

# Analiza obalnog plavljenja uz pomoć trodimenzionalnih oblaka točaka

Igor Ružić<sup>1</sup>, Dado Jakupović<sup>2</sup>, Andrea Tadić<sup>3</sup>, Vedrana Petrović<sup>4</sup>, Gorana Ljubičić<sup>5</sup>, Nino Krvavica<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, RH, iruzic@uniri.hr

<sup>2</sup> JU Zavod za prostorno uređenje PGŽ-a, Splitska 2/II, Rijeka, RH, dado.jakupovic@pgz.hr

<sup>3</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, RH, andrea.tadic@uniri.hr

<sup>4</sup> JU Zavod za prostorno uređenje PGŽ-a, Splitska 2/II, Rijeka, RH, vedrana.petrovic@pgz.hr

<sup>5</sup> JU Zavod za prostorno uređenje PGŽ-a, Splitska 2/II, Rijeka, RH, gorana.ljubicic@pgz.hr

<sup>6</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, RH, nino.krvavica@uniri.hr

## Sažetak

U ovom radu prezentirani su rezultati istraživanja projekta „Analiza ugroženosti od obalnog plavljenja ranjivih naselja Primorsko-goranske županije (PGŽ)“. Istraživanje je provedeno u suradnji Građevinskog fakulteta u Rijeci i JU Zavoda za prostorno uređenje PGŽ-a. Rezultati istraživanja će se koristiti za planiranje obalnog područja istraženih pilot područja. Preciznost i rezolucija dostupnih podloga pokazali su se kao najveći problem za detaljnu, pojedinačnu analizu obalnog plavljenja i obalne ranjivosti. Bez preciznih podataka nije moguće provesti kvalitetne analize obalnog plavljenja, propagacije valova i s time povezanih rizika. U ovom radu detaljno su ispitane ugroženosti naselja Cresa, Raba, Punta i Voloskog. Za odabrana područja su za provedena istraživanja izrađene adekvatne podloge visoke rezolucije (1 točka / 2 cm) i preciznosti ( $\pm 5$  cm). To je višestruko preciznije od predviđenih promjena razine mora ( $60 \pm 15$  cm) do kraja 21. st. Iz fotografija snimljenih bespilotnom letjelicom generirani su trodimenzionalni oblaci točaka. Njihova primjena omogućila je precizno kartiranje plavljenja obalnog područja za sadašnje stanje i u slučaju predviđenog podizanja razine mora zbog klimatskih promjena. Oblaci točaka su korišteni i kao podloga za numeričke simulacije valovanja na poplavljenim područjima. Uz pomoć trodimenzionalnih oblaka točaka tako je bilo moguće definirati potencijalne rizike uslijed zajedničkog djelovanja obalnog plavljenja i valovanja, što nije moguće provesti koristeći standardne podloge. Rezultati istraživanja dali su prostornu distribuciju obalnog plavljenja s mjerodavnim dubinama vode i značajnim visinama valova za sadašnje i predviđeno stanje. Korišteni oblaci točaka su i foto-realistični te pružaju mogućnost lakše vizualizacije dosega i dubina plavljenja što će pomoći prilikom prezentacije rezultata projekta lokalnom stanovništvu.

**Ključne riječi:** *bespilotna letjelica, klimatske promjene, obalno plavljenje, rast razine mora, trodimenzionalni oblak točaka.*

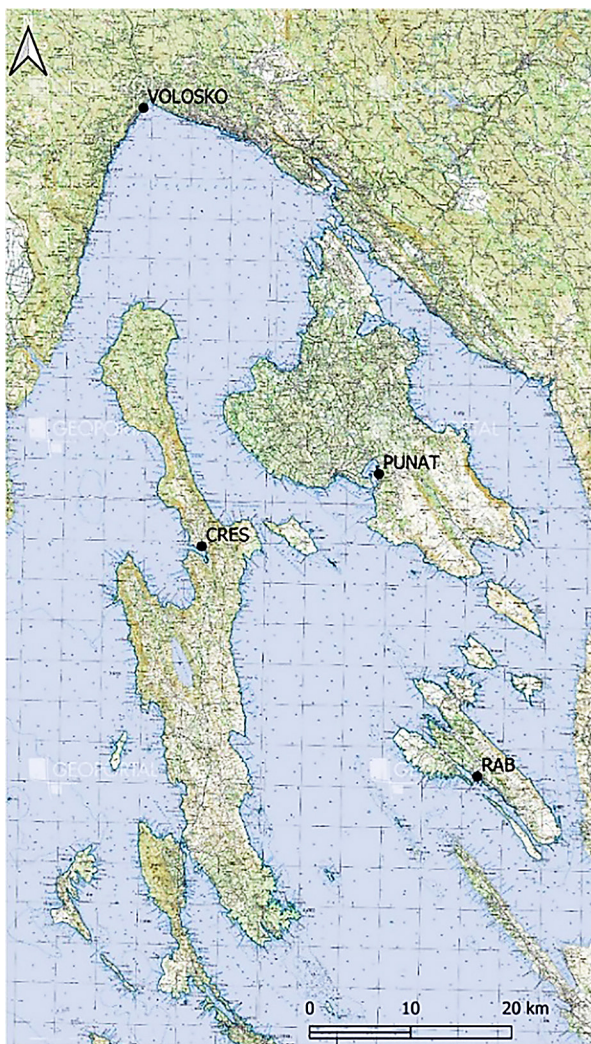
## 1. Uvod

U ovom radu provedena je analiza ugroženosti od obalnog plavljenja ranjivih naselja Primorsko-goranske županije: Cresa, Raba, Punta i Voloskog (Slika 1) korištenjem trodimenzionalnih (3D) oblaka točaka snimljenih pomoću bespilotne letjelice. Istraživanja su provedena u sklopu projekta „Analiza ugroženosti od obalnog plavljenja ranjivih naselja Primorsko-goranske županije (PGŽ)“ (Građevinski fakultet u Rijeci, 2021). Procjena ranjivosti čitavog obalnog područja Primorsko-goranske županije (PGŽ) provedena je u sklopu projekta „Analiza ranjivosti obalnog područja Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora“ 2020. godine, na osnovu koje su detektirana ranjiva naselja.

Provedene su analize ranjivosti za sadašnje stanje i više scenarija podizanja morske razine (MR), koji se

moгу prilagoditi i budućim scenarijima podizanja razine mora. Naime, predviđanja podizanja razine mora često se korigiraju zbog niza promjenjivih ulaznih parametara, dostupnosti preciznijih podloga, korištenja različitih modela i sl.

Već danas smo svjedoci sve češćeg i intenzivnijeg plavljenja obalnih naselja u Republici Hrvatskoj (RH), što će u budućnosti biti i puno izraženije s obzirom da se očekuje značajan porast razine mora od 19–33 cm do 2065. godine, te 32–65 cm do 2100. godine (RH, 2020). Prema nekim istraživanjima mogući su i nepovoljniji scenariji (Barić i dr., 2008). Osobito opasne mogu biti pojave olujnih uspora, ako se koincidiraju s plimom, vjetrovnim valovima i kretanjem mase vode prema plitkoj obali (Penzar i dr., 2001).



Slika 1: Pregledna karta obalnog područja PGŽ-a (URL 1)

Analize plavljenja obalnih naselja za današnje i predviđeno stanje provedene su korištenjem 3D oblaka točaka snimljenih pomoću bespilotne letjelice. To je omogućilo kvalitetne analize površina i dubina vode obalnog plavljenja, te djelovanja valova na plavljenim površinama, što je značajan napredak u odnosu na dosadašnja istraživanja koja su bila ograničena neadekvatnom preciznošću podloga (RH, 2020).

## 2. Metodologija

Snimanje naselja Cres, Rab, Punat i Volosko provedla je tvrtka GEO-VV d.o.o. Rijeka. Snimanje iz zraka obavljeno je bespilotnom letjelicom DJI PHANTOM 4 Advanced (digitalna kamera DJI  $f = 24$  mm). Izrada digitalne ortofoto karte visoke rezolucije i digitalnog modela terena obavljena je pomoću programa PIX4Dmapper (*photogrammetry and drone mapping*). Geodetsko snimanje pomoćnih i kontrolnih točaka izvršeno je pomoću dvofrekventnog satelitskog sustava za kinematiku, GNSS uređaja Trimble R4 i preciznom mjernom stanicom Trimble S8. Izmjera je obavljena u službenom položajnom (HTRS96) i visinskom (HVR571) sustavu RH.

Analize i prikazi rezultata istraživanja obalnog plavljenja temeljeni su na produktima snimanja bespilotnom letjelicom: digitalnoj ortofoto (DOF) karti visoke rezolucije, digitalnom modelu terena (DMT) i 3D oblaku točaka. Prethodno analizama plavljenja, oblaci točaka su se „očistili“ (vozila, plovila, vegetacija i sl.).

Numeričke simulacije valovanja provedene su pomoću numeričkog modela SWAN. Numerički model treće generacije za primjenu u obalnim područjima, *Simulating Waves Nearshore* (SWAN), temelji se na Eulerovoj formulaciji ravnotežne jednadžbe spektralnog valnog djelovanja (Booij i dr. 1999.). Provedene su numeričke simulacije valovanja 50-godišnjeg povratnog perioda za današnju visoku morsku razinu i u slučaju povećanja morske razine za 60, 120, 150 i 180 cm.

Rezultati istraživanja prikazani su u tekstualnom i digitalnom obliku (GIS), kao i u foto-realističnom prikazu u obliku 3D oblaka točaka (mjerilo 1 : 500 do 1 : 1.000), zbog lakšeg korištenja, odnosno razumijevanja lokalnog stanovništva za predviđene promjene.

## 3. Rezultati

Provedena je analiza plavljenja obalnih naselja Cresa, Raba, Punta i Voloskog (Slika 1) za najveću zabilježenu MR od 1,15 m n. m. i više scenarija podizanja razine mora.

### 3.1. Plavljenja obalnog područja grada Cresa

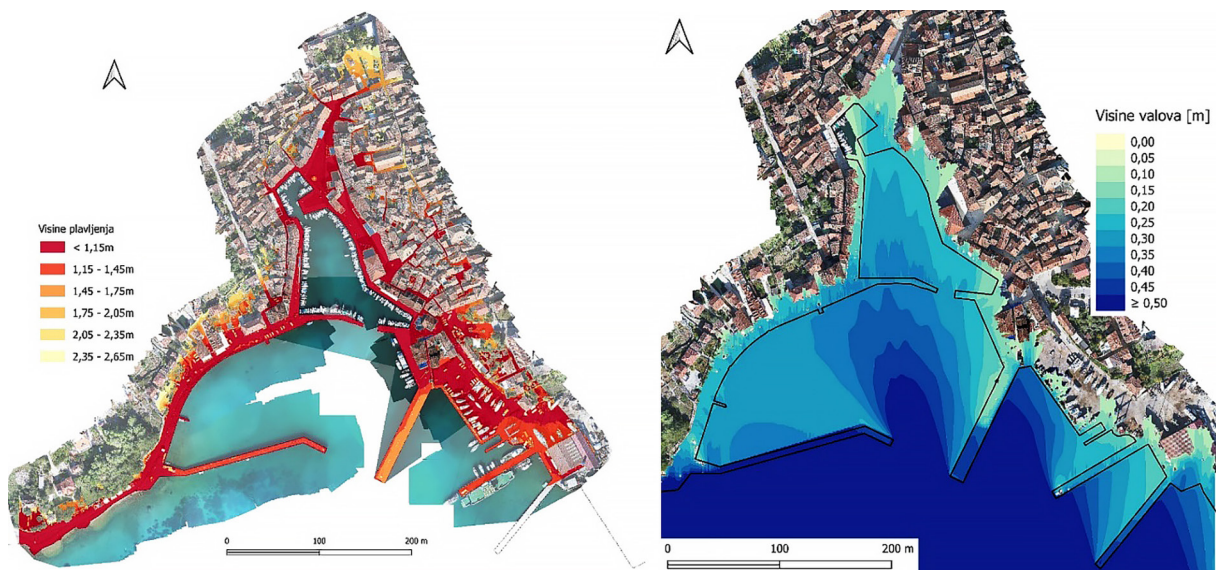
Posljednjih godina sve češće dolazi do plavljenja centra, odnosno stare jezgre grada Cresa. Uzrok tome je podizanje razine mora i slijevanje terena. Od XV. st., kada je formiran grad, do danas došlo je do podizanja srednje razine mora za više od 50 cm (Šegota, 1976).

Na Slici 2 prikazane su površine obalnog plavljenja grada Cresa za MR od 1,15 m n. m. do 2,65 m n. m. i značajne visine vala u slučaju porasta morske razine na 1,75 m n. m.

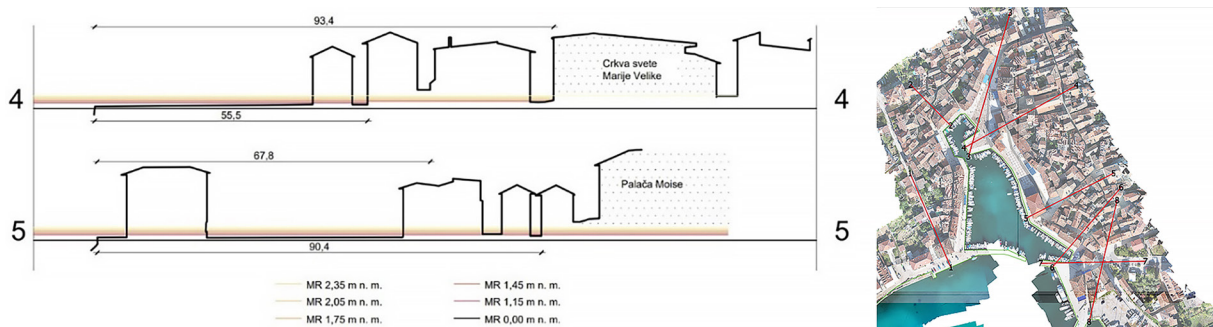
Danas već može doći do plavljenja površine veličine 24.439 m<sup>2</sup> u gradu Cresu, što je velika površina. Međutim, dubine plavljenja su male pa ne dolazi do značajnije materijalne štete. Porastom MR-a za 30, 60 i 90 cm može doći do plavljenja površina od 30.822, 33.758 i 35.763 m<sup>2</sup>. Porastom MR-a ne dolazi do značajnog povećanja plavljenih površina zbog povećanja nagiba terena.

U slučaju porasta razine mora tijekom ekstremnih događaja za 60 cm mogu se javiti valovi viši od 30 cm na površinama zahvaćenim obalnim plavljenjem, s dubinama vode većim od 1 m (Slika 2), što dodatno povećava opasnosti i potencijalni nastanak oštećenja.

Kako bi se dobio dodatan i realan uvid u dubine obalnih plavljenja, napravljen je prikaz poprečnih presjeka s građevinama i razinama plavljenja za predviđene scenarije (Slika 3).



Slika 2: Površine obalnog plavljenja grada Cresa za različite MR-ove (lijevo). Značajne valne visine (SE 50-god.PP) za MR 1,75 m n. m. (desno)



Slika 3: Prikaz dubina plavljenja karakterističnih poprečnih presjeka grada Cresa (Građevinski fakultet u Rijeci, 2021).

### 3.2. Plavljenja obalnog područja grada Raba

Kao i u slučaju grada Cresa u posljednje vrijeme sve češće dolazi do plavljenja centra grada Raba. Primarni uzrok je podizanje razine mora. Na Slici 4 prikazane su površine obalnog plavljenja grada Raba za razine mora od 1,15 m n. m. do 2,65 m n. m. i značajne visine vala u slučaju porasta morske razine za 0,60 m.

Danas već može doći do plavljenja površina od 33.670 m<sup>2</sup> u gradu Rabu, porastom MR-a za 30, 60 i 90 cm može doći do plavljenja površina od 54.370, 62.840 i 67.890 m<sup>2</sup>. Porastom MR-a dolazi do značajnijeg povećanja plavljenih površina u odnosu na grad Cres zbog manjih nagiba terena grada Raba.

U slučaju porasta razine mora tijekom ekstremnih događaja za 60 cm mogu se javiti valovi viši od 15 cm na površinama zahvaćenim obalnim plavljenjem (Slika 4), s dubinama vode od 1 m na kritičnim dijelovima obale, što dodatno povećava opasnosti i potencijalni nastanak oštećenja.

### 3.3. Plavljenja obalnog područja naselja Punat

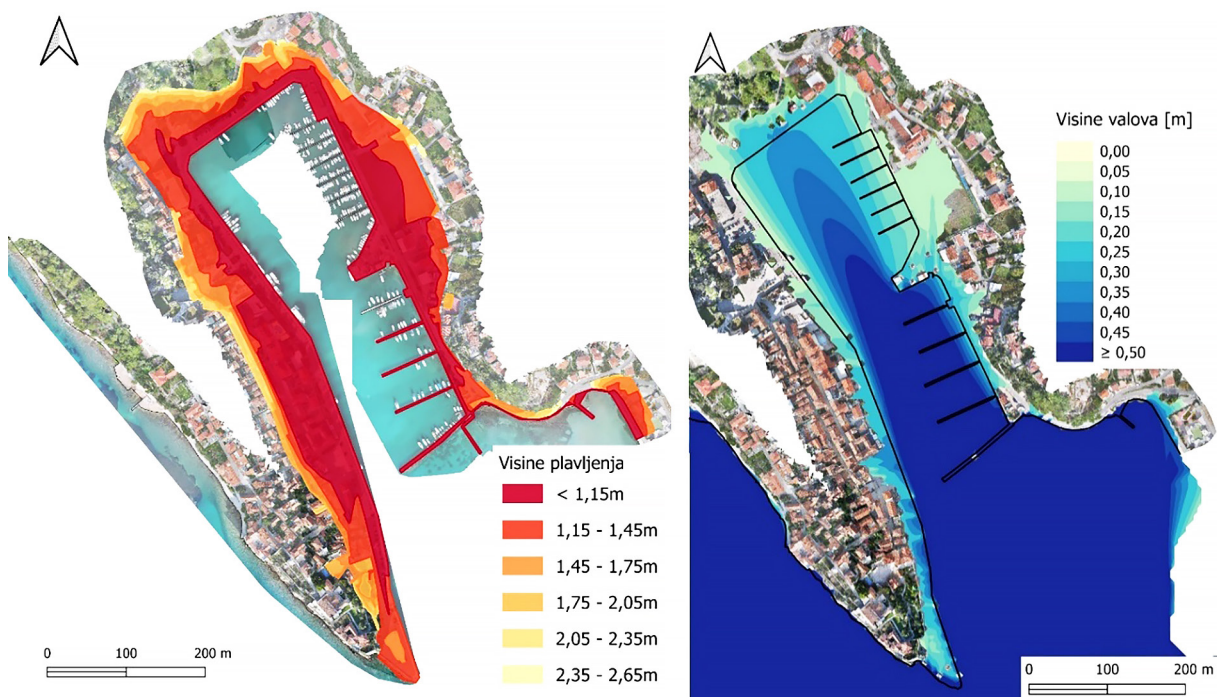
Na Slici 5 prikazane su površine obalnog plavljenja naselja Punat za razine mora od 1,15 m n. m. do 2,65

m n. m. i značajne visine vala u slučaju porasta morske razine za 0,60 m.

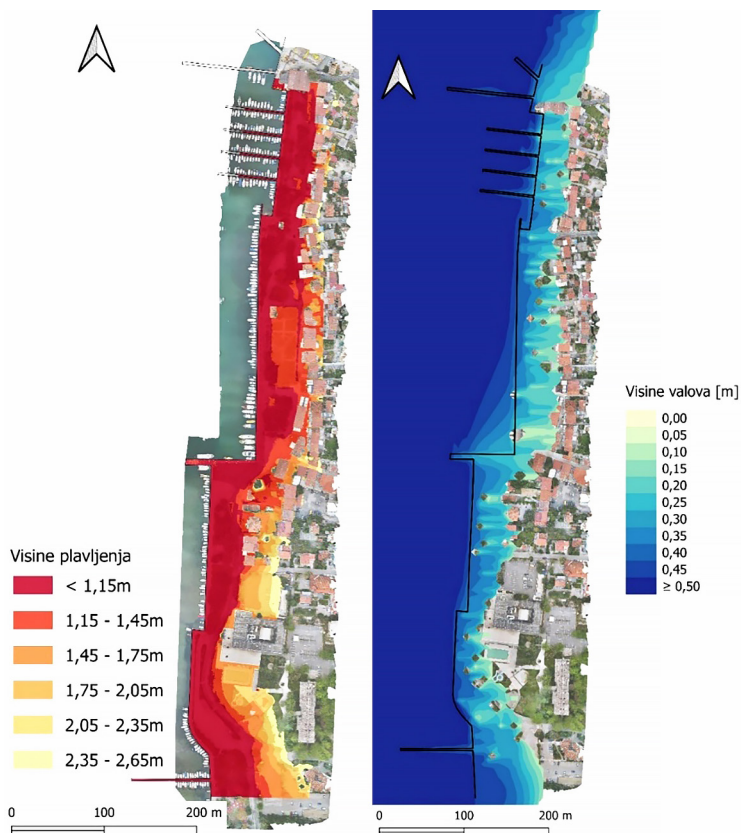
Za postojeće stanje može doći do plavljenja značajnih površina u Puntu (28.320 m<sup>2</sup>), no plavljenje većinom ne seže do građevina. Također, dubine plavljenja uglavnom su manje od 30 cm pa ne postoje veći rizici. Daljnjim povećanjem kritičnog MR-a za 30, 60 i 90 cm može doći do plavljenja površina od 35.860, 39.880 i 43.440 m<sup>2</sup>. Većina plavljenih površina su površine nasute tijekom posljednjih 50-ak godina, koje nisu izgrađene već su javni prostori poput parkova, tržnice, prometnica i parkinga. U slučaju porasta razine mora tijekom ekstremnih događaja za 60 cm mogu se javiti valovi viši od 50 cm na površinama zahvaćenim obalnim plavljenjem (Slika 5), s dubinama vode od 1 m, što neće izazvati veće opasnosti i materijalne štete iz razloga što se većina plavljenja događa na neizgrađenim površinama.

### 3.4. Plavljenja obalnog područja naselja Volosko

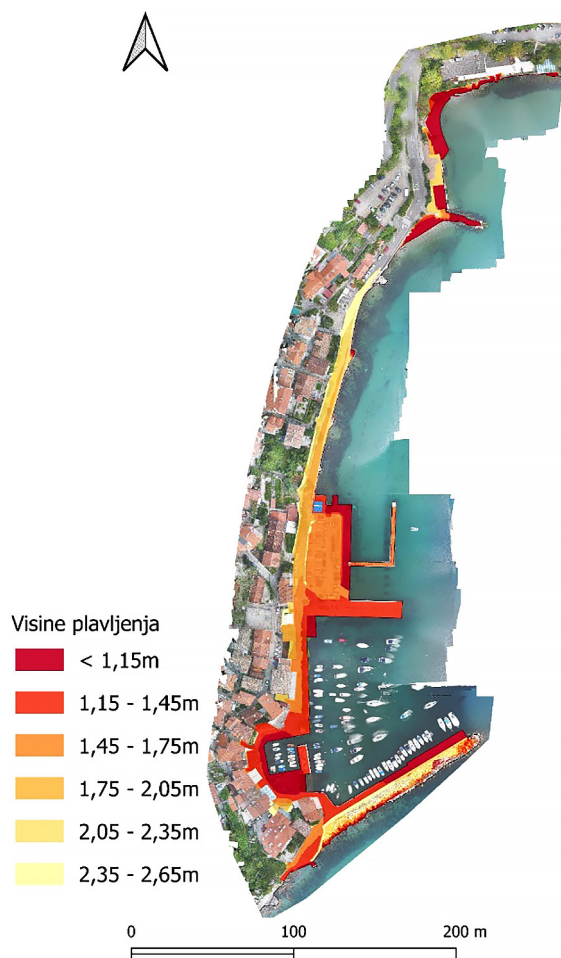
Iako posljednjih godina sve češće dolazi do plavljenja obalnih naselja, u Voloskom ne dolazi do većih obalnih plavljenja, što se neće značajno povećati predviđenim porastom MR-a (Slika 6).



Slika 4: Površine obalnog plavljenja grada Raba za različite MR-ove (lijevo). Značajne valne visine (SE 50-god. PP) za MR 1,75 m n. m. (desno) (Građevinski fakultet u Rijeci, 2021).



Slika 5: Površine obalnog plavljenja naselja Punat za različite MR-ove (lijevo). Značajne valne visine (SE 50-god. PP) za MR 1,75 m n. m. (desno) (Građevinski fakultet u Rijeci, 2021).



Slika 6: Površine obalnog plavljenja naselja Volosko za različite MR-ove (Građevinski fakultet u Rijeci, 2021).

Za postojeće stanje može doći do plavljenja manjih površina (2.030 m<sup>2</sup>). Daljnjim povećanjem kritičnog MR-a za 30, 60 i 90 cm može doći do plavljenja površina od 4.270, 6.260, 7.280 m<sup>2</sup>. Većina plavljenih površina su na obalnim građevinama poput gatova, obala i lukobrana. U voloskom će biti izražen problem pretjeranog prelijevanja preko tih obalnih građevina, što može izazvati sekundarne negativne posljedice.

## 4. Zaključak

Aдекватne podloge u obliku trodimenzionalnih oblaka točaka omogućile su provedbu kvalitetnih analiza obalnog plavljenja na četiri lokacije u PGŽ-u: u Cresu, Rabu, Puntu i Voloskom. Rezultati istraživanja dali su prostornu distribuciju obalnog plavljenja s veličinama površina, mjerodavnim dubinama vode i značajnim visinama valova za sadašnje i predviđeno stanje, što je jedan od ulaznih podataka za buduće analize rizika.

Svi dobiveni rezultati prikazani su na digitalnim ortofoto kartama visoke rezolucije čime će se uvelike olakšati i dijeljenje rezultata s korisnicima prostora.

Stare jezgre Raba i Cresa već su danas dosta ugrožene, a u budućnosti će uz povećanja plavljenih površina doći i do povećanja dubina. Moguć je i porast visina valova na poplavljenim područjima što može predstavljati dodatnu opasnost. Koncept obrane starih gradskih jezgri od obalnog plavljenja poprilično je složen. Potrebno ga je temeljiti na analizi cjelokupnog, šireg područja, a ne samo pojedinih (problematičnih) segmenata obale, te bi s planiranjem mjera zaštite trebalo krenuti već sada.

Punat danas nema velikih problema s plavljenjem, iako plave značajne površine. Nasuti dijelovi nakon 60-ih godina 20. stoljeća neizgrađene su javne površine. Građevine ne trpe oštećenja jer postoji dovoljno širok prostor do obalne linije za obranu prvih građevina. Na tim područjima će biti lakše provesti i dodatne mjere za smanjenje budućih plavljenja.

U Voloskom je od obalnog plavljenja ugrožen manji broj građevina u južnom dijelu naselja – u centru i u staroj lučici (Mandrač). Sjeverni dio Ulice Frana Supila ugrožen je djelovanjem valova i visokih razina mora, i tu će biti potrebno provesti proširenje obale kako bi se smanjilo zapljuskivanje.

Dio postojeće obalne infrastrukture (lukobrani, obale) 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 morskim razinama.

## Literatura

Barić, A., Grbec, B., Bogner, D. (2008): Potential implications of sea-level rise for Croatia, *Journal of Coastal Research*, 24, 299–305.

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999): A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104, 7649–7666.

Građevinski fakultet u Rijeci (2021): Analiza ugroženosti od obalnog plavljenja ranjivih naselja Primorsko-goranske županije, Rijeka

Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M. (2001): Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, Hrvatski hidrografski institut, Split.

Republika Hrvatska (2020): Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu, Narodne novine, NN 46/2020, 921.

Šegota, T. (1976): Promjena razine Jadranskog mora prema podacima mareografa u Bakru i Splitu, *Geografski glasnik*, 38, 301–312.

URL 1: Državna geodetska uprava, <https://geoportal.dgu.hr/> (23. 6. 2022.)

# Analysis of Coastal Flooding Using Three-dimensional Point Clouds

## Abstract

---

This paper presents the results of the research project "Analysis of coastal flood risk of vulnerable settlements in Primorje-Gorski Kotar County (PGŽ)". The research was conducted in cooperation with the Faculty of Civil Engineering in Rijeka and the Institute of Spatial Planning of PGŽ. The results of the research will be used for the planning of the coastal area of the studied pilot areas. The accuracy and resolution of the available maps proved to be the biggest problem for a detailed, individual analysis of coastal flooding and vulnerability. Without accurate data, it is impossible to perform a quality analysis of flooding, wave propagation, and associated risks. In this paper, the hazards for Cres, Rab, Punat and Volosko are studied in detail. For the selected areas, high-resolution (1 point / 2 cm) and precise ( $\pm 5$  cm) maps were created for the investigations carried out. This is significantly more accurate than the predicted sea level changes ( $60 \pm 15$  cm) by the end of the century. Three-dimensional point clouds were created from images taken by an unmanned aerial vehicle. Their application enabled accurate mapping of coastal flooding for the current sea level and for projected rise due to climate change. The point clouds were also used as a basis for numerical wave simulations in flooded areas. Using three-dimensional point clouds, it was thus possible to define potential risks from the interaction of coastal flooding and waves, which is not possible with standard data. The results of the study provided the spatial distribution of coastal flooding with the corresponding water depths and significant wave heights for the current and predicted conditions. The point clouds used are also photorealistic and allow for easier visualization of the range and depth of floods, which is helpful in presenting the project results to the local community.

**Keywords:** *climate change, coastal flooding, sea level rise, three-dimensional point cloud, unmanned aerial vehicle*