih dubina plavljenja, kao i ugrožena zaštićena kulturna dobra te broj ugroženih zgrada. Oblaci točaka omogućili su i simulacije djelovanja valova na plavljenim površinama što je značajan napredak u odnosu na dosadašnja istraživanja koja su bila ograničena neadekvatnom preciznošću podloga. Numeričke simulacije propagacije valova izvršene su u SWAN-u za različite MR-ove i mjerodavne vjetrove 50-godišnjeg povratnog perioda.

### 3. Rezultati

Rezultati provedenih analiza primarno su u obliku karti, a osnovne su prikazane na Slici 1. Ostatak se može pronaći unutar studije Analize ranjivosti [3].



**Slika 1.** Rezultati obalne ranjivosti PGŽ-a u odnosu na obalno plavljenje (lijevo, podloga: DOF 2020, DGU) i zone plavljenja u analiziranim naseljima

### 3.1. Obalna ranjivost

Rezultati istraživanja pokazali su izrazitu prostornu nehomogenost obalne ranjivosti PGŽ-a. Većina obale (67,4 %) niske je i veoma niske ranjivosti, dok je 13 % visoke i veoma visoke ranjivosti. Prosječna ranjivost županije je niska (2,02), ali izrazito zabrinjava ugroženost nekih područja, poput otoka Suska čija je cijela obala visoke i veoma visoke ranjivosti. Iako su rezultati zbirnog CVI-ja pokazali da je manji dio obale PGŽ-a ugrožen, negativan utjecaj pojedinih razmatranih varijabli ne smije se zanemariti. Čak 47,2 % obale određeno je visokom ili veoma visokom ranjivosti prema barem jednoj od analiziranih varijabli. Provedene analize pokazale su i da je 34,4 % obalne linije ranjivo na odrone i pojave klizišta zbog nepovoljnog obalnog nagiba. Zabrinjavajući je i podatak da je četvrtina obale (24 %) PGŽ-a visoke i veoma visoke obalne ranjivosti u odnosu na obalno plavljenje (Slika 1.). Prognoziranim rastom razine mora za 60 cm udio visoko i veoma visoko ranjive obale povećat će se na otprilike 30 %. U tom najugroženijem dijelu je većina obalnih naselja gdje su plavljenja česta već i sada.

### 3.2. Obalno plavljenje analiziranih naselja

Za četiri naselja određene su zone plavljenja u odnosu na ispitane scenarije. Karte su prikazane na Slici 1., a osnovni rezultati u Tablici 1.

Istraženi dio grada **Cresa** (1.219 m obalne linije bez uključenih obalnih građevina) u cijelosti se nalazi unutar zaštićene kulturno-povijesne cjeline upisane u Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske. Pri današnjim povišenim MR-ovima (scenarij < 1,15 m n. m.) plavi površina veličine 44.793 m<sup>2</sup>, odnosno 36,7 m<sup>2</sup> po metru obalne linije (m<sup>2</sup>/m' OL). Dubine plavljenja su pri trenutnim plavljenjima male pa ne dolazi do veće materijalne štete, ali porastom MR-a dubine plavljenja postat će opasne za ljude i građevine. Rizik će povećavati i valovi (viši od 30 cm) koji će se širiti plavljenim područjem.

**Tablica 5.** Pregled rezultata analiza plavljenja

	Scenarij	Cres	Rab	Punat	Volosko
Površina plavljenja po m' OL [m <sup>2</sup> /m']	< 1,15	36,7	17,5	31,3	2,6
	1,15 – 1,45	47,3	28,2	43,6	6,2
	1,45 – 1,75	53,2	32,0	51,2	8,8
	1,75 – 2,05	56,3	33,9	57,5	10,7
	2,05 – 2,35	59,5	35,7	62,6	12,3
	2,35 – 2,65	62,7	36,7	65,2	13,2
Dubina plavljenja [m]*	< 1,15	0,3 (0,6)	0,3 (0,6)	0,3 (0,2)	0,5
	1,15 – 1,45	0,5 (0,9)	0,4 (0,9)	0,5 (0,3)	0,4 (0,2)
	1,45 – 1,75	0,8 (>1,1)	0,6 (>1,1)	0,8 (0,6)	0,5 (0,5)

\* prva vrijednost odnosi se na medijan dubina izračunat u QGIS-u, a vrijednost u zagradi je najveća dubina plavljenja ispred zgrada za pojedini scenarij

U **Rabu** plavi slična površina kao u Cresu, ali „opterećenje“ na obalnu liniju (u dužini od 2.643 m) je oko dva puta manje (17,5 m<sup>2</sup>/m' OL). More u prosjeku zadire 35 m prema kopnu, a na zapadnoj obali luke plave i ulice smještene 64 m od obale. Veliki dio plavljene površine (80,7 – 89,6 %) nalazi se unutar Registrom zaštićene kulturno-povijesne cjeline grada Raba. I ovdje osnovni problem predstavljaju velike dubine plavljenja. Podizanjem MR-a povećat će se dubine plavljenja, a na plavljenim površinama javit će se valovi viši od 15 cm što će dodatno ometati funkcioniranje prometne infrastrukture, obalnih građevina te kanalizacijskog sustava. Plavljenje **Punta** slične je veličine kao u Cresu (Tablica 1.), ali ovdje su rizici vezani uz obalno plavljenje višestruko manji zbog početnog odmaka izgradnje od obalne linije. Istraženo je 919 m obalne linije Punta, a priobalno je područje većim dijelom (oko 75 %) zaštićeno kulturno dobro. Predviđenim podizanjem razine mora zanemarivo će se povećati površine plavljenja zbog povoljnih nagiba terena, a osnovni problem će i ovdje predstavljati povećanje dubina plavljenja i širenje valova. S današnjim plavljenjima valovi dosežu značajnu visinu od 10 cm na udaljenosti od 20-ak m od OL-a. Međutim, valovi se šire neizgrađenim javnim površinama i ne dosežu zgrade. Tek s porastom MR-a na 1,75 m n. m. do zgrada će stizati viši valovi (oko 20 cm).

Rezultati analiza plavljenja provedenih za 764 m obalne linije u **Voloskom** pokazuju da plavi uglavnom južni dio naselja gdje je ugroženo nekoliko zgrada (Slika 1.) Osnovni problem ovdje predstavlja plavljenje lukobrana te zapljuskivanje valova na sjevernom dijelu naselja što uvelike ugrožava sigurnost prometa već i pri prvom scenariju. Cijelo područje je, također, zaštićeno kulturno dobro što treba uzeti u obzir prilikom donošenja adaptacijskih mjera.

#### **4. Diskusija**

Obalni reljef istraživanog područja veoma je složen. Obalna linija je razvedena, složene geološke građe i obalne morfologije zbog čega provedene analize ranjivosti obalnog područja u odnosu na obalni nagib treba sagledati u skladu s korištenim mjerilom. Problem mjerila u provedenim analizama najviše se odražava kroz slabu vertikalnu preciznost i veliki razmak između točaka DEM-a (25 m) na često veoma strmom terenu. To može utjecati na preciznost provedenih analiza, pogotovo ako se rezultati analize obalne ranjivosti projiciraju i na područje iza obalne linije, odnosno definiranje granice plavljenja obalnog područja za određene scenarije podizanja razine mora. Iz ovog razloga rezultati analize ranjivosti koriste se za identifikaciju potencijalno ranjivih područja PGŽ-a. Detaljnije analize provedene u drugoj fazi za Cres, Rab, Punat i Volosko potvrdile su zaključke prethodnih istraživanja iz prve faze projekta. Pokazano je i da dio postojeće obalne infrastrukture (lukobrani, obale) u većini istraživanih naselja već danas nije funkcionalan tijekom ekstremno visokih razina mora. Takvu infrastrukturu potrebno je prilikom redovnog održavanja i sanacija prilagoditi trenutnom i predviđenom djelovanju mora te očekivanim ekstremnim MR-ovima. Ovim istraživanjem pokazalo se da je kvalitetna analiza plavljenja osnovni preduvjet za razvoj metoda adaptacije i konkretnih rješenja zaštite, a primarni cilj ovakvih studija je primjena rezultata upravo za potrebe integralnog upravljanja obalnim područjem i provođenje aktivnosti za održivo ublažavanje plavljenja u budućnosti. Također, najveća zabilježena morska razina od 1,15 m n. m. definirana je rekonstrukcijom razine plavljenja na osnovu opažanja lokalnog stanovništva, zbog čega su moguća određena odstupanja od stvarnih vrijednosti. Za potrebe

točnijih procjena morskih razina stoga se preporučuje i povećanje broja mareografskih postaja na području PGŽ-a. Mjerenje MR-a s visokom točnosti i vremenskom rezolucijom ključno je za monitoring i analizu hazarda tijekom ekstremnih vodostaja, kao i za planiranje obalnog prostora i uspostavu sustava ranog upozoravanja.

## **5. Zaključak**

Razvijena je metodologija analize obalne ranjivosti koja je prilagođena specifičnostima razvedene i geološki nehomogene obale istočnog Jadrana. Obalna ranjivost definirana je uz pomoć standardno korištenog indeksa obalne ranjivosti koji se sastoji od više parcijalnih indeksa (podindeksa): geološke građe, obalnog nagiba, djelovanja valova, plavljenja obale i žala. Definirana je nova formula kojom su se objedinila djelovanja ovih varijabli, a kojom se naglasio povoljan učinak koji žala imaju na sveukupnu ranjivost obale. Ovo je i jedna od rijetkih studija koja je razmatrala utjecaj odrona koji se na našoj obali često dešavaju. Ranjivost obalnog pojasa PGŽ-a zbog podizanja MR-a većinom je povoljna, ali se pokazalo da su najugroženija područja upravo ona naseljena. Nastavak istraživanja podrazumijevao je provedbu analiza plavljenja ugroženih naselja: Cresa, Raba, Punta i Voloskog formiranih još u srednjem vijeku. S obzirom da su to tipična priobalna naselja RH, velika je mogućnost primjene razvijene metodologije.

Analize plavljenja temeljene su na produktima daljinskih istraživanja – trodimenzionalnim oblacima točaka koji su danas već postali standard geodetskih snimanja. Oblaci točaka omogućili su provođenje preciznih analiza površina i dubina plavljenja za različite scenarije podizanja MR-a i rizika povezanih s njihovim pojedinačnim ili zbirnim djelovanjem. Primjena opisane metodologije omogućuje tako precizno zoniranje i stupnjevanje rizika, što je osnovni preduvjet (podloga) za definiranje politike adaptacije pojedinog naselja. Projektima prilagodbe treba pristupiti planski i multidisciplinarno, a presudna će biti koordinacija između upravljačkih tijela i prostornih planera.

## **Literatura**

- [1] Republika Hrvatska: Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_04\\_46\\_921.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_46_921.html), 06.07.2023.
- [2] Branković, Č., Bray, J., Callaway, J., Dulčić, J., Gajić-Čapka, M., Glamuzina, B., Heim, I., Japec, L., Kalinski, V., Landau, S., Legro, S., OIKON, Ltd, Orli, F., Patarčić, M., Srnec, L., Šimleša, D., Zaninović, K., Znaor, D.: Dobra klima za promjene, Klimatske promjene i njihove posljedice na društvo i gospodarstvo u Hrvatskoj, UNDP, 2009
- [3] Ružić, I., Benac, Č., Tadić, A., Krvavica, N., Petrović, V., Ljubičić, G., Jakupović, D.: Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora, JU Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, 2022
- [4] Europska unija: Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean, 2009
- [5] Gornitz, V.: Global coastal hazards from future sea level rise, *Global and Planetary Change*, 3(4), pp. 379–398, 1991, doi: 10.1016/0921-8181(91)