

GEOMORFOLOŠKE PROMJENE MINIJATURNOG ŽALA NA KRŠU

doc. dr. sc. Igor Ružić, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
iruzic@uniri.hr

**prof. emeritus Čedomir Benac,
dipl. ing. geol.**
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

dr. sc. Suzana Ilić, dipl. ing. građ.
Lancaster University,
Lancaster Environment Centre
Farrer Avenue, Lancaster, LA1 4YQ, UK

dr. sc. Nino Kravica, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

doc. dr. sc. Josip Rubinić, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

Žalo duljine oko 70 m nalazi se u uvali Uboka, na zapadnoj obali Riječkog zaljeva. Od 2. siječnja do 12. travnja 2012. godine provedeno je 11 mjerenja topografije žala. Korištena je Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrija pomoću koje su generirani trodimenzionalni oblaci točaka visoke preciznosti i razlučivosti. Korištena metodologija je omogućila povoljno i brzo snimanje geomorfoloških promjena. Zabilježene su značajne promjene tijela žala prouzročene uzajamnim djelovanjem valova i istjecanjem površinskih i podzemnih voda kada dolazi do erozije žala oblikovanjem kanala kroz njegovo tijelo. Nakon prestanka istjecanja žalo se brzo oporavlja, odnosno poprima prvotni oblik djelovanjem vjetrovnih valova. Na mjestu kanala brzo se formira berma žala, najprije ona uža, a nakon toga stabilna široka i visoka berma. U slučaju kanaliziranja bujičnih vodotoka na ušću žala dolazi do znatnog povećanja brzina toka u odnosu na prirodan način otjecanja, koji je opisan u ovom radu, zbog čega može doći do trajne erozije žala.

Ključne riječi: minijaturno žalo, SfM fotogrametrija, bujica, priobalni izvor, krš, Riječki zaljev

1. UVOD

Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije za istraživanja žala u priobalju Hrvatske sustavno koristi od 2012. godine (James et al., 2013.; Ružić et al., 2014., 2015.; Pikelj et al., 2017 a.). Korištenje trodimenzionalnih oblaka točaka visoke razlučivosti i preciznosti sve je važnije u analizama i tumačenju morfoloških promjena i procesa na žalima. Razdoblja istraživanja variraju od jednog dana do više godina. Koriste se različite tehnike za praćenje morfologije plaža i generiranje digitalnih elevacijskih modela (DEM), kao što su: video tehnika (ARGUS), lasersko skeniranje (LIDAR i TLS) te fotogrametrijske tehnike (Brunier et al., 2016.). Svaka od navedenih tehnologija ima određene prednosti i mane (James et al., 2013.).

SfM algoritam baziran je na sličnim principima kao i klasična stereoskopska fotogrametrija, bez potrebe za skupom i kalibriranom fotografskom opremom, velikog broja poznatih kontrolnih točaka i njihovim označavanjem

tijekom obrade. Trodimenzionalna mjerenja objekta zasnovana su na seriji fotografija snimljenih s različitim pozicijama, čija se scena preklapa. Osnovna razlika SfM algoritama i klasične fotogrametrije je u automatskom generiranju snimljene geometrije i lokacija kamere, koristeći iterativni postupak podešavanja koji se zasniva na bazi podataka o sceni, automatski generiranih iz niza fotografija (Snavely et al., 2008.). SfM fotogrametrija daje dobre rezultate trodimenzionalne rekonstrukcije objekata izraženih tekstura, kod kojih se može postići veliki postotak preklapanja fotografija scene, te ako se objekt može snimiti sa većeg raspona horizontalnih i vertikalnih kutova (James and Robson, 2012.; Westoby et al., 2012.).

Istraživanja morfoloških promjena minijaturnih šljunčanih žala su rijetka unatoč njihovoj velikoj zastupljenosti (Dehouck et al., 2009.). Još rjeđa su istraživanja prodora slatkih voda na minijaturna žala

(Pranzini i Rosas, 2007.; Faivre et al., 2011.; Pranzini et al., 2013.). Mnoga minijaturna žala brdovitih zaleđa nastala su na ušćima potoka i bujičnih vodotoka (Storlazzi et al., 2000.; Thomas et al., 2012.; Pranzini et al., 2013.). Većina donosa sedimenta brdovitog reljefa potječe od planinskih potoka i bujičnih vodotoka (Inman i Jenkins, 1999.; Norcross et al., 2002.; Juračić et al., 2009.). Količina donosa bujičnog sedimenta ovisi o fizičkim i geološkim karakteristikama sliva, intenzitetu oborina, korištenju zemljišta, uređenju vodotoka, izgradnji brana te korištenju voda (Inman i Jenkins, 1999.). Na područjima s mediteranskom klimom pronos bujičnog sedimenta vezan je uz rijetke događaje visokog intenziteta koji se pojavljuju nekoliko puta godišnje ili pak jednom u više godina (Hooke, 2006.; Barnard i Warrick, 2010.). Bujični vodotoci mogu donijeti značajne količine sedimenta na žalo, no nastale promjene teško je izmjeriti, jer se radi o iznimno rijetkim, teško predvidljivim događajima (Barnard i Warrick, 2010.; Pranzini et al., 2013.).

Istraživanja minijaturnih žala u Hrvatskoj su relativno rijetka (Benac, 1992.; Benac et al., 2007.; Rajčić et al., 2010.; Faivre et al., 2011.; James et al., 2013.; Ružić, 2014.; Lončar et al., 2016.; Pikelj et al., 2017 b.). Faivre (2011.) opisuje promjene žala Predošćica, na otoku Krku koje su nastale istjecanjem bujičnog vodotoka. Weir (2006.) istražuje oporavak tijela žala lagune nakon erozije izazvane istjecanjem slatkih voda, žalo se brzo oporavlja formiranjem berme. Migracija sedimenta berme inducirana je kombinacijom djelovanja plimnih amplituda i visokih valova. Vertikalni prirast berme je brži u odnosu na horizontalni. Duncan (1964.) je uočio da se tijekom formiranja berme veća zrna sedimenta žala pomiču više prema kopnu u odnosu na manja zrna koja ostaju na nižim kotama.

U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja kratkoročnih promjena minijaturnog šljunčanog žala u uvali Uboka (slika 1). Promjene žala izazvane su djelovanjem valova i istjecanjima slatkih voda bujičnog vodotoka i priobalnih izvora. Analize morfoloških promjena žala Uboka temeljene su na trodimenzionalnim oblacima točaka i digitalnim elevacijskim modelima (DEM) deriviranim iz niza fotografija SfM fotogrametrijom.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Vodotok Uboka ima bujične značajke, dužine je 2,27 km, a površine sliva oko 1,75 km². Njegova izvorišna zona nalazi se na nadmorskoj visini od oko 500 m. Cjelokupni sliv oblikovan je u vapnencima gornjokredne starosti (Šikić et al., 1969.). Ta stijenska masa je tektonski deformirana, raspucana i izrazito okršena, i stoga velike upojnosti i vodopropusnosti, što bitno utječe na hidrogeološke i hidrološke značajke sliva. Prosječna godišnja količina padalina uz obalu je oko 1.500 mm, a značajno se povećava s nadmorskom visinom, tako

da u uzvodnom dijelu sliva premašuje 2.000 mm (DHMZ, 2003.). Većina površinske vode infiltrira u krško podzemlje i teče prema obali Riječkog zaljeva, gdje se izlijeva u more na brojnim priobalnim izvorima (Rubinić et al., 2007.). U većem razdoblju godine korito vodotoka Uboka je suho. Međutim, tijekom razdoblja intenzivnih oborina javlja se površinsko tečenje sve do žala u istoimenoj uvali. Uzdužni profil korita je vrlo strm, a također i padine na slivnom području pa vodotok ima izrazite bujične značajke: kratko vrijeme koncentracije i veliku brzinu toka. Procijenjen maksimalni protok bujičnih površinskih voda 100-godišnjeg povratnog perioda je oko 5 m³/sec, koliki je red veličine i dotok podzemnih izvorskih voda koje se javljaju na spomenutom žalu. Opisane hidrološke i hidrogeološke značajke značajno utječu na morfološke promjene tijela žala, uz dominantan utjecaj valova.



Slika 1: Pregledna karta sliva vodotoka Uboka (crvenom linijom naznačene su granice sliva).

Istraženo žalo ima duljinu 70 m, dok širina varira od 10 do 20 m (slika 2). Tijelo žala sastoji se od dobro zaobljenih zrna promjera 5 do 50 mm. Žalo je stvoreno transportom odlomaka i blokova podrijetlom iz vapnenačke stijenske mase bujičnim tokom, a manjim dijelom i osipavanjem s okolnih litica. Zbog toga se unutar tijela žala nalaze i pojedinačna zrna promjera većeg od 100 mm (slika 3). Djelovanjem valova u procesu korazije, odlomci i blokovi su usitnjeni i poprimili su zaobljen oblik. U razdobljima pojave površinskog tečenja, voda oblikuje korito približno u sredini žala. U tom je razdoblju vidljivo izviranje vode na više mjesta u tijelu žala, kao i njegovom zaleđu (slike 2 i 3).

Zona loma valova („surf-zone“) žala u uvali Uboka je relativno uska, valovi se lome neposredno ispred obalne linije, udar loma vala odvija se na samom licu žala. To uzrokuje prostornu koncentraciju energije disipacije valova, zbog čega dolazi do prekoračenja kritičnih vrijednosti pomaka šljunčanih sedimenta (Carter i Orford, 1984.). Žalo je orijentirano sjeveroistok – jugozapad (NE-SW), a njegova rotacija ovisi primarno o valovima generiranim vjetrovima iz SE (jugo) i NE (bura) smjera, te istjecanju površinskih i podzemnih voda. Mjerenjem je ustanovljeno da je utjecaj plime i oseke malih amplituda, kao što je to slučaj u Jadranskom moru, zanemariv za migracije sedimenta šljunčanih žala (Vousdoukas et al., 2009.)



Slika 2: Žalo Uboka južno od Mošćeničke Drage: 1.trasa bujičnog vodotoka; 2. povremeni izvori



Slika 3: Površinski tok i izvori (snimio: Č. Benac)

3. PODLOGE I METODOLOGIJA

Od 2. siječnja do 12. travnja 2012. godine provedeno je 11 mjerenja topografije žala u uvali Uboka (tablica 1). Iz niza fotografija generirani su trodimenzionalni oblaci točaka i DEM žala. Na bokovima uvale nalaze se strme vertikalne karbonatne stijene koje omogućuju snimanje fotografija za SfM rekonstrukciju (slike 2 i 3).

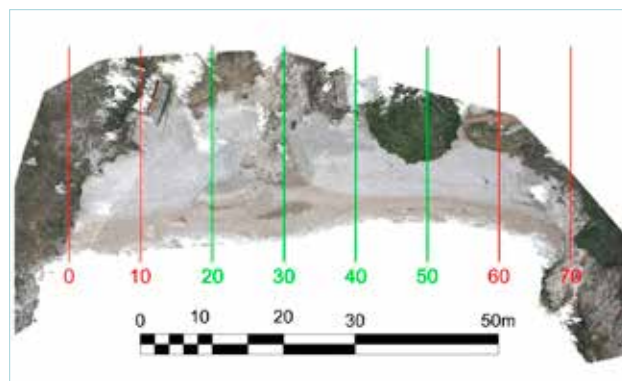
Verifikacija i georeferenciranje trodimenzionalnih oblaka točaka provedeno je na referentnom oblaku točaka mjerenja br. 8 (17.2.), kada su obavljena SfM i RTK-GPS mjerenja. Oblaci točaka georeferencirani su uz pomoću 9 kontrolnih točaka, od kojih su 5 fiksni točkici označeni markerom. Verifikacija modela zasnovana je na visinskoj razlici 25 točaka mjerenih GPS uređajem i SfM fotogrametrijom, korijen srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE) visina izmjerenih točaka je 4,1 cm, što je unutar preciznosti RTK-GPS uređaja na CROPOS sustavu (DGU, 2017.). Korištena metodologija detaljno je opisana u više publikacija (James et al., 2013.; Ružić, 2014.; Ružić et al., 2014., 2015.).

Trodimenzionalni oblaci točaka korišteni su za prostornu analizu promjena visina žala. Iz oblaka točaka izvučeni su poprečni presjeci žala koji prikazuju karakteristične promjene nastale migracijom sedimenta.

Tablica 1. Uzastopna mjerenja topografije žala u uvali Uboka tijekom 2012. godine

| Mj.br | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Datum | 2.1. | 5.1. | 20.1. | 24.1. | 5.2. | 9.2. | 14.2. | 17.2. | 11.3. | 11.4. | 12.4. |

U rezultatima istraživanja prikaz žala rotiran je 48°, a točka E 322710, N 5007320 je ishodište relativnog koordinatnog sustava. Poprečni presjeci označeni su kao vrijednost apscise profila u odnosu na relativni koordinatni sustav (slika 4).



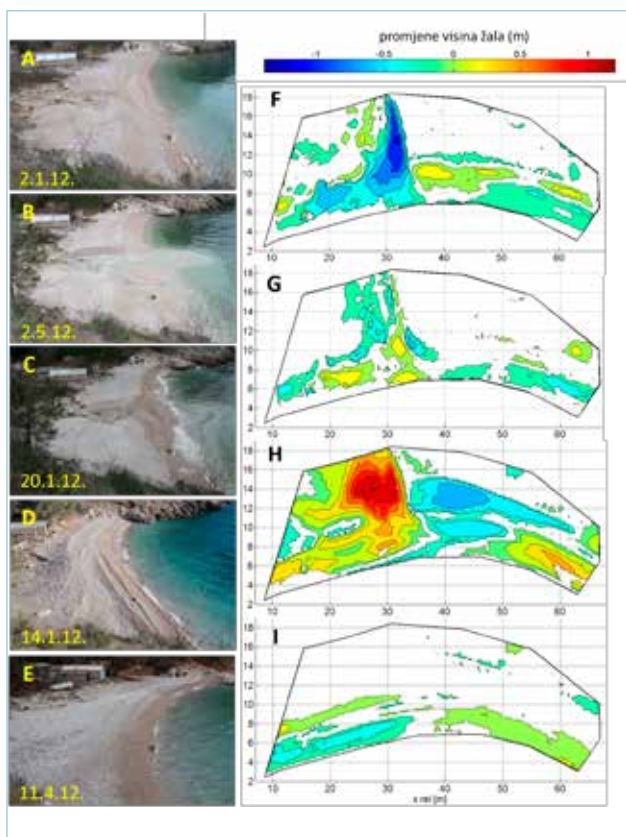
Slika 4: Analizirani profili žala Uboka (označeni zelenom bojom).

Morfološke promjene žala analizirane su korištenjem meteoroloških podataka s lokalne meteorološke postaje Selce kod Mošćenica (DAVIS, Vantage Pro), koja je udaljena 5 km od lokacije, te službenih meteoroloških motriteljskih postaja Kukuljanovo i Crikvenica (DHMZ). U ovom su radu prikazani podatci o vjetru s postaje Kukuljanovo, koja daje realnije podatke za vjetrove iz smjera sjeveroistoka (NE, bura) i jugoistoka (SE, jugo) za područje Riječkog zaljeva. Meteorološke postaje na zapadnoj strani Riječkog zaljeva ne daju realne podatke za vjetrove iz smjera sjeveroistoka, te je meteorološka postaja Selce korištena samo za analizu oborina.

4. REZULTATI

Morfološke promjene minijaturnog žala u uvali Uboka definirane su na temelju provedenih terenskih mjerenja, pregleda i obrade prikupljenih podataka, te analize meteoroloških podataka. Zabilježene karakteristične promjene i stanja žala su definirani kao: otvaranje, spori i brzi oporavak, te period bez značajnih promjena.

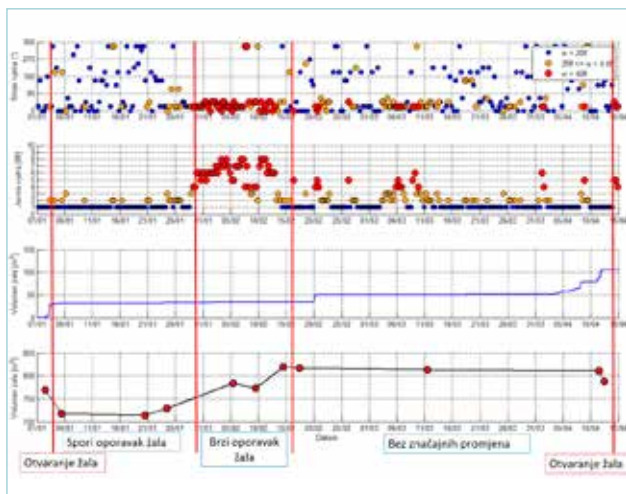
Promjene visina žala određene su na osnovi razlika visina DEM tijela žala (slike 5-10). Najveća erozija nastala je otvaranjem tijela žala, odnosno formiranjem korita između mjerenja 1 (2.1.) i 2 (5.1.) (slike 5A i 7). Najveće promjene žala nastale su nakon puhanja orkansko vjetra iz NE smjera (bure) između mjerenja 4 (20.1.) i 7 (14.2.), kada je došlo do akumulacije sedimenta u koritu, sjeveroistočnom i jugoistočnom dijelu žala, dok je središnji dio žala erodiran (slike 5H, 9).



Slika 5: Zabilježeni oblici žala Uboka (A-E), promjene visina žala (m) sa definiranim morfološkim stanjima: otvaranje (F), spori oporavak (G), brzi oporavak (H), bez značajnih promjena (I)

Volumeni žala integrirani su iz DEM unutar analizirane površine tijela žala koja je označena crnom linijom na slikama 7-10. Volumeni su integrirani iznad kote 0,20 m, da bi se anulirao utjecaj morske razine tijekom snimanja.

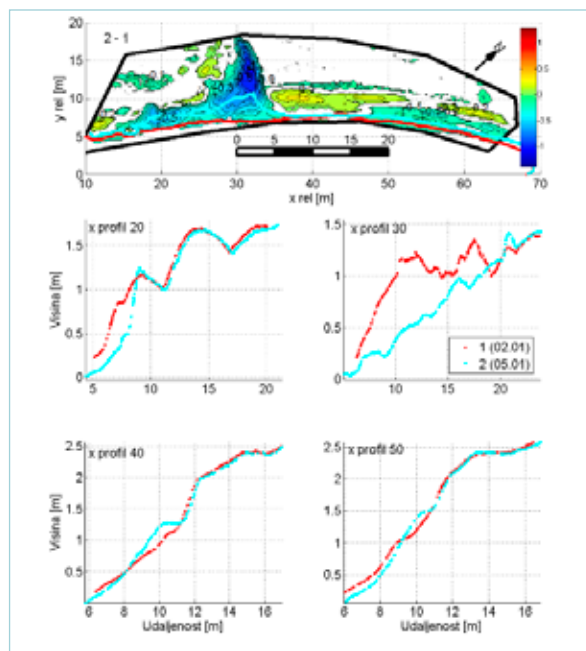
Promjene volumena žala u ovisnosti o meteorološkim parametrima prikazane su na slici 6.



Slika 6: Volumen žala Uboka u ovisnosti o smjeru i jačini vjetra (MP Kukuljanovo) i oborinama (MS Selce). 1.1. - 15.4.2012.

Najveće promjene volumena žala nastale su kao posljedica valova orkanske bure koja je puhala koncem siječnja i u prvoj polovici veljače 2012. godine. Nakon toga nije došlo do značajnih promjena žala do travnja. U periodu od 15. veljače do 5. travnja zabilježeni su jaki vjetrovi iz NE smjera koji nisu izazvali značajnije promjene na žalu. Do promjena nije došlo jer je sediment iz podmorskog dijela prebačen na suhi dio žala tijekom prijašnje orkanske bure, kada je uspostavljen i energetski stabilan oblik žala za valove iz NE smjera.

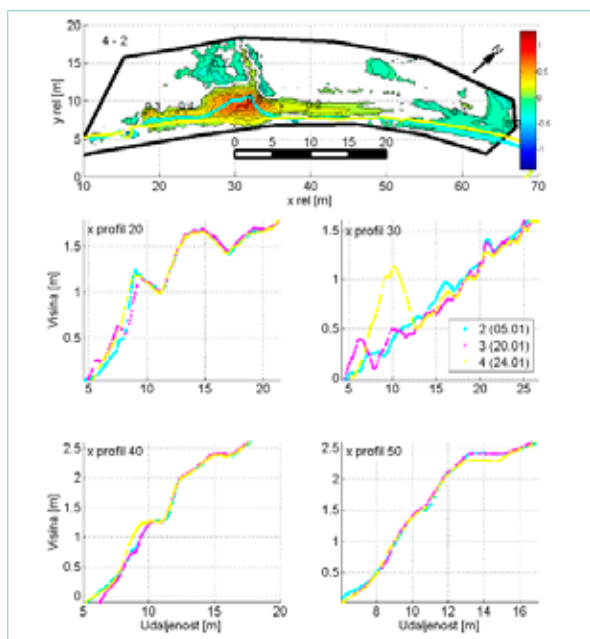
Između mjerenja 1 (2.1.) i 2 (5.1.) došlo je do erozija žala od oko 55 m³ koja je izazvana otjecanjem voda (slika 5). Najveće promjene nastale su povećanjem korita i erozijom berma na njegovom ušću. Na jugozapadnom dijelu žala došlo je do erozije na nižim kotama. Sjeveroistočno od profila 35 akumuliran je sediment i formirana je nova berma. Najveće promjene poprečnih presjeka žala su oko korita (profil 30), dok su na ostalim presjecima promjene višestruko manje (slika 7).



Slika 7: Promjene žala Uboka između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1.).

Između mjerenja 2 (5.1.) i 4 (24.1.) zabilježen je porast volumena žala oko 12,7 m³. Nakon što su se smanjila otjecanja došlo je do akumulacije sedimenta u tada neaktivnom koritu, gdje je formirana berma visine 1,10 m između profila 25 i 35. Manja erozija žala zabilježena je na sjeveroistočnoj strani (slika 8).

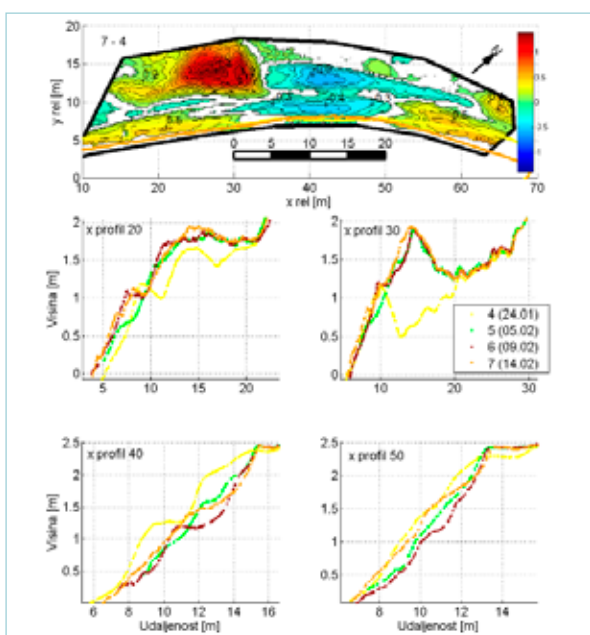
Između mjerenja 4 (20.1.) i 7 (14.2.) nastale su najveće promjene tijekom žala tijekom provedenih istraživanja (slike 5 i 6). Volumen žala povećan je oko 93 m³ pretežno donosom sedimenta iz podmorja u neposrednoj blizini žala. Taj period je definiran kao brzi oporavak žala kada su puhali orkanski vjetrovi iz NE smjera (slika 6). Na središnjem dijelu žala došlo je do erozije, dok su



Slika 8: Promjene žala Uboka između mjerenja 2 (5.1.) i 4 (24.1.).

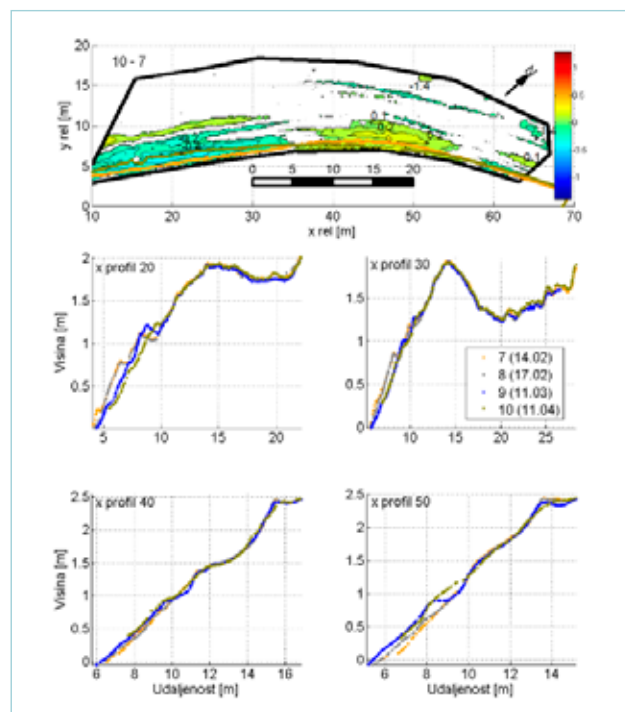
sedimenti akumulirani u koritu i na rubovima žala (slika 9). Rezultati prikazuju prostorno složene promjene žala kao posljedica migracija sedimenta uzduž („*long-shore*“) i okomito („*cross-shore*“) na obalu žala.

Sedimenti žala su akumulirani između profila 10 i 34 duž cijelog presjeka. Oko profila 30 sedimenti su akumulirani u kanalu, gdje je formirana nova berma visine 1,95 m. Između profila 35 i 50 došlo je do erozije žala duž čitavog presjeka do visine 2,15 m. Od profila 50 do 60 erodiran je gornji dio žala, dok je na donjem dijelu došlo do akumulacije. Na istočnom rubu žala (profil 60-70) sedimenti su se akumulirali duž čitavog profila (slika 9).



Slika 9: Promjene žala Uboka između mjerenja 4 (24.1.) i 7 (14.2.).

Između mjerenja broj 7 (14.2.) i 10 (11.4.) nisu zabilježene značajne promjene, volumen žala smanjio se oko 9 m³. Manja erozija zabilježena je na jugozapadnom dijelu, dok je na sjeveroistočnom došlo do akumulacije sedimenta. Zabilježen je uzduž-obalni transport sedimenta od jugozapada prema sjeveroistoku žala i to samo na nižim kotama (slika 10).



Slika 10: Promjene žala Uboka između mjerenja 7 (14.2.) i 10 (11.4.).

5. DISKUSIJA

U ovom je radu zabilježen brzi oporavak žala nakon erozije izazvane istjecanjem voda na tijelu žala. Brzina zatvaranja korita i visina berme žala ovisi o djelovanju valova. U prvom periodu oporavka žala zabilježeni su vjetrovi do 4 bofora, oblikovana je berma visine 1,20 m (slika 8). Nakon toga je došlo do stvaranja berme visine 1,95 m na ušću korita uslijed valovanja orkanske bure jačine do 10 bofora. Novoformirana berma je ostala stalne visine i oblika do travnja. To se podudara s rezultatima istraživanjima (Weir et al., 2006.) kada dolazi do brzog zatvaranja žala transportom sedimenta prema obali. U prvoj fazi oporavka žala u uvali Uboka, prirast berme je rezultat transporta sedimenta žala prema obali (slika 5), što je sukladno rezultatima istraživanja Hinea (1979.). Potpuni oporavak žala odvijao se vrlo brzo, šljunkoviti sedimenti koji su bili odneseni u more brzo su se vratili na tijelo žala djelovanjem valova. Takav obrazac ponašanja prisutan je na većini prirodnih žala Kvarnera, nastalih akumulacijom sedimenta transportiranih bujičnim tokovima. Prirodno otjecanje odvija se putem povremenog strujanja u bujičnom erodiranom koritu i procjeđivanjem kroz samo tijelo šljunčanog žala, zbog

velike vodopropusnosti. Korito migrira po žalu u ovisnosti o trajanju, smjeru i jačini valova. Opisano, prirodno istjecanje onemogućuje pojavu velikih brzina toka vode okomito na obalnu liniju žala kao kod reguliranih ušća bujičnih vodotoka. Velike brzine istjecanja mogu sedimente žala odnijeti dalje od obale na veće dubine, na kojima slabi utjecaj valova, a time i mogućnost vraćanja sedimenta na tijelo žala. Na taj način može nastati trajna erozija žala.

U urbanim sredinama, kada je neophodno izvesti regulacijski kanal na ušću bujičnog vodotoka, ključan je kvalitetan projekt izvedbe čvrstog korita. Potrebno je izvesti prelazne građevine koje neće izazvati eroziju žala i omogućit će akumulaciju sedimenta uz regulirano ušće.

Nedostatak mjerenja morfoloških promjena na šljunčanim žalima prije i nakon olujnog događaja često je ograničavajuć čimbenik provedenih istraživanja (Poate et al., 2013.). U ovom su radu prikazani rezultati istraživanja morfologije žala prije i poslije olujnog događaja. Primijenjeni su detaljni trodimenzionalni oblaci točaka žala, što je omogućilo adekvatne analize obalnih procesa. Najveća prednost korištene metodologije zasnovane na SfM fotogrametriji je jednostavnost primjene i brzog izlaska na teren, te sama mogućnost provođenja mjerenja na žalu Uboka, koje je teško pristupačno s kopna.

Korištena metodologija ima određena ograničenja, u prvom redu snimanja se ne mogu provoditi tijekom noći, viših razina mora i velikih valova. U prvim mjerenjima eksperimentiralo se s primjenom tehnologije, načinom snimanja i obrade fotografija, te nije snimljen jugozapadni dio žala do profila 10 zbog nedovoljnog broja fotografija. Na tom dijelu nisu integrirani volumeni žala, zbog čega su moguća određena odstupanja. Na tom dijelu promjene žala su znatno manje u odnosu na druge dijelove žala (slike 7-10).

Isto tako, potrebno je provesti mjerenja prije i poslije olujnih događaja, što može biti organizacijski zahtjevno ili pak nemoguće zbog gore navedenih ograničenja. Korištenjem video tehnike (Holman i Stanley, 2007.) moguće je konstantno snimati promjene žala za vrijeme danjeg svijetla. Primjena opisane metodologije i video tehnike dala bi adekvatan uvid u obalne procese minijaturnih žala.

Najveći problem opisanih metoda je nemogućnost mjerenja tijela žala ispod razine mora i vode, gdje se odvija značajan udio migracija sedimenta. Mjerenje tog dijela moguće je uporabom bespilotnih letjelica u kombinaciji s SfM fotogrametrijom (Woodget et al., 2015.; Grenzdörffer i Naumann, 2016.) koju su autori s uspjehom počeli koristiti na plaži u Baškoj (Pikelj et al., 2017 b.).

Uslijed utjecaja globalnih klimatskih promjena, predviđa se značajno povećanje razine mora na Jadranu do kraja 21 stoljeća (Orlić i Pasarić, 2013.). To bi moglo imati značajan utjecaj na žale, niske obale i priobalna otjecanja (Ružić i Benac, 2016.; Benac et al., 2017.). Zbog toga će doći do intenziviranja obalnih procesa na žalima, a time i potrebe za provođenjem monitoringa i primjene SfM fotogrametrije.

6. ZAKLJUČAK

Istražena lokacija žala u uvali Uboka, na zapadnoj obali Riječkog zaljeva, jedna je od brojnih pojava slične geološke građe na području Kvarnera, pa i većeg dijela hrvatske obale Jadranskog mora. Tu je na kraju bujičnog vodotoka oblikovano žalo usitnjavanjem i zaobljavanjem krupnozrnastog sedimenta transportiranog s okolnih padina. Kraj sedimentnog tijela lepezastog oblika često završava na morskom dnu i više desetaka metara od obale. Budući da je to područje krša, osim periodičnog bujičnog toka, javlja se mnogo dugotrajnije istjecanje vode iz krškog vodonosnika.

Mjerenjima je ustanovljeno da se periodični bujični tok u uvali Uboka usijeca u tijelo žala i tako bitno mijenja njegov oblik. Erodiranje žala u manjoj mjeri mogu uzrokovati i snažna izviranja vode u tijelu žala. Nakon prestanka erozijskog djelovanja voda s kopna, tijelo žala se relativno brzo oporavlja, odnosno poprima prvotni oblik ovisno o intenzitetu i trajanju valova koji uzrokuju te morfološke promjene. U prvoj fazi oporavka žala sedimenti ispunjavaju privremeno korito uz obalu, a povećanjem valova, akumulacija sedimenta događa se i uzvodno. Sukladno tomu, dolazi i do formiranja bermi na tijelu žala. Ukoliko u dužem razdoblju postoji balans donosa s jedne te gubitaka sedimenta s druge strane, tijelo žala je u ravnotežnom stanju.

Korištena SfM fotogrametrija pokazala se vrlo prikladna metoda mjerenja složenih i brzih morfoloških promjena na teško pristupačnom minijaturnom žalu u uvali Uboka. Ta metoda mjerenja može se koristiti i na sličnim, brojnim lokacijama na hrvatskoj obali Jadranskog mora. Rezultati istraživanja morfoloških promjena žala mogu se poboljšati korištenjem bespilotnih letjelica u kombinaciji s SfM fotogrametrijom, što omogućuje snimanje tijela žala ispod razine mora. Na taj se način može dobiti cjelovita slika migracije sedimenta iznad i ispod razine mora, što je ključno za procjenu količine i stanja sedimenta u tijelima ne samo prirodnih, već i umjetno oblikovanih žala. Navedeno može značajno doprinijeti pri izradi strategije upravljanja obalnim pojasom Jadranskog mora. ■

LITERATURA

- Barnard, P.L.; Warrick, J.A. (2010.): *Dramatic beach and nearshore morphological changes due to extreme flooding at a wave-dominated river mouth*. Marine Geology, 271 (1-2), 131-148.
- Benac, Č. (1992.): *Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva*. Geografski glasnik, 54, 1-18.
- Benac, Č.; Rubinić, J.; Ružić, I., Radišić, M. (2017.): *Geomorfološka evolucija riječnih dolina i ušća na istarskom poluotoku*. Hrvatske vode, 100, 71-80.
- Benac Č., Ružić I., Žic E. (2007.): *Ranjivost obala u području Kvarnera*. Pomorski zbornik, 44, 201-214.
- Bonacci, O. (2003.): *Karst hydrology*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Brunier, G.; Fleury, J.; Anthony E.J.; Gardel, A.; Dussouillez, P. (2016.): *Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach*. Geomorphology, 261, 76-88.
- Carter, R.W.G.; i Orford, J.D. (1984): *Coarse clastic barrier beaches: A discussion of the distinctive dynamic and morphosedimentary characteristics*. Marine Geology, 60, 377-389
- Dehouck, A.; Dupuis, H.; Senechal N. (2009.): *Pocket beach hydrodynamics: The example of four macrotidal beaches, Brittany, France*. Marine Geology, 266, 1-17.
- DGU (2017.): CROPOS, <http://www.cropos.hr/>. [29-10-2017], Državna geodetska uprava, Zagreb.
- DHMZ (2003.): *Klimatski atlas Hrvatske*. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- Duncan, J.R. (1964.): *The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development*. Marine Geology, 2, 186-19.
- Faivre, S.; Pahernik, M.; Maradin M. (2011.): *The Gully of Potovošća on the Island of Krk – The effects of a short-term rainfall event*. Geologia Croatica, 64, 67-80.
- Grenzdörffer G.J.; Naumann M. (2016.): *Investigations on the Possibilities of Monitoring Coastal Changes Including Shallow Under Water Areas With Uas Photo Bathmetry*. ISPRS, XLI-B1:843-850.
- Hine, A.C. (1979.): *Mechanisms of berm development and resulting beach growth along a barrier spit complex*. Sedimentology, 26(3), 333-351.
- Holman, R.A.A.; Stanley, J. (2007.): *The history and technical capabilities of Argus*. Coastal Engineering, 54, 477-491.
- Hooke, J.M. (2006.): *Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region*. Geomorphology, 79 (3-4), 311-335.
- Inman, D.L.; Jenkins, S.A. (1999.): *Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers*. Journal of Geology, 107 (3), 251-270.
- James, M.R.; Ilić S.; Ružić, I. (2013.): *Measuring 3D coastal change with a digital camera*. Coastal Dynamics 2013, 893-904.
- James, M.R.; Robson, S. (2012.): *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117 (3), F3, F03017.
- 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, 90-99.
- Lončar G.; Carević, D.; Bekić, D.; Mostećak, H.; Babić, M.; Grbić, N.; Pranjić, V. (2016.): *Numeričko modeliranje morfodinamike poprečnog profila na šljunčanom žalu Medveja*. Hrvatske vode, 95(24), 29-38.
- Norcross, Z.M.; Fletcher, C.H.; Merri, M.; Merrifield, M. (2002.): *Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii*. Marine Geology, 190, 553-580.
- Orlić M.; Pasarić Z. (2013.): *Semi-empirical versus process-based sea-level projections for the twenty-first century*. Nature Climate Change, 3(8), 735-738.
- Pikelj, K.; Ružić, I.; Ilić, S.; James, M.R.; Kordić, B. (2017 a): *Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia*. Ocean and Coastal Management (In Press)
- Pikelj K.; Ružić I.; James M.R.; Ilić S. (2017 b): *Structure-from-Motion (SfM) monitoring of nourished gravel beaches in Croatia*. Coasts, Marine Structures Breakwaters, 112:1-112:4.
- Pranzini E.; Rosas V. (2007.): *Pocket beach response to high magnitude – low frequency floods (Elba Island, Italy)*. Journal of Coastal Research, 2007(50), 969-977
- Pranzini E.; Rosas V.; Jackson N.L.; Nordstrom K.F. (2013.): *Beach changes from sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood*. Geomorphology, 199, 36-47.
- Rajčić S.T.; Faivre S.; Buzjak N. (2010.): *Promjene žala na području Medića i Mimica od kraja šezdesetih godina 20. stoljeća do danas*. Hrvatski geografski glasnik, 72 (2), 27-48.
- Rubinić J.; Horvat B.; Kuhta M.; Stroj A. (2007.): *Analiza izdašnosti priobalnih izvora na području Opatije korištenjem termalnih infracrvenih satelitskih snimaka*. Hrvatske vode i Europska unija - Izazovi i mogućnosti, Opatija, 211-216
- Ružić I. (2014.): *Dinamika žala u području Kvarnera*. Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
- Ružić I.; Benac Č. (2016.): *Ranjivost obala otoka Raba zbog rasta razine mora*. Hrvatske vode 97(24), 203-214.
- 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.; 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.

- Snavey N.; Seitz S.M.; Szeliski R. (2008.): *Modeling the world from Internet photo collections*. International Journal of Computer Vision, 80(2), 189–210.
- Storlazzi C.D.; Field M.E.; Rock S. (2000.): *Sediment distribution and transport along a rocky, embayed coast: Monterey Peninsula and Carmel Bay, California*. Marine Geology, 170 (3–4), 289–316.
- Šikić D.; Polšak A.; Magaš N. (1969.): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000*. List Labin, L 33–101
- Thomas T.; Phillips M.R.; Williams A.T.; Jenkins R.E. (2012.): *Medium time-scale behaviour of adjacent embayed beaches: Influence of low energy external forcing*. Applied Geography, 32(2), 265–280
- Vousdoukas, M. I.; Velegarakis, A. F.; & Karambas, T. V. (2009.): *Morphology and sedimentology of a microtidal beach with beachrocks: Vatera, Lesbos, NE Mediterranean*. Continental Shelf Research, 29(16), 1937–1947.
- Weir F.M.; Hughes M.G.; Baldock T.E. (2006.): *Beach face and berm morphodynamics fronting a coastal lagoon*. Geomorphology, 82, str.331–346.
- Westoby M.J.; Brasington J.; Glasser N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. (2012.): *“Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology, 179, str. 300–314
- Woodget A.S.; Carbonneau P.E.; Visser F.; Maddock I.P. (2015.): *Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry*. Earth Surf Process Landforms, 40, str. 47–64.

Geomorphological changes in a miniature beach in the karst

Abstract. A 70 m long beach is located in the Uboka cove on the western coast of the Rijeka bay. From 2 January to 12 April 2012, 11 measurements of the beach topography were performed by applying the-structure-from-motion (SfM) photogrammetry which generated 3-D point clouds of high precision and resolution. The applied methodology facilitated an inexpensive and fast survey of geomorphological changes. Significant changes in the beach body were recorded, caused by the interaction of wave action and surface water and groundwater discharges and leading to the beach erosion through a formation of channels within its body. After water discharges the beach quickly recovered and resumed its original form through the wind wave action. The channel position was quickly replaced by the beach berm, followed by a stable, high berm. In the case of channelled torrential watercourses on the beach, a significant increase in the velocities occurs in comparison to the natural runoff, as described in this paper, and leading up to potential permanent beach erosion.

Key words: miniature beach, SfM photogrammetry, torrent, coastal spring, karst, Rijeka Bay

Geomorphologische Veränderungen eines winzigen Strandes im Karst

Zusammenfassung. Ein 70 Meter langer Strand befindet sich in der Bucht Uboka an der westlichen Küste der Rijeka-Bucht. Im Zeitraum vom 2. Januar bis 12. April 2012 wurden 11 Messungen der Strandtopographie durchgeführt. Mittels der Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetrie wurden dreidimensionale Punktwolken hoher Präzision und Auflösung generiert. Die angewandte Methode ermöglichte eine günstige und schnelle Aufzeichnung von geomorphologischen Veränderungen. Wesentliche Veränderungen des Strandes wurden aufgezeichnet, die durch Wechselwirkungen zwischen den Wellen und den ins Meer fließenden Oberflächengewässern und Grundwässern verursacht wurden: der Strand erodiert wegen der Entstehung des Kanals im Strandkörper. Wenn das Wasser nicht mehr fließt, nimmt der Strand bald ihre ursprüngliche Form durch die Wirkung von Windwellen an. An der Stelle, an der sich der Kanal befand, bildet sich bald eine Berme, zuerst eine schmale Berme und dann eine stabile breite und hohe Berme. Im Falle der Kanalisierung von Flutwasser an der Mündung am Strand kommt es zur erheblichen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Verhältnis zum natürlichen, in diesem Beitrag beschriebenen Abfluss, was zur dauerhaften Erosion des Strandes führen kann.

Schlüsselwörter: winziger Strand, SfM Photogrammetrie, Flut, Küstenquelle, Karst, Rijeka-Bucht