

RANJIVOST OBALA OTOKA KRKA

dr. sc. Čedomir Benac, prof. emerit.

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet,
R. Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska,
cbenac@uniri.hr

Andrea Tadić, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet,
R. Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska

Vedrana Petrović, mag. oec. spec.

JU Zavod za prostorno uređenje
Primorsko-goranske županije,
Splitska 2, Rijeka, Hrvatska

Dado Jakupović, mag. geogr.

JU Zavod za prostorno uređenje
Primorsko-goranske županije, Splitska 2,
Rijeka, Hrvatska

Gorana Ljubičić, dipl. ing. arh.

JU Zavod za prostorno uređenje
Primorsko-goranske županije,
Splitska 2, Rijeka, Hrvatska

doc. dr. sc. Nino Krvavica,

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet,
R. Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska

doc. dr. sc. Igor Ružić,

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet,
R. Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska

U ovom radu analizirana je ranjivost obala otoka Krka. Određivanje indeksa ranjivosti obale (CVI) izvršeno je za segmente obale duljine 25 m, a na temelju pet odabranih parametara (varijabli): geološke građe, obalnog nagiba, značajne visine valova, izloženosti plavljenju te postojanja i utjecaja žala. Prikazani rezultati analiza ranjivosti obala pokazali su složenost istraživanog područja, sa značajnim varijacijama indeksa ranjivosti duž obale otoka. Ispitani su i scenariji plavljenja za prognozirani porast morske razine za 60 cm do kraja stoljeća, odnosno 120 cm kod ekstremnih plima. Potvrđena je visoka ranjivost obalnih naselja na otoku Krku, prvenstveno zbog izloženosti plavljenju. Pokazalo se da je potrebno stvoriti baze podataka na temelju dovoljno točnih podataka o reljefu kopna i podmorja, geološkoj građi i oceanografskim značajkama, kako bi se mogao odrediti stupanj ranjivosti te mjere umanjenja hazarda i rizika.

Ključne riječi: klimatske promjene, rast razine mora, indeks obalne ranjivosti, marinska erozija, prirodni hazard, rizik, Kvarner, Jadransko more

1. UVOD

Litoralizacija, odnosno koncentracija stanovništva i gospodarskih aktivnosti u obalnom pojasu, danas je globalna pojava. Razvijene države u okviru integralnog upravljanja obalnim područjem posebnu pažnju posvećuju procjeni stupnja hazarda od očekivanog ubrzanog rasta morske razine, ali i rizika kao neminovne posljedice te pojave (Nicholls i Wilson, 2001.; Davoudi i dr., 2009.). Obalna područja su kompleksna i dinamična područja u kojima se odvija niz socioekonomskih aktivnosti, koje su često u sukobu s očuvanjem prirodnih resursa. Intenzivne promjene geomorfoloških procesa u priobalnim područjima, zbog sve intenzivnijih oluja i ubrzanog podizanja razine mora prouzročeni klimatskim promjenama povećavaju već visoku ranjivost priobalnih sustava (De Pippo i dr., 2008.). Najveći utjecaji klimatskih promjena na obalna područja povezani su s

meteorološkim promjenama, prvenstveno s porastom razine mora (Richards i Nicholls, 2009.).

Neki od postojećih metodoloških pristupa koji se za analizu obalne ranjivosti mogu i kombinirati su:

- metode temeljene na indeksu (engl. *index-based methods*) (Gornitz, 1990.; Cooper i McLaughlin, 1998.; Özyurt i Ergin, 2010.; Le Cozannet i dr., 2013.; Mani Murali i dr., 2013.; Di Paola i dr., 2014.; Benassai i dr., 2015.; Shanganlall i dr., 2018.)
- metode zasnovane na pokazateljima (engl. *indicator-based methods*) (Bucx i dr., 2010.; Özyurt i Ergin, 2010.; Nguyen i dr., 2016.; Rogers i Woodroffe, 2016.; Hadipour i dr., 2020.)
- sustavi potpore odlučivanju temeljeni na geografskom informacijskom sustavu (GIS) (

Szlafsztein i Sterr, 2007.; Torresan i dr., 2012.; Beluru Jana i Hegde, 2016.)

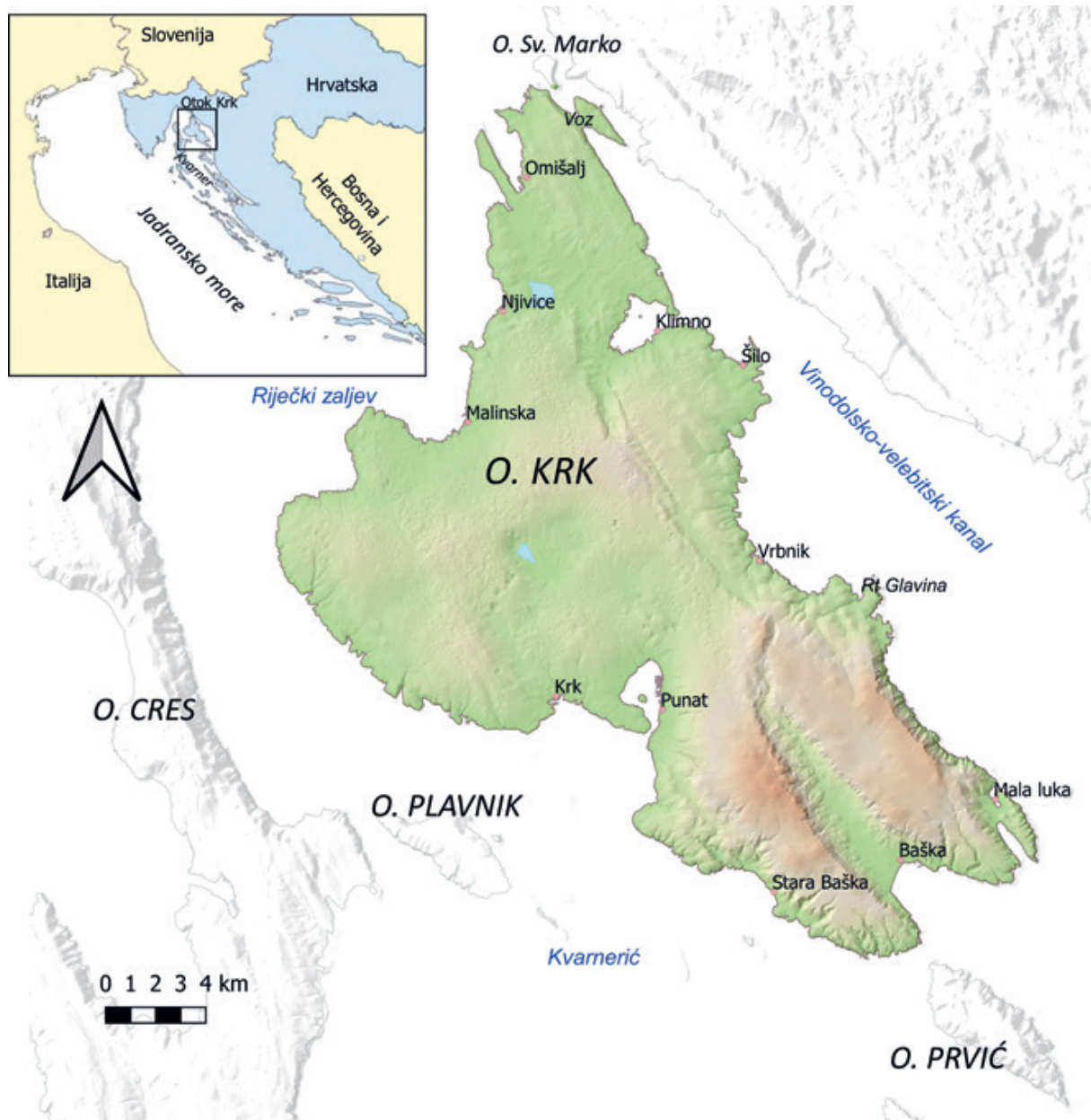
- dinamički računalni modeli (McLeod i dr., 2010.).

Procjena obalne ranjivosti složen je postupak kojim se obično pojednostavljuje i aproksimira veći broj ulaznih parametara, pri čemu neke varijable mogu biti međusobno ovisne. Kod odabira varijabli potrebno je voditi računa da konačni ishodi budu međusobno usporedivi. Najčešći parametri koji se uzimaju u obzir u procjenama ranjivosti su: reljef, obalni nagib, brzine erozije/prirasta obale, širina žala, širina dina, relativna promjena razine mora, značajna visina valova, srednji raspon morskih mijena i vrsta vegetacije iza žala (Pantusa i dr., 2018.). Uz ove prirodne čimbenike, neke metodologije uključuju i socioekonomske ili antropološke utjecaje kvantificirane parametrima kao što su uporaba zemljišta, građevinski zahvati i upravljanje vodama (De Serio i dr., 2018.).

Ocjena ključnih parametara ranjivosti često se temelji na procesu analitičke hijerarhije (Mani Murali i dr., 2013.; Bagdanavičiute i dr., 2015.).

Smatra se da će očekivani porast razine mora potencijalno biti jedna od najskupljih posljedica klimatskih promjena na jadranskoj obali Republike Hrvatske (RH). Procjenjuje se da će zbog porasta razine mora za 50 cm biti trajno poplavljeno više od 100 km² kopna (UNDP, 2009.; RH, 2020.). Sve učestalije i veće štete na jadranskom obalnom pojasu zabilježene posljednjih desetljeća pokazuju da se taj proces već odvija. Primjeri su obalne poplave u području Kvarnera: u Malom Lošinju, Cresu, Opatiji, Rijeci i Crikvenici (Vilibić i Šepić, 2009.; Benac i Knežević, 2011.; Šepić i dr., 2012.).

Dosadašnja istraživanja nepovoljnog učinka klimatskih promjena na obalnom i otočkom području Republike Hrvatske nedovoljna su u odnosu na njegovu



Slika 1: Pregledna karta otoka Krka

važnost, za razliku od ostalih priobalnih zemalja članica Europske unije. U Hrvatskoj je djelomična analiza obalne ranjivosti napravljena za cjelokupnu obalu u mjerilu 1 : 100 000 (EMODnet Geology, 2019.). Detaljnija procjena ugroženosti obalnog pojasa izrađena je samo za teritorij Šibensko-kninske županije (Šibensko-kninska županija, 2015.). Upravo radi nedostatka odgovarajućih podataka, upravna tijela nemaju pouzdane podloge za procjenu hazarda i rizika od klimatskih promjena, pa stoga ni pouzdane podatke za integralno gospodarenje obalnim prostorom (Pikelj i dr., 2018.).

Utjecaj klimatskih promjena i očekivanog rasta razine mora na povećani hazard i rizik na obalama Kvarnera nešto je bolje istražen nego na ostalim dijelovima hrvatskog Jadrana (Benac, 1992., 1996.; Benac i dr., 2007.; Juračić i dr., 2009.). Dosadašnja istraživanja pokazala su da je obalni pojas oko naselja Stara Baška na jugoistočnom dijelu otoka Krka vjerojatno najranjivije područje na cjelokupnoj obali Kvarnera (Benac i dr., 2012.; 2013.; 2014.; Ružić i Benac, 2016.; Ružić i dr., 2011.; 2015.; 2018.; 2019.).

U ovom radu prikazana je metodologija izrade i rezultati analize ranjivosti otoka Krka, koji je uz susjedni otok Cres, najveći jadranski otok s površinom od 405,72 km² i duljinom obale od 249,21 km (PAP/RAC, 2019.). Većina stanovnika živi u većim obalnim naseljima kao što su Krk, Punat, Baška, Šilo, Omišalj, Njivice i Malinska (slika 1).

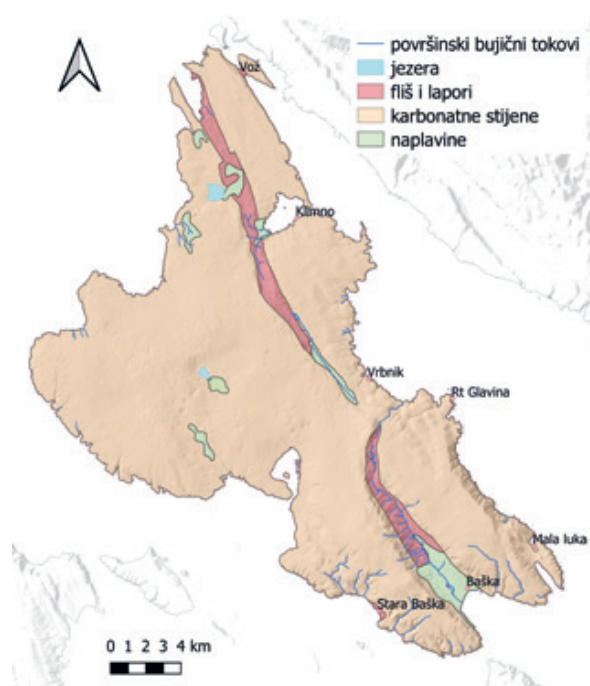
Ranjivost (engl. *vulnerability*) je stupanj gubitaka određenog elementa ili grupe elemenata (npr. materijalna dobra, ljudski životi) kod pojave rizika određene magnitude (Bell, 1999.). U ovom radu korištena je metoda izračuna indeksa ranjivosti obale (engl. *Coastal Vulnerability Index*, CVI). To je jedna od najčešće korištenih metoda za procjenu ranjivosti uzrokovane podizanjem razine mora (ETC CCA, 2011.). Ova metoda temelji se na pažljivom odabiru i ponderiranju niza prirodnih značajki obale. Za potrebe studije „Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora“ (Ružić, 2020.), bilo je potrebno odabrati reprezentativne varijable i napraviti niz prilagodbi kako bi se dobile realne zbirne vrijednosti indeksa ranjivosti obale. Razmatrane varijable su: geološka građa, obalni nagib u odnosu na eroziju, značajna visina vala, opasnost od plavljenja obale i utjecaj žala. Rezultati tih istraživanja korišteni su u ovom radu.

Indeks ranjivosti obale definiran je za segmente obale duljine od 25 m, što je vrlo detaljno s obzirom na relativno veliku duljinu obale otoka Krka od oko 250 km. To je bilo neophodno kako bi se dobile realne vrijednosti indeksa obalne ranjivosti zbog izrazito raznolikih prirodnih značajki obala.

2. PRIRODNE ZNAČAJKE

2.1. Reljef i geološka građa

Otok Krk ima vrlo raznolik reljef. Razlikuju se tri osnovne geomorfološke cjeline: krška zaravan na sjeveroistoku, brdoviti jugoistočni dio s Bašćanskom



Slika 2: Geološka i hidrološka karta (prema HGI, 2009.)

dragom u svom središnjem dijelu i niža valovita krška zaravan na zapadu. Na otoku prevladavaju karbonatne stijene uglavnom krednog razdoblja, a na manjim površinama vidljive su paleogenske karbonatne stijene: vapnenačke paleogenske breče i foraminiferski vapnenci. Sjeveroistočna i zapadna zaravan odvojene su uskom zonom koja je oblikovana u paleogenskim siliciklastičnim stijenama (fliš i mjestimice lapor). Ta zona pruža se smjerom SZ – JI od Omišaljskog zaljeva do Vrbnickog polja i dalje kroz Bašćansku udolinu. U tom području nalazi se nekoliko depresija čija su dna pokrivena naplavinama kvartarne starosti (HGI, 2009.) (slika 2).

Geomorfološke značajke i geološka građa kopna imaju izravan odraz na obale i podmorje oko otoka Krka. Budući da orografske osi otoka imaju smjer pružanja SZ – JI, rtovi i zaljevi, kao i obale, uglavnom se pružaju u istom smjeru.

Prevlaka Voz na krajnjem sjeveroistočnom dijelu otoka Krka oblikovana je u fliškim stijenama (Šušnjar i dr., 1970.). Na padinama je izražena erozija, a na obalama oko te prevlake pružaju se šljunčani i pjeskoviti žali.

Sjeveroistočna obala otoka Krka između prevlake Voz i rta Glavina kod Vrbnika oblikovana je u karbonatnim stijenama, ali je razvedena s brojnim šljunčanim žalima na krajevima uvala gdje se nalaze i ušća periodičnih bujičnih vodotoka. Zaljev Soline kod naselja Klimno vrlo je plitak, dubine do 10 m, a njegov jugozapadni dio pokriven je naplavinama i djelomice zamočvaren.

Sjeveroistočna obala između rta Glavina i uvale Mala luka na jugoistoku, najstrmija je na čitavom otoku. Obala je oblikovana u karbonatnim stijenama, a strmci su mjestimice pokriveni kamenim lavinama i aktivnim siparima (slika 3a).

Široka dolina Bašćanska draga kod naselja Baška oblikovana je u siliciklastičnim stijenama, a strme okolne

padine u karbonatnim stijenama (Mamužić i dr., 1969.). Niski obalni dio pokrivaju šljunčane naplavine u kojima je oblikovano žalo duljine oko 1200 m. Tu se nalazi i ušće periodičnog vodotoka Vela baščanska ričina.

Jugozapadna obala sve do zaljeva kod naselja Punat oblikovana je u karbonatnim stijenama (Mamužić i dr., 1969.). Strma je i nepristupačna. Unutar ovog dijela obale nalazi se nekoliko manjih uvala na čijem dnu su vidljiva šljunčana žala na kojima su ušća periodičnih bujičnih vodotoka (slika 3b). Obala uz naselje Stara Baška oblikovana je u flišnim stijenama i kvartarnim brečama. Uz obalu se pružaju šljunčani žali u isprekidanom nizu duljine od oko 1 km. Česti su odroni na obali, a nekoliko klizišta ugrožava građevine u naselju (Ružić i dr., 2021.) (slika 3c).

Obale oko krške zaravni na zapadu otoka Krka blago su položene i pristupačne. U padine su usječene brojne suhe jaruge na čijim krajevima se nalaze šljunčani žali (slika 3d). Obale otoka okrenute Riječkom zaljevu blagog su nagiba i također su oblikovane u karbonatnim stijenama (Šikić i dr., 1969.). Omišaljski zaljev duboko je uvučen u kopno. Oblikovan je u karbonatnim i siliciklastičnim stijenama (Šušnjar i dr., 1970.).

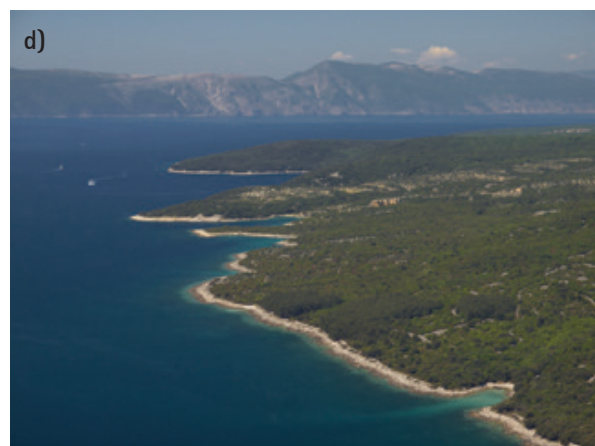
U plićoj, priobalnoj zoni oblikovanoj u karbonatnim stijenama pomorske padine su kamenite. To je litoralna i sublitoralna zona pod utjecajem erozijskog djelovanja valova. Na stjenovitoj podlozi mjestimice se nalaze

sedimenti nastali marinskom erozijom obale ili pak doneseni s kopna vodom ili gravitacijom. Šljunčana dna karakteristična su za podmorske nastavke brojnih bujičnih korita, a ispod vrlo strmih ili okomitih litica česti su podmorski sipari. Uz obale oblikovane u siliciklastičnim stijenama morsko dno je najčešće vrlo blago nagnuto i pokriveno pijeskom, a na obalama se nalaze žali.

2.2. Oceanografske značajke

U području Kvarnera prevladavaju slabi i umjereni vjetrovi s čestim razdobljima tišine, dok su olujni vjetrovi brzine veće od 30 m/s rijetki i kratkotrajni. U relativno zatvorenim akvatorijima Kvarnera, privjetrišta su kraća u odnosu na otvoreni dio Jadranskog mora i stoga valovi imaju manje visine pri istoj brzini vjetra. Najveću učestalost i najveću brzinu ima bura koja puše iz sjeveroistočnog smjera, ali vjetrovi koji pušu iz južnog kvadranta, poglavito jugo, generiraju najviše valove (Penzar i dr., 2001.).

Morske mijene u Jadranskom moru nastaju kao posljedica koosciliranja s Jonskim morem. Karakteristično je protusatno kruženje plimnog vala s periodom od 12,42 h. Prosječne plimne amplitude rastu od jugoistoka prema sjeverozapadu Jadrana (Dubrovnik 22 cm, Zadar 25 cm, Bakar 30 cm i Rovinj 47 cm). Tako pravilan hod može biti poremećen zbog meteoroloških pojava. U razdoblju izrazito visokog tlaka zraka razina mora može se sniziti



Slika 3: a) vrlo strma SI obala; b) JZ obala Krka; c) obala uz Staru Bašku; d) zaravan na zapadnoj obali otoka Krka.

za 40 cm, a u vrijeme niskog tlaka popraćenog jugom podići i do 70 cm iznad srednje razine (Penzar i dr., 2001.).

Visoka voda ili *acqua alta* pojava je ekstremno visoke plime u Jadranu koja svoj maksimum ima u Venecijanskoj laguni, gdje je dobila naziv. Zabilježena je na više lokacija sjevernog Jadrana. Događa se najčešće tijekom jeseni i zime kada su uobičajene plime pojačane prolaskom ciklone, vjetrovima iz jugoistočnog kvadranta, te slobodnim oscilacijama Jadrana, odnosno pojavama seša. Rekordno visoke razine mora zabilježene su u posljednja dva desetljeća i na području Kvarnera na mareografu u Bakru: 1. 12. 2008. + 117 cm, 1. 11. 2012. + 122 cm i 29. 10. 2018. + 127 cm iznad srednje razine mora.

3. METODOLOGIJA

Ranjivost obalnog područja podrazumijeva potencijalni stupanj promjena koji neki dio obale može pretrpjeti pod djelovanjem različitih prirodnih utjecaja definiranih kroz određene parametre. Obalna ranjivost najčešće se izražava jednodimenzionalnim indeksom obalne ranjivosti (CVI) (Gornitz, 1991.). Metoda za izračun tog indeksa korištena je u ovom radu za analizu ranjivosti obale otoka Krka.

U analizi su primarno korištene Hrvatska osnovna karta mjerila 1 : 5 000 i topografska karta 1 : 25 000, kao i digitalne orto-foto karte različitih generacija (GEOPORTAL, 2021.). Za izračun hipsometrijskih značajki korišten je digitalni model reljefa (engl. *Digital Elevation Model*, DEM) rezolucije 25 x 25 m.

Sociološki parametri i antropogeni utjecaji, uključujući korištenje zemljišta, na području otoka Krka nisu analizirani. Ovi podaci ili ne postoje ili njihov utjecaj na obalnu ranjivost nije moguće jednoznačno definirati. Iako antropogeni utjecaj može smanjiti ranjivost obala izgradnjom planski projektiranih obalnih građevina, duž hrvatske obale zabilježen je i veći broj nekvalitetno obavljenih zahvata kao što su nestručna izgradnja obalnih zidova, nasumična nasipavanja žala, nezakonita ili neplanska gradnja i sl., koji posljedično povećavaju

obalnu ranjivost (Ružić i dr., 2019., 2021.). Izostavljanje ovih varijabli u analizama ranjivosti obale omogućilo je prikaz izvornog stanja obalnog područja, što je bitno za primjenu u prostornim planovima.

U konačnici, ukupni indeks obalne ranjivosti (CVI) otoka Krka određen je na temelju pet varijabli (podindeksa) ranjivosti. To su:

- a) geološka građa (engl. *geological fabric*)
- b) obalni nagib (engl. *coastal slope*)
- c) značajna visina vala (engl. *significant wave height*)
- d) plavljenje (engl. *inundation*)
- e) žalo (engl. *beach*).

Osim što je dio uobičajenih varijabli izostavljen zbog nepostojanja pouzdanih podataka, dio je prilagođen prirodnim obilježjima područja istraživanja, kao i dostupnim podacima.

Razvedenost i velika nehomogenost obale zahtijevala je točkastu analizu za određivanje indeksa ranjivosti obale (CVI). Analize su se stoga provele u svakoj točki duž definirane obalne linije (PAP/RAC, 2019.) na razmacima od 25 m. Indeks ranjivosti obale određen je prema kategorijama prikazanima u tablici 1. Prikazana klasifikacija temeljena je na uobičajeno korištenim prethodno opisanim metodama koje su prilagođene za lokalne uvjete.

Geološka građa (a) definirana je prema dostupnim geološkim kartama (Šikić i dr., 1969.; Mamučić i dr., 1969.; Šušnjar i dr., 1970.; HGI, 2009.) i djelomice dopunjena podacima iz stručne dokumentacije (slika 2). Na temelju geološke građe obala je podijeljena u četiri kategorije ranjivosti s obzirom na stupanj erodibilnosti stijena i tla, koja je u izravnoj vezi s ranjivosti. To su: karbonatne stijene, fliš, naslage šljunka i oblutaka te les i crvenica (tablica 1). Niti jedna vrsta stijena nije rangirana kao vrijednost 2.

Obalni nagib (b) je u funkciji stabilnosti kosina, ali i izloženosti plavljenju. U oba slučaja analiziraju se kao posebne varijable. Strmiji dijelovi obale obično imaju i veću vjerojatnost opasnosti od pojave odrona i klizanja. Kritične vrijednosti nagiba određene su posebno za karbonatne stijene i fliš (tablica 1). Budući

Ranjivost (CVI)	Podindeksi ranjivosti obale									Zbirni indeks ranjivosti obale	
	a - geološka građa	b - obalni nagib				c - značajna valna visina, H _s		d - plavljenje		CVI _z	
		Karbonatne stijene		Siliciklastične stijene (fliš i les)		od [m]	do [m]	od [m]	do [m]		
		od [°]	do [°]	od [°]	do [°]	od [m]	do [m]	od [m]	do [m]	od	do
Veoma niska (1)	Karbonatne stijene	0,0	11,99			0,0	0,99	5,0	>	0,0	1,79
Niska (2)		12,0	19,99	0,0	4,99	1,0	1,49	3,5	4,99	1,8	2,19
Umjerena (3)	Fliš	20,0	31,99	5,0	11,99	1,5	1,99	2,3	3,49	2,2	2,61
Visoka (4)	Naplavine: šljunak, obluci	32,0	69,99	12,0	19,99	2,0	2,49	1,3	2,29	2,6	3,07
Veoma visoka (5)	Naplavine: pijesak, mulj; les; crvenica	70,0	90,00	20,0	90,00	2,5	>	0,0	1,29	3,1	4,20

Tablica 1: Podindeksi obalne ranjivosti za analizirane varijable

da su naplavine općenito vrlo blagog nagiba i na njima nema izraženijih pojava nestabilnosti, one su analizirane samo s obzirom na izloženost plavljenju. Obalni nagib definiran je iz DEM-a rezolucije 25 × 25 m, što je često bilo nedovoljno točno za procjenu stabilnosti kosina, tako da su u rezultatima moguća određena odstupanja od stvarnog stanja. Prikazana klasifikacija temeljila se na dosadašnjim klasifikacijama (Bognar, 1992.) kao i na spoznajama autora ovog rada.

Značajna visina vala, $H_s(c)$ statistički je parametar koji označava srednju vrijednost trećine najvećih valova u određenom valnom zapisu ili spektru valova. To je standardna vrijednost koja se koristi za dimenzioniranje obalnih građevina, a dobiva se na osnovi mjerenja valova ili valne prognoze. Mjerenja valova oko obala otoka Krka bila su rijetka i obavljana povremeno samo na nekim lokacijama (Lončar i dr., 2014.). Zato je značajna visina vala u ovoj analizi određena iz numeričkih simulacija valova na temelju mjerodavnog polja vjetra (tablica 2).

Tablica 2 prikazuje mjerodavne brzine vjetra na osnovi kojih su provedene numeričke simulacije valovanja i definicija varijable ranjivosti. U ovom radu korišteni su rezultati mjerenja jačine polja vjetra provedeni na najbližoj poznatoj lokaciji, a to je područje Crikvenice (DHMZ, 2006.).

Značajne valne visine mjerodavne za procjenu vrijednosti CVI-ja određene su iz numeričkih simulacija provedenih u modelu SWAN. To je model treće generacije, temeljen na Eulerovoj ravnotežnoj jednadžbi spektralnog valnog djelovanja, a koji se koristi za simulacije u obalnim područjima (Booij i dr., 1999.) (slika 4). Za parametar rasipanja valne energije (*white capping*) korištena je metodologija temeljena na impulsno-tlačnom modelu (Hasselmann, 1974.; Komen i dr., 1984.), a usvojena je standardna vrijednost parametra disipacije ($c_{ds} = 4,50$).

Numeričke simulacije za potrebe ovoga rada provedene su za homogeno polje vjetra 50-godišnjeg povratnog perioda, na numeričkoj domeni dimenzija 43 × 46 km prostornog koraka 50 × 50 m. Rubni uvjeti definirani su na osnovi modela šireg akvatorija domene 61 × 108 km i prostornog koraka 250 × 250 m (slika 4a). Numerički model SWAN pri simuliranju u obzir uzima i valne deformacije u plitkom području, tako da su visine valova na definiranoj obalnoj liniji jako male. Kako bi se ipak dobila realna vrijednost ove varijable, valne visine su određene na udaljenosti 25 m od obalne linije. Izvršene su simulacije za vjetrove iz osam različitih smjerova, a kao mjerodavna vrijednost definirana je ona najviša u svakoj analiziranoj točki (tablica 1).

Plavljenje obale (d) zbog periodičnog ili dugotrajnog porasta razine mora zavisi od lokalnog obalnog reljefa, zbog čega su niske obale izloženije plavljenju od onih

strmog nagiba. Na temelju opažanja autora ovog rada ustanovljeno je da na području Kvarnera, pa tako i na obalama otoka Krka, obalna infrastruktura uglavnom biva poplavljena pri kritičnoj visokoj razini mora od + 1,20 m n. m. Kategorije ranjivosti određene su prema visini terena udaljenog 25 m od obalne linije (tablica 1), iz DEM-a 25 × 25 m. Za plavljenje obale izrađene su analize u slučaju podizanja mora za 60 cm iznad današnje srednje razine i ekstremne plime od 120 cm, što odgovara realnom i ekstremnom scenariju rasta morske razine.

Žala (e) su prirodan sustav otporan na djelovanje valova. Velika tijela žala adsorbiraju energiju loma valova i smanjuju nepovoljne obalne procese. Na otoku Krku većinom su duljine do 50 m i širine manje od 10 m pa sva minijturna žala nije bilo moguće dovoljno točno locirati na temelju raspoloživog DEM-a i dostupnih topografskih podloga. Iz istog razloga je ova varijabla morala biti prilagođena u odnosu na izvorne metode proračuna u kojima se ranjivost definira na osnovi širine žala (ETC CCA, 2011.). Tako su za potrebe analiza provedenih u ovom radu na temelju definirane obalne linije (PAP/RAC, 2019.) samo određene površine na kojima se nalaze žala, kao i njihova vrsta. Zahvaljujući opisanom povoljnom utjecaju na sveukupnu ranjivost obale, ova se varijabla definirala na nešto drukčiji način: pješćana žala dobila su vrijednost od -1, a šljunčana -2.

Prema opisanim podindeksima (varijablama) obalne ranjivosti, prethodno je testirano više formula za određivanje ukupnog indeksa ranjivosti obale (Ružić, 2020.). Kako bi se naglasilo smanjenje ranjivosti na onim mjestima gdje su formirana žala, u konačnici je korištena sljedeća formula:

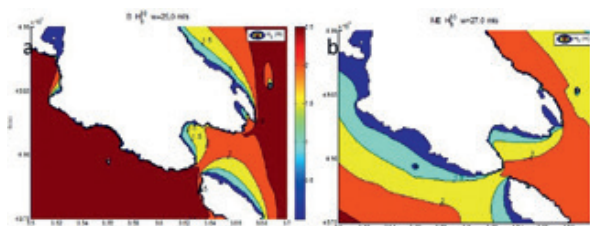
$$CVI_z = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 - e^2}{5}}$$

- a – geološka građa
- b – nagib obale
- c – značajna visina vala
- d – plavljenje
- e – žalo

Intervali ranjivosti za zbirni indeks obalne ranjivosti (CVI_z) prikazani su u tablici 1, a određeni su za područje cijele Primorsko-goranske županije (PGŽ) prilagodbom standardne Jenks klasifikacije kako bi dobiveni rezultati bili u skladu s prirodnim značajkama obala na području Kvarnera, pa tako i otoka Krka. Ova prilagodba temeljila se na već spomenutim dosadašnjim istraživanjima

Tablica 2: Jačine vjetrova korištene za numeričke simulacije (DHMZ, 2006.)

Smjer	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Brzina, w [m/s]	18	27,4	20	24,3	25	20	15	20



Slika 4: Definicija varijable značajna visina vala (H_s): domene numeričkog modela (a) i rezultati numeričkih simulacija H_s^{50} za smjer NE (b) i SE (c).

ranjivosti na Kvarneru, kao i terenskim ispitivanjima provedenima za potrebe navedene studije na razini PGŽ-a (Ružić, 2020.). Rezultate je moguće provjeriti i usporedbom orto-foto snimaka dostupnih na Geoportalu (GEOPORTAL, 2021.).

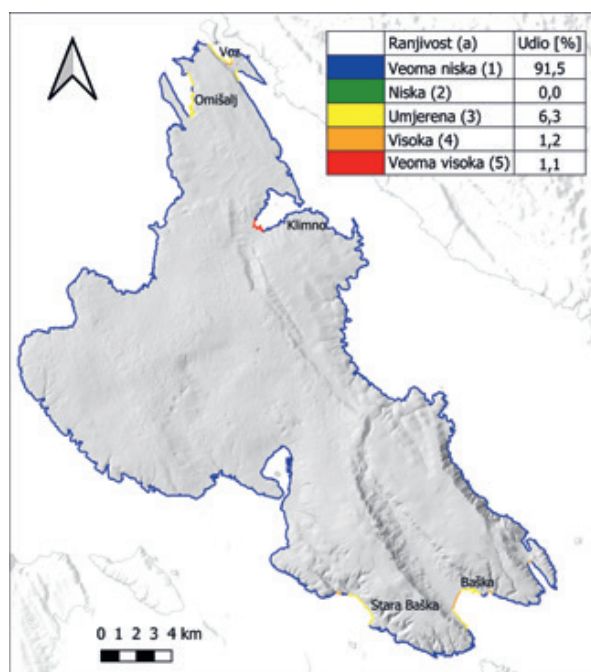
4. REZULTATI - ANALIZA RANJIVOSTI OBALNOG POJASA KRKA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati analize ranjivosti obalnog pojasa otoka Krka prema pojedinim varijablama, kao i ranjivost prema zbirnom indeksu ranjivosti obale (CVI₂).

4.1. Geološka građa (a)

Na temelju geološke karte definirani su podindeksi obalne ranjivosti u odnosu na parametar geološke građe. Kao najranjivija područja definirane su naplavine u pijesku i mulju, te naslage lesa i crvenice (slika 5).

Zbog povoljne geološke građe najveći dio obala otoka Krka ima veoma nisku ranjivost – prosječna vrijednost podindeksa obalne ranjivosti za varijablu geološke građe je 1,20. Najranjivije obale nalaze se oko naselja Klimno, Baška, Stara Baška, a ugrožena je i prevlaka Voz i dijelovi Omišaljskog zaljeva (slika 5).



Slika 5: Karta obalne ranjivosti za varijablu geološke građe

4.2. Obalni nagib (b)

Obalni nagib definiran je u funkciji opasnosti od odrona i klizanja (slika 6).

Prosječna vrijednost podindeksa ranjivosti obale prema analiziranoj varijabli nagiba obale otoka Krka je 1,95, što je niska vrijednost. Najveću ranjivost imaju područja oko naselja Baška i Stara Baška kao i obale oko prevlake Voz (slika 6). Visok podindeks ranjivosti dobiven je na sjeveroistočnoj obali otoka Krka između rta Glavina i Male luke. Kosine su vrlo strme, a vidljivi su tragovi odrona velikih dimenzija, kao i aktivni sipari (slika 3a).

4.3. Značajna visina vala – H_s (c)

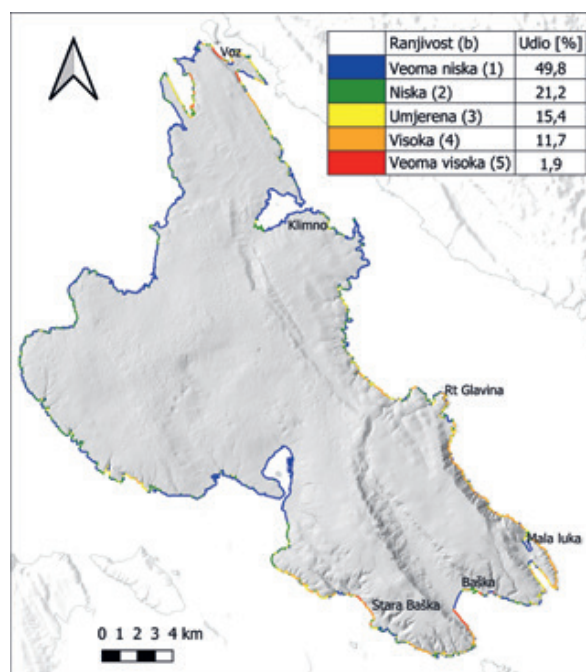
Na slici 7 prikazana je obalna ranjivost Krka u odnosu na značajnu visinu vala, koja je definirana na temelju numeričkih simulacija valovanja, kako je objašnjeno u poglavlju 3. Metodologija.

Prosječna vrijednost podindeksa za djelovanja valova je 1,53 što je veoma niska ranjivost. Izravnom djelovanju visokih valova izloženo je 3,1 % obala otoka, pa su visoke i veoma visoke ranjivosti. Na tim lokacijama valovi mogu ubrzati procese erozije obale.

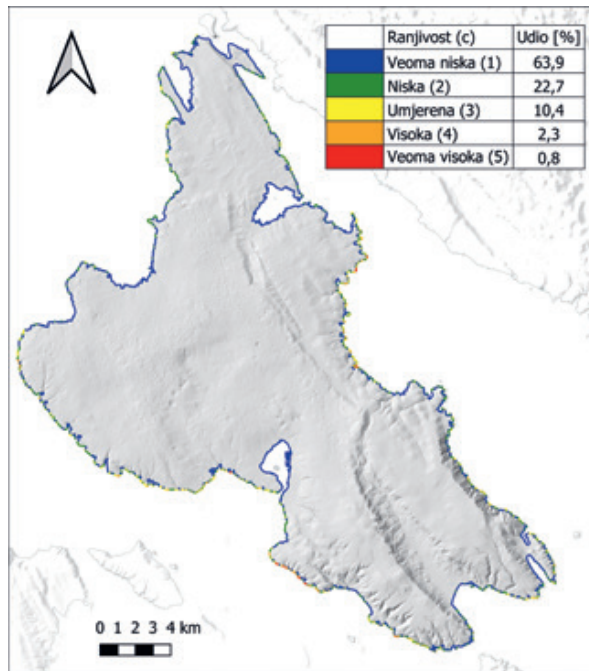
4.4. Plavljenje (d)

Na slici 8 prikazan je podindeks obalne ranjivosti u odnosu na varijablu opasnosti od plavljenja obalnog područja.

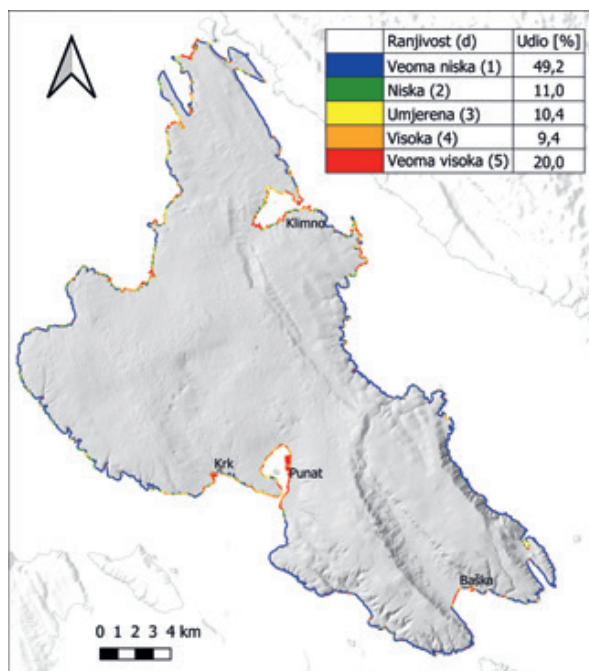
Većina obale otoka Krka (60,2 %) ima nisku ili veoma nisku ranjivost u odnosu na izloženost plavljenju. Međutim, gotovo 30 % obale je veoma visoke i visoke ranjivosti. Opasnosti od plavljenja je izložena većina priobalnih naselja, što je posebno zabrinjavajuće. To se podudara s podacima da je većina obalnih naselja



Slika 6: Karta obalne ranjivosti za varijablu obalnog nagiba i rizika od klizanja i odrona



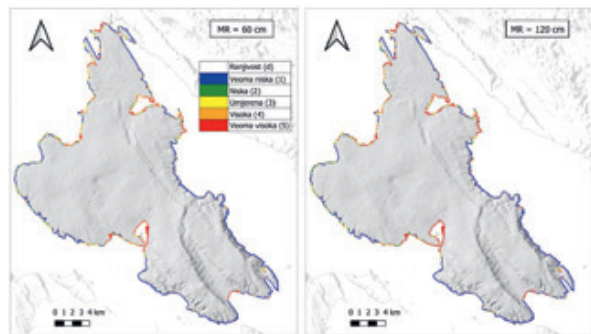
Slika 7: Karta obalne ranjivosti za varijablu značajne visine vala



Slika 8: Karta obalne ranjivosti za varijablu plavljenja obale

na otoku Krku bila djelomično poplavljena tijekom ekstremno visokih razina mora posljednjih desetljeća.

Na slici 9 prikazane su karte ranjivosti za varijablu obalnog plavljenja u slučaju dizanja razine mora za 60 cm i 120 cm. Radi preglednosti, na lijevoj slici su prikazani podindeksi za slučaj izdizanja mora za 60 cm samo na onim mjestima gdje je njegova vrijednost drukčija (veća) od vrijednosti pri sadašnjoj srednjoj morskoj razini. Isto tako su na desnoj slici izdvojena područja gdje se obalna ranjivost za slučaj ekstremnih plima (120 cm) povećava u odnosu na ranjivost za očekivani rast razine mora od 60 cm.



Slika 9: Karta obalne ranjivosti za varijablu plavljenja obale zbog podizanja razine mora za 60 i 120 cm

U tablici 3 prikazana je promjena udjela pojedinog podindeksa obalne ranjivosti otoka Krka u odnosu na plavljenje obalnog područja u slučaju očekivanog podizanja razine mora (0,60 m) i ekstremnih plima (1,20 m).

Tablica 3: Zastupljenost podindeksa ranjivosti obale za varijablu plavljenja obale u slučaju podizanja srednje razine mora

		povećanje MR		
		+0,00m	+0,60m	+1,20m
	Ranjivost	(%)	(%)	(%)
1	Veoma niska	49,2	44,9	40,7
2	Niska	11,0	10,7	10,5
3	Umjerena	10,4	10,2	9,0
4	Visoka	9,4	8,6	8,9
5	Veoma visoka	20,0	25,6	30,9

Očekivanim podizanjem razine mora doći će do značajnog povećanja ranjivosti obala otoka. U slučaju podizanja razine mora za 0,60 m očekuje se smanjenje udjela deklarirane niske i veoma niske ranjivosti obale od 4,6 %, dok će se udio obale veoma visoke ranjivosti povećati za čak 5,6 %. Tako će i prosječna vrijednost podindeksa ranjivosti sa sadašnje 2,40 narasti na 2,59. Tijekom ekstremnih razina mora za vrijeme olujnih uspora te brojke su gotovo jednako nepovoljne. S dodatnim rastom prosječnog podindeksa na vrijednost od 2,79 udio obale niske i veoma niske ranjivosti smanjit će se za dodatnih 4,3 %, dok će veoma ranjivo postati još 5,3 % obalne linije otoka.

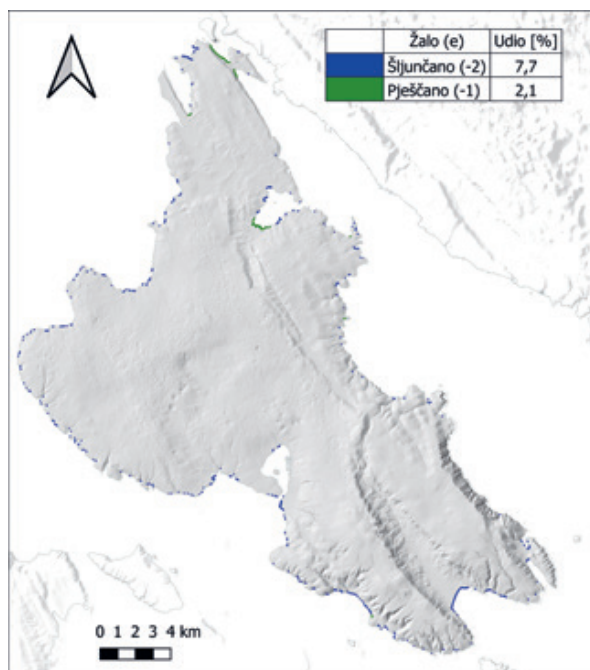
4.5. Žala

Lokacije na kojima su formirana žala prikazane su na slici 10.

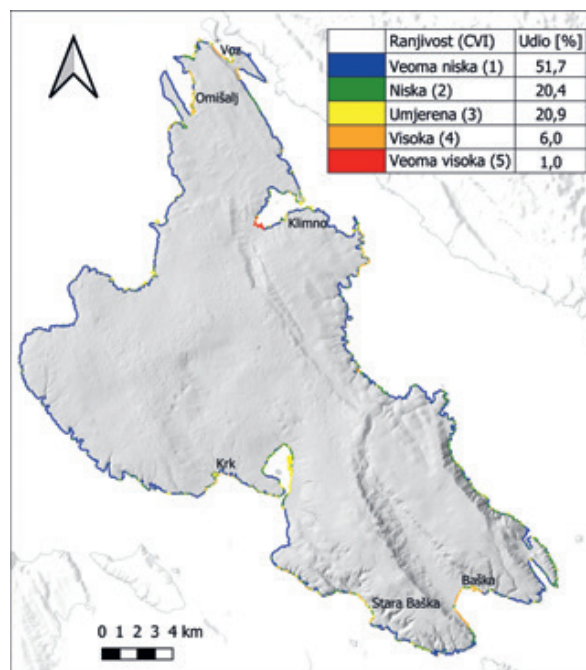
Većim dijelom žala na otoku su šljunčana, dok su na svega 2,1 % obale otoka (prevlaka Voz i zaljev Soline kod naselja Klimno) formirana pjeskovita žala. Obale u Staroj Baškoj i Baškoj velikim su dijelom pod površinama šljunčanih žala, što će smanjiti relativno visoku ranjivost ovih dvaju naselja.

4.6. Indeks ranjivosti obale (CVI₂)

Na temelju obavljenih analiza svih pet varijabli i definirane formule određen je zbirni indeks obalne



Slika 10: Lokacije žala na obalnoj liniji otoka Krka



Slika 11: Karta obalne ranjivosti prema zbirnom indeksu ranjivosti (CVI)

ranjivosti (CVI₂) za pojedine dijelove obale otoka Krka (slika 11).

Pretežiti dio obale otoka Krka (72,07 %) niske je i veoma niske ranjivosti, dok je 7 % visoke i veoma visoke ranjivosti.

5. DISKUSIJA

Prikazani rezultati obalne ranjivosti otoka Krka pokazali su značajne varijacije ranjivosti u odnosu na svaku od pet varijabli koje su korištene u analizama (slike 5 – 8, slika 11). Iako je prosječni indeks obalne ranjivosti u konačnici nizak, ne smiju se zanemariti značajni negativni utjecaji pojedinih varijabli.

Najveći dio obala oblikovan je u karbonatnim stijenama koje su relativno otporne na marinsku eroziju, dok siliciklastične stijene pokrivene mlađim naslagama sa značajkama tla imaju manju otpornost na djelovanje valova (Juračić i dr., 2009.). Na veoma ranjivim naplavinama izgrađeni su dijelovi naselja, hoteli i kampovi. Negativni učinak plima i valova na ovim područjima ipak je djelomično umanjen jer se na tim lokacijama nalaze žala, prirodna ili ona nastala nasipavanjem, pa štite obalu rasipajući valnu energiju na svojim tijelima. S obzirom na zaštitnu ulogu žala, potrebno je provesti odgovarajuće mjere za njihovu zaštitu:

- spriječiti nelegalno iskopavanje sedimenta iz tijela žala, a izgradnju na žalima i u zoni neposredno iza njih moguće je obavljati samo u svrhu njihove zaštite
- na žalima kod kojih je zaustavljen prirodan sustav dohrane potrebno je obavljati nasipavanje, ali samo uporabom odgovarajućeg materijala.

Blagi nagibi obala izgrađenih od siliciklastičnih stijena i naplavina mogu predstavljati problem, jer će

podizanjem razine mora i povećanjem valne aktivnosti biti ubrzana erozija tih dijelova obale.

Strme obale su s druge strane ranjive s obzirom na mogućnost odrona i klizanja. Iako su odroni prirodan proces kojim se mnoga žala dohranjuju, oni mogu biti potencijalno vrlo opasni za kupaće koji tijekom ljetnih mjeseci borave na neuređenim plažama. Tragičan primjer zabilježen je u ljeto 2009. godine kod Stare Baške, kada je odron usmrtio jednu osobu, a druga je bila teže ranjena (Jutarnji list, 2009.). Ubrzana erozija i odroni te povlačenje klifova mogu prouzročiti velike štete na građevinama izgrađenim na njihovim rubovima. Neke građevine u Vrbniku izgrađene su uz sam rub klifa, koji je sada stabilan. Međutim, u budućnosti se na nekim zonama klifa mogu dogoditi i značajniji odroni (slika 12).

U ovom radu analizirana je obalna ranjivost s aspekta geotehničke stabilnosti obalnih nagiba, što je veoma važan, ali često zapostavljen parametar (Boumboulis i dr., 2021.).

Zbog očekivanog ubrzanog rasta razine mora neizbježno će doći do povremenog plavljenja niskih dijelova naselja uz obalu (Richards i Nicholls, 2009.; Toressan i dr., 2012.). Zbog moguće značajne materijalne štete, plavljenje se pokazalo kritičnim parametrom obalne ranjivosti. Tijekom visokih razina mora određeni dijelovi lučkih bazena postaju nefunkcionalni. Rekordno visoke razine mora zabilježene tijekom posljednja dva desetljeća prouzročile su plavljenje obale i smanjile učinkovitost oborinske i fekalne odvodnje u naseljima, što je bila očekivana pojava. Međutim, primijećena su i brojna oštećenja na obalnim građevinama.

Porastom razine mora i većom valnom aktivnosti promijenit će se projektni parametri na koje su dimenzionirane obalne građevine, pa bi njihova stabilnost i funkcionalnost također mogle biti ugrožene. Zbog toga će monitoring obalne infrastrukture morati biti redovit i



Slika 12: Klifovi oko srednjovjekovne jezgre Vrbanja

vrlo detaljan. Neodgovarajuće izgrađena i loše održavana infrastruktura može znatno povećati ranjivost obala na tim lokacijama. Građevine izgrađene na obalnom rubu bit će izrazito ugrožene zbog očekivanog rasta razine mora. Njihova zaštita bit će vrlo skupa, a u nekim slučajevima i gotovo nemoguća (slika 13a).

Nakon rekordno visokih razina mora praćenih visokim valovima iz južnog kvadranta, posebice su bila izražena razaranja na umjetno stvorenim žalima koja očigledno nisu hidrodinamički stabilna. Te pojave uočene su na obalama otoka Krka, ali i na čitavom Kvarneru (slika 13b).

Visoke razine mora stvarat će uspore na ušćima vodotoka s bujičnim obilježjima. Stoga će tijekom intenzivnih oborina i velikih protoka biti povećan hazard od plavljenja u niskim obalnim zonama oko ušća gdje su česta naselja i turistička područja. Sve češća pojava ekstremno visokih razina mora utjecat će i na promjenu dinamike podzemnih voda u krškim vodonosnicima koji prevladavaju na otoku Krku.

Ovim analizama potvrđena je visoka ranjivost obalnih naselja na otoku Krku, prvenstveno zbog hazarda od plavljenja (slike 8 i 9). Vidljivo je povećanje prosječne vrijednosti podindeksa obalne ranjivosti za varijablu obalnog plavljenja kod očekivanog podizanja razine mora. Posljedica porasta razine mora za 60 cm bit će povećanje sadašnjeg prosječnog podindeksa ranjivosti otoka Krka od 2,40 za 0,19, a kod porasta razine mora za 120 cm za dodatnih 0,19 (slika 9).

Metodologijom primijenjenom u ovom radu, kao i u prethodnim istraživanjima (Ružić, 2020.), uspješno su detektirane lokacije s najvećim indeksom ranjivosti obale. Područje oko naselja Stara Baška ima umjerenu do visoku ranjivost što je sukladno prethodno provedenim istraživanjima (Benac i dr., 2014.; Ružić i dr., 2014., 2015., 2018., 2019.). Svim ovim analizama, kao i onim ranijim izvršenim na topografskim kartama mjerila 1 : 5000 za dijelove obala otoka Raba (Ružić i Benac, 2016.), pokazano je da će biti potrebno imati dovoljno precizne topografske podloge kako bi se mogli dobiti vjerodostojni rezultati. Zbog toga će u budućim istraživanjima, a prije detaljnijih analiza ranjivosti obale, na odabranim lokacijama biti potrebno obaviti odgovarajuća prethodna istraživanja kako bi se upotpunile baze podataka o reljefu kopna i podmorja, geološkoj građi, oceanografskim značajkama, položaju i tipu obalnih građevina, značajkama žala i sl. Primjena integralnih istraživanja može značajno poboljšati rezultate istraživanja, a time i zaštitu obalnog pojasa (Bonaldo i dr., 2019.).

U ovom radu određeni su ugroženi dijelovi obale. Analize obalne infrastrukture i ostale građevine nisu uključeni zbog veličine/mjerila istraživanja. Istraživanja naseljenih dijelova obale potrebno je provesti posebno na kartama dovoljno detaljnog mjerila (ETC CCA, 2011.). Na temelju toga moći će se provjeriti učinkovitost obalne infrastrukture u odnosu na postojeće stanje te predviđeni rast razine mora.



Slika 13: a) oštećena Vela riva na obali grada Krka; b) razoreno žalo u uvali Plav kod grada Krka.

6. ZAKLJUČAK

U ovom je radu analizirana ranjivost obala otoka Krka. Procjena ranjivosti obale podrazumijevala je provođenje analiza te izračun podindeksa na temelju pet odabranih varijabli i zbirnog indeksa obalne ranjivosti duž obalne linije koja je zbog duljine, razvedenosti i izrazito heterogenih karakteristika definirana točkama međusobno udaljenima 25 m. Parametri za koje su provedene analize su geološka građa, obalni nagib s obzirom na eroziju (klizanje i odrone), značajna visina vala, izloženost plavljenju, te pojava i značajke žala.

Prikazani rezultati analiza obalne ranjivosti otoka Krka pokazali su veliku raznolikost prirodnih značajki što je utjecalo i na varijacije vrijednosti indeksa ranjivosti obale otoka Krka. Iako je prosječni ukupni indeks ranjivosti u cijelosti nizak (1,84), ne smije se zanemariti visoka ranjivost nekih dijelova obale, prvenstveno zbog izloženosti plavljenju. Sadašnji udio veoma ranjive obale od 20 % porastom razine mora za 60 cm povećat će se na 25,6 % i čak na 30,9 % kod porasta razine mora za 120 cm. S obzirom na izloženost plavljenju, podindeks obalne ranjivosti tako će porasti od sadašnje vrijednosti 2,40 za 0,19 kod porasta razine mora za 0,60 m i za još 0,19 pri rastu od 1,20 m.

Ova istraživanja i rezultati analiza ukazali su na lokacije koje će biti najugroženije uslijed očekivanog rasta razine mora. Posebno je zabrinjavajuća činjenica da su to uglavnom naseljena područja. Međutim, pokazalo se i da nema dovoljno točnih podataka o reljefu kopna i podmorja, geološkoj građi, oceanografskim značajkama i sl. kako bi se za određenu lokaciju mogao pouzdano

odrediti stupanj ranjivosti obala i predložiti mjere umanjena rizika. To je vrlo značajno jer je posljednjih desetljeća izražena vrlo intenzivna i često neplanska izgradnja na obalnom pojasu.

Opisana metodologija određivanja indeksa ranjivosti obale, moći će se primijeniti na cjelokupnoj jadranskoj obali Hrvatske i na taj način pomoći upravnim tijelima u izradi odgovarajućih planova upravljanja prostorom koji će sadržavati i mjere umanjena rizika od klimatskih promjena i rasta razine mora. Kako bi se što više umanjile nepovoljne posljedice očekivanog podizanja razina mora, potrebno je već sada planirati određene mjere za njihovo umanjene. Prvenstveno je potrebno prostorno-planskim mjerama ograničiti ili zabraniti izgradnju na potencijalno ugroženim područjima, te osigurati prostor za izgradnju infrastrukture za zaštitu obale.

ZAHVALA

Javna ustanova Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije financirala je istraživanja kroz projekt „Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije (PGŽ) zbog podizanja razine mora.“

Ovaj rad je sufinanciran iz Programa „Znanstvena suradnja“ Hrvatske zaklade za znanost koji je financirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda u sklopu Operativnog programa Učinkoviti ljudski potencijali 2014. – 2020. (PZS-2019-02-3081) kao i Sveučilišta u Rijeci (Uniri-tehnic-18-97 1232).

Autori se zahvaljuju recenzentima na veoma korisnim sugestijama i Geofizičkom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu na ustupljenim podacima s mareografske postaje u Bakru. ■

LITERATURA

- Bagdavičiute, I., Kelpšaitė, L., Soomere, T. (2015.): Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas. *Ocean and Coastal Management*, 104, 124–135. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.011
- Bell, F. G. (1999.): *Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation*. E & FN Spon, London; New York.
- Beluru Jana A., Hegde A.V. (2016.): GIS Based Approach for Vulnerability Assessment of the Karnataka Coast, India. *Advances in Civil Engineering*, 2016 (64). doi: 10.1155/2016/5642523
- Benac, Č. (1992.): Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva. *Hrvatski geografski glasnik*, 54, 1–18.
- Benac, Č. (1996.): Rast morske razine i promjene na obalama Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 34, 345–359.
- Benac, Č., Dugonjić Jovančević, S., Ružić, I., Vivoda, M., Peranić, J. (2014.): Marine erosion and slope movements: SE coast of the Krk island. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 3: Targeted Landslides*, 563–567. doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0_86
- Benac, Č., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K., Benac, T., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K. (2013.): Fluviokarst and classical karst: Examples from the Dinarics (Krk Island, Northern Adriatic, Croatia). *Geomorphology*, 184, 64–173. doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.016
- Benac, Č., Knežević, R. (2011.): Utjecaj geološkog hazarda na razvoj turizma u području Kvarnera (sjeverostočni Jadran). *Hrvatski geografski glasnik* 73(2), 35–47.
- Benac, Č., Ružić, I., Ljutić, K., Ferenac-Grubišić, A. (2012.): Ranjivost obala otoka Raba. *Rapski zbornik II*, 235–243. Ogranak Matice Hrvatske u Rabu.
- Benac, Č., Ružić, I., Žic, E. (2007.): Ranjivost obala u području Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 44, 201–214.
- Benassai, G., Di Paola, G., Aucelli, P. P. C. (2015.): Coastal risk assessment of a micro-tidal littoral plain in response to sea level rise. *Ocean and Coastal Management*, 104, 22–35. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.015
- Bognar, A. (1992.): Inženjerskogeomorfološko kartiranje. *Acta Geographica Croatica*, 27, 173–185.
- Bonaldo, D., Antonioli, F., Archetti, R., et al. (2019.): Integrating multidisciplinary instruments for assessing coastal vulnerability to erosion and sea level rise: lessons and challenges from the Adriatic Sea, Italy. *Journal of Coastal Conservation*, 23, 19–37. doi: 10.1007/s11852-018-0633-x
- 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(C4), 7649–7666. doi.org/10.1029/98JC02622
- Boumboulis, V., Apostolopoulos, D., Depountis, N., Nikolakopoulos, K. (2021.): The importance of geotechnical evaluation and shoreline evolution in coastal vulnerability index calculations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4). doi: 10.3390/jmse9040423
- Bucx, T., Marchand, M., Makaske, B., Van de Guchte, C. (2010.): *Comparative assessment of the vulnerability and resilience of 10 deltas synthesis report*. Delta Alliance International, Delft-Wageningen,. <http://www.delta-alliance.org/projects/Comparative-assessment-of-the-vulnerability-and-resilience-of-10-deltas>
- Cooper, J. A. G., McLaughlin, S. (1998.): Contemporary Multidisciplinary Approaches to Coastal Classification and Environmental Risk Analysis. *Journal of Coastal Research*, 14(2), 512–524. doi.org/10.2307/4298806
- Davoudi, S., Crawford, J., Mehmood, A. (2009.): Planning for climate change: Strategies for mitigation and adaptation for spatial planners. In *Planning for Climate Change: Strategies for Mitigation and Adaptation for Spatial Planners*. doi.org/10.4324/9781849770156
- De Pippo, T., Donadio, C., Pennetta, M., Petrosino, C., Terlizzi, F., Valente, A. (2008.): Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. *Geomorphology*, 97(3–4), 451–466. doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.015
- De Serio, F., Armenio, E., Mossa, M., Petrillo, A. F. (2018.): How to define priorities in coastal vulnerability assessment. *Geosciences*, 8(11), 415. doi.org/10.3390/geosciences8110415
- DHMZ (2006.): Vjetrovalna klima za područje uvale kod ušća Dubračine u Crikvenici. *Izješće*, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- Di Paola, G., Aucelli, P. P. C., Benassai, G., Rodríguez, G. (2014.): Coastal vulnerability to wave storms of Sele littoral plain (southern Italy). *Natural Hazards*, 71(3), 1795–1819. doi.org/10.1007/s11069-013-0980-8
- EMODnet Geology (2019.): *Coastal Behaviour*. <https://www.emodnet-geology.eu/data-products/coastal-behavior/>
- ETC CCA (2011.): Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Technical Paper 1/2011. In *Methods for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change Technical Paper 1/2011*. https://cca.eionet.europa.eu/docs/TP%7B%5C_%7D1-2011
- GEOPORTAL (2021.): *Geportal*. Državna geodetska uprava. <https://geoportal.dgu.hr/>
- Gornitz, V. (1990.): Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 9, 201–237.
- Gornitz, V. (1991.): Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, 89(4), 379–398. doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-0
- Hadipour, V., Vafaie, F., Kerle, N. (2020.): An indicator-based approach to assess social vulnerability of coastal areas to sea-level rise and flooding: A case study of Bandar Abbas city, Iran. *Ocean and Coastal Management*, 188.105077. doi: 10.1016/j.

- ocecoaman.2019.105077
- Hasselmann, K. (1974.): On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorol*, 6, 107–127. <https://doi.org/10.1007/BF00232479>
- HGI (2009.): *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300 000*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- Juračić, M., Benac, Č., Pikelj, K., Ilić, S. (2009.): Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). *Geomorphology*, 107(1–2), 90–99. doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.020
- Jutarnji list (2009.): Odron kamenja ubio Mađara na divljoj plaži. <https://www.jutarnji.hr/vijesti/crna-kronika/odron-kamenja-ubio-madara-na-divljoj-plazi-2824958> (pristupljeno: 04.02.2021.)
- Komen, G. J., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984.): On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of physical oceanography*, 14(8), 1271–1285.
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Bulteau, T., Mirgon, C., Yates, M. L., Méndez, M., Bailis, A., Idier, D., Oliveros, C. (2013.): An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(5), 1209–1227. doi.org/10.5194/nhess-13-1209-2013
- Lončar, G., Carević, D., Paladin, M. (2014.): Analysis of wave deformations before Zagrebačka obala – Port of Rijeka. *Hrvatske Vode*, 22, 327–336
- Mamužić, P., Milan, A., Korolija, B., Borović, I., Majcen, Ž. (1969.): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, list Rab*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Mani Murali, R., Ankita, M., Amrita, S., Vethamony, P. (2013.): Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3291–3311. doi.org/10.5194/nhess-13-3291-2013
- McLeod, E., Poulter, B., Hinkel, J., Reyes, E., Salm, R. (2010.): Sea-level rise impact models and environmental conservation: A review of models and their applications. *Ocean and Coastal Management*, 53(9), 507–517. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.06.009
- Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K., Woodroffe, C.D. (2016.): Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean and Coastal Management*, 123, 18–43
- Nicholls, R. J., Wilson, T. (2001.): Chapter 5. Integrated Impacts on Coastal Areas and River Flooding. *Regional Climate Change Impact and Response Study (RegIS)*.
- Özyurt, G., Ergin, A. (2010.): Improving Coastal Vulnerability Assessments to Sea-Level Rise: A New Indicator-Based Methodology for Decision Makers. *Journal of Coastal Research*, 26(2), 265–273. doi.org/10.2112/08-1055.1
- Pantusa, D., D'Alessandro, F., Riefolo, L., Principato, F., Tomasicchio, G. R. (2018.): Application of a coastal vulnerability index. A case study along the Apulian Coastline, Italy. *Water*, 10(9), 1–16. doi.org/10.3390/w10091218
- PAP/RAC (2019.): *Monitoring of IMAP Common Indicator 16: Length of coastline subject to physical disturbance due to the influence of manmade structures – Primorje-Gorski Kotar County*. JU Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, Rijeka.
- Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M. (2001.): *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*. Biblioteka Geographia Croatica, 16, Hrvatski hidrografski institut, Split.
- Pikelj, K., Ružić, I., Ilić, S., James, M. R., Kordić, B. (2018.): Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia. *Ocean and Coastal Management*, 156, 223–238. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.019
- Republika Hrvatska (2020.): *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
- Richards, J. A., Nicholls, R. J. (2009.): Impacts of climate change in coastal systems in Europe . PESETA-Coastal Systems study. *Impacts of climate change in coastal systems in Europe*. doi.org/10.2791/3558
- Rogers, K., Woodroffe, C.D. (2016.): Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation*, 20, 127–144. doi: 10.1007/s11852-016-0424-1
- Ružić, I. (2020.): *Analiza ranjivosti obalnog pojasa Primorsko-goranske županije zbog podizanja razine mora*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Rijeka.
- Ružić, I., Benac, Č. (2016.): Ranjivost obala otoka Raba zbog rasta razine mora. *Hrvatske vode*, 24(97), 203–214.
- Ružić, I., Benac, Č., Dugonjić Jovančević, S., Radišić, M. (2021.): The Application of UAV for the Analysis of Geological Hazard in Krk Island, Croatia, Mediterranean Sea. *Remote Sensing* 2021/13, 1790, 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs13091790>
- Ružić, I., Benac, Č., Ilić, S., Krvavica, N., Rubinić, J. (2018.): Geomorfološke promjene minijaturnog žala na kršu. *Hrvatske vode*, 26(103), 27–34.
- Ružić, I., Benac, Č., Ilić, S., Sušanjan, I., Ljutić, K. (2011.): Promjene korištenja zemljišta i regulacija bujičnih vodotoka: utjecaj na žala Liburnije i otoka Cresa. *Hrvatske vode*, 94, 772–781.
- Ružić, I., Benac, Č., Marović, I., Ilić, S. (2015.): A stability assessment of coastal cliffs using digital imagery. *Acta Geotechnica Slovenica*, 12(2), 25–35.
- Ružić, I., Dugonjić Jovančević, S., Benac, Č., Krvavica, N. (2019.): Assessment of the Coastal Vulnerability Index in an Area of Complex Geological Conditions on the Krk Island, Northeast Adriatic Sea. *Geosciences*, 9(5), 219. doi.org/10.3390/geosciences9050219
- Ružić, I., Marović, I., Benac, Č., Ilić, S. (2014.): Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia.

- Geo-Marine Letters*, 34(6), 555–565. doi.org/10.1007/s00367-014-0380-4
- Shanganlall, A., Ferentinou, M., Karymbalis, E., Smith, A. (2018.): IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018—Volume 6. 93–100. doi.org/10.1007/978-3-319-93142-5
- Szlafsztein, C., Sterr, H. (2007.): A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 11, 53–66. doi: 10.1007/s11852-007-0003-6
- Šepić, J., Vilibić, I., Strelec Mahović, N. (2012.): Northern Adriatic meteorological tsunamis: observations, link to the atmosphere and predictability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 117(C2), doi: 10.1029/2011JC007608
- Šibensko-kninska županija (2015.): *Plan integralnog upravljanja obalnim područjem Šibensko-kninske županije*. <https://www.sibensko-kninska-zupanija.hr/stranica/obalni-plan-ibensko-kninske-upanije/209?stranice=obalni-plan-ibensko-kninske-upanije%7B%5C%7Ddid=209>
- Šikić, D., Polšak, A., Magaš, N. (1969.): *Osnovna geološka karta 1:100.000, list Labin*. Institut za geološka istraživanja, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Šušnjar, M., Bukovac, J., Nikler, L., Crnolatac, I., Milan, A., Šikić, D., Grimani, I., Vulić, Ž., Blašković, I. (1970.): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, list Crikvenica*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., Marcomini, A. (2012.): Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: The case study of the North Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(7), 2347–2368. doi.org/10.5194/nhess-12-2347-2012
- UNDP (2009.): *Dobra klima za promjene. Izvešće o društvenom razvoju*. UNDP (UN Development Program) Hrvatska, Zagreb.
- Vilibić, I., Šepić, J. (2009.): Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: Overview. *Physics and Chemistry of the Earth* 34(17 – 18), 904–917. doi: 10.1016/j.pce.2009.08.004

VULNERABILITY OF KRK ISLAND COASTS

Abstract. The paper provides analyses of the Krk Island coast vulnerability. The determination of the coastal vulnerability index (CVI) was carried out for costal segments of 25 m in length and based on 5 selected parameters (variables): geological composition, fabric coastal slope, significant wave heights, exposure to flooding, and the existence and impact of shores. The presented results of the costal vulnerability analyses revealed the complexity of the researched area, with significant variations of the vulnerability index along the island's coast. Flooding scenarios for the forecast increase in sea levels by 60 cm until the end of the century, i.e. 120 cm at extreme tides were also tested. High vulnerability of the costal settlements on Krk Island was confirmed, primarily due to flooding exposure. It is necessary to create databases with sufficient accurate data on land and seafloor relief, geological composition fabric and oceanographic characteristics to determine the degree of vulnerability and hazard and risk mitigation measures.

Key words: climate change, sea level rise, coastal vulnerability index, marine erosion, natural hazard, risk, Kvarner area, Adriatic Sea

VULNERABILITÄT DER KÜSTE DER INSEL KRK

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wird die Vulnerabilität der Küste der Insel Krk analysiert. Der Vulnerabilitätsindex (engl. coastal vulnerability index; CVI) wurde für die Küstensegmente in Länge von 25 m bestimmt und zwar aufgrund der fünf Variablen: geologischer Aufbau, Küstengefälle, signifikante Wellenhöhe, Anfälligkeit gegenüber Überschwemmung und Existenz und Auswirkung des Strandes. Die dargestellten Ergebnisse der Analyse der Küstenvulnerabilität zeigen, dass das Forschungsgebiet einschließlicherheblicher Variationen des Vulnerabilitätsindex entlang der Inselküsten komplex ist. Die Überschwemmungsszenarien für einen Meeresspiegelanstieg von 60 cm bis Ende des Jahrhunderts bzw. 120 cm bei extrem hohen Flut wurden auch simuliert. Die sehr hohe Vulnerabilität der Küstensiedlungen auf der Insel Krk wurde bestätigt, insbesondere weil sie Überschwemmungen ausgesetzt sind. Es hat sich auch gezeigt, dass Datenbanken aufgrund richtiger Angaben über Land- und Meeresrelief, geologischen Aufbau und ozeanographische Merkmale erstellt werden sollen, um den Vulnerabilitätsgrad und die Maßnahmen bestimmen zu können und somit Gefahr und Risiko zu reduzieren.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Meeresspiegelanstieg, Vulnerabilitätsindex für die Küste, Meereserosion, natürliche Gefahr, Risiko, Kvarner, Adria