

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Igor Ružić

**DINAMIKA ŽALA U PODRUČJU
KVARNERA**

Rijeka, 2014

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Igor Ružić

**DINAMIKA ŽALA U PODRUČJU
KVARNERA**

Mentori: Dr.sc. Suzana Ilić

Prof.dr.sc. Čedomir Benac

Rijeka, 2014

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Igor Ružić

**DYNAMICS OF BEACHES IN THE
KVARNER AREA**

Mentors: Dr.sc. Suzana Ilić

Prof.dr.sc. Čedomir Benac

Rijeka, 2014

Mentori rada: dr.sc. Suzana Ilić
 prof.dr.sc. Čedomir Benac

Doktorski rad obranjen je dana _____ u Rijeci, pred
povjerenstvom u sastavu:

1. Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci,
predsjednica
2. Dr.sc. Suzana Ilić, Lancaster University, vanjski član - mentorica
3. Prof.dr.sc. Čedomir Benac, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, mentor
4. Doc.dr.sc. Dalibor Carević, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu,
vanjski član
5. Izv.prof.dr.sc. Barbara Karleuša, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci,
član

ZAHVALA

U ovom radu prikazani su rezultati provedenih istraživanja u sklopu znanstvenih projekata:

- Geološki hazard u području Kvarnera (voditelj: Prof.dr.sc. Čedomir Benac; Potpora Sveučilišta u Rijeci).
- Procjena, umanjivanje i upravljanje geološkim hazardom u području Kvarnera (voditelj: Prof.dr.sc. Čedomir Benac; broj projekta: 114-0822695-2568, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta);
- Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu (voditelj: Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić; broj projekta: 114-0982709-2549, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta)
- Istraživanje morfodinamičkih promjena žala na području Kvarnera (Hrvatska zaklada za znanost, 2012; Stipendijski program pomoću kojeg je autor rada boravio 4 mjeseca na Sveučilištu u Lancasteru).

Hvala mentorima dr.sc. Suzani Ilić i prof.dr.sc. Čedomiru Bencu na suradnji, velikoj pomoći, radu, prenesenom znanju i načinu razmišljanja prilikom izrade doktorskog rada.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Nevenki Ožanić na podršci i savjetovanju tijekom poslijediplomskog studija.

Veliko hvala dr.sc. Josipu Rubiniću, na čiji poticaj sam se počeo baviti znanošću, od diplomskog rada, poticaja za dolazak na fakultet, do suradnje na znanstvenim projektima i pomoći pri izradi doktorskog rada.

Veliku pomoć i značajan doprinos pri izradi ovog rada dali su dr.sc. Ivan Marović i Duje Kalajžić.

Zahvaljujem izv.prof.dr.sc. Barbari Karleuši na pomoći i podršci pri izradi doktorskog rada.

Istraživanja provedena na području Stare Baške pokrenuta su na inicijativu mr.sc. Draženu Hrešića, kojemu se ovim putem zahvaljujem.

Veliko hvala dr.sc. Maji Oštrić i dr.sc. Kristini Pikelj na pomoći pri izradi rada.

Zahvaljujem se DHMZu na ustupljeni meteorološkim podacima upotrijebljenim u ovom radu.

Hvala Građevinskog fakultetu Sveučilišta u Rijeci, svim kolegama s fakulteta, Zavoda za hidrotehniku i geotehniku i Katedre za hidrotehniku.

Veliko hvala Geodetskom zavodu d.o.o., Rijeka, posebno Marinku Salopeku i Goranu Lipovščaku na pruženoj tehničkoj pomoći prilikom izrade rada.

Posebno se zahvaljujem mojoj Petri na iskazanoj ljubavi, podršci i strpljenju tijekom izrade ovog rada. Veliku podršku su mi pružili sestra Iva, otac Igor i majka Marija, koja nažalost nije dočekala završetak ovog rada, pa joj ga ovom prilikom posvećujem.

SAŽETAK

Osnovni cilj ovog doktorskog rada bio je izvršiti znanstvenu analizu dinamičkih procesa na minijaturnim šljunčanim žalima u području Kvarnera. Također potrebno je dati znanstveno objašnjenje pod kojim uvjetima su žala stabilna, odnosno pod kojim uvjetima dolazi do njihove erozije.

Jedan od preduvjeta provođenja predviđenih istraživanja u sklopu ovog doktorskog rada bio je odabrati adekvatnu metodologiju za mjerenje složene trodimenzionalne topografije istraživanih minijaturnih šljunčanih žala. Odabrana je metoda *Structure-from-Motion* (SfM) fotogrametrije, odnosno primjena trodimenzionalnih oblaka točaka deriviranih iz niza fotografija zbog visoke razlučivosti i preciznosti. U radu su razvijene nove i prilagođene postojeće procedure za provođenje mjerenja i obrada morfoloških potaka minijaturnih šljunčanih žala.

Prethodno je izvršeno preliminarno istraživanja više desetaka lokacija na obalama Liburnije, otoka Cresa i Krka. Nakon odabira najpovoljnijih i dovoljno različitih lokacija žala, detaljna „*in situ*“ mjerenja obavljena su na žalu Klančac kod Brseča, žalu Uboka (južno od Mošćeničke Drage), i na obali zapadno od Stare Baške (jugoistočna obala otoka Krka).

Posebnost istraženih minijaturnih šljunčanih žala su izražene morfološke promjene izuvane djelovanjem valova na obalu. Obilježavaju ih značajne oscilacije volumena i rotacije tijela žala, u slučaju kada su izložena djelovanju valova iz različitog mjera. Značajne morfološke promjene minijaturnih žala nastaju prodorom slatkih voda kroz tijelo žala. Te promjene se očituju privremenom erozijom i brzim oporavkom žala. U provedenim istraživanjima zabilježene su oscilacije volumena sedimenta žala Klančac kod Brseča oko 30%, te žala Uboka oko 15%. Zabilježene su i značajne promjene oblika poprečnih presjeka žala.

Ustanovljeno je različito hidrodinamičko ponašanje tijela žala Uboka i Klančac. Nakon olujnog vjetra iz sjeveroistočnog smjera na žali Uboka dolazi do potpunog oporavka tijela žala nakon erozije, prethodno prouzročene površinskim i podzemnim otjecanjem slatkih voda. Na žalu Klančac zabilježena je značajna erozija žala nakon olujnog sjeveroistočnog vjetra. Razlog suprotnoj reakciji dvaju žala je u različitoj zaštićenosti i orijentaciji uvala žala, izloženosti valovima i širini žala. Erozija žala Klančac nastaje

brzo, djelovanjem najvećih valova sjeveroistočnog i jugoistočnog smjera, dok se oporavak žala sporo odvija tijekom umjerenih vjetrova iz južnog kvadranta.

Istraživano područje pokraj Stare Baške karakteriziraju međusobno povezani procesi degradacije klifova i proširenja žala. U razdoblju od 1966 i 2004 zabilježeno je povlačenje klifova do 5 m, a obalna linja je napredovala do 7 m. Obalni klifovi izloženi su marinskoj eroziji. Na nožici klifa došlo je do formiranja potkapina klifa, koje determiniraju njihovu stabilnost. U radu je model stabilnosti obalnih klifova jednostavnih poprečnih presjeka zasnovan na konzolnoj gredi prilagođen klifovima složenih poprečnih presjeka snimljenih pomoću SfM fotogrametrije (Ružić i dr. 2014). U radu se pokazala važnost tijela žala u zaštiti klifova od marinske erozije.

KLJUČNE RIJEČI: Minijaturno šljunčano žalo, Kvarner, Structure-from-Motion fotogrametrija, dinamika žala, rotacija žala, obalni klif, erozija, akumulacija, SWAN, Aladin, značajna visina vala, istjecanje, stabilnost žala

ABSTRACT

The main aim of this PhD was to analyze the processes and dynamics on pocket gravel beaches in the Kvarner area of the Northern Adriatic. In particular, the focus was to determine which conditions lead to stability and which lead to erosion of these beaches.

One of the main pre-requisites of this work was to find a suitable method for measurements of the complex three-dimensional topography of pocket gravel beaches. A method based on the Structure-from-Motion photogrammetry, which uses 3D cloud of points derived from a series of photographs, was found to be the most suitable method due to its high resolution and precision. New procedures were developed and some existing procedures were adapted in order to take measurements and process the data of the pocket beach morphology.

A choice of the most suitable locations to test the new method was made on the basis of preliminary investigations at about ten different beaches on the Liburnia coast and the islands of Cres and Krk. The detailed 'in situ' measurements were taken on the Klančac beach near Brseč, Uboka beach (south of Mošćenička Draga) and on the coast west of Stara Baška (on the southeastern coast of island Krk).

The distinct feature of these gravel beaches is that the changes in beach morphology are caused by waves. This is demonstrated by the significant oscillation of beach volumes and beach rotation due to successive waves arriving from different directions. Significant changes in beach morphology are found also to be caused by a breach of freshwater streams through the main body of a beach. These changes are expressed in temporarily erosion and quick recovery. The measured oscillations in beach volumes were 30% at Klančac near Brseč and about 15% at Uboka beach. These effects are also observed in the beach profiles.

The hydrodynamic behaviour of the beaches at Uboka and Klančac are different. Waves caused by southeasterly wind during storms help the recovery of the beach at Uboka, which was breached by surface and subsurface freshwater. However waves from the same direction cause significant erosion at the beach at Klančac. The reason for these two different responses in the morphology of these two micro-locations are their orientation towards prevailing winds and waves and the breaching due to freshwater and in grain size. Erosion of the beach at Klančac due to highest

northeasterly and southeasterly waves is rapid, while recovery during modest southerly waves takes much longer time.

The area studied near Stara Baška is characterised by the interaction between the cliff degradation and the extension of the beach. In the period between 1966 and 2004, the cliffs retreated about 5m while the shoreline advanced 7m. The cliffs are exposed to marine erosion, leading to the formation of wave notches, which in turn affect the cliff stability. In this thesis, a cantilever model for the stability of cliffs was developed using a cross-section geometry developed from SfM photogrammetry (Ružić et al. 2014). This showed also importance of the beach in the protection of cliffs from marine erosion.

KEY WORDS: Gravel pocket beach, Kvarner, Structure-from-Motion photogrammetry, beach dynamics, beach rotation, coastal cliff, erosion, accumulation, SWAN, Aladin, significant wave height, discharge, beach stability

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja.....	1
1.2. Opravdanost istraživanja	3
1.3. Pozadina istraživanja.....	4
1.4. Struktura doktorskog rada	4
1.5. Metodologija	6
1.6. Opis istraživanja.....	7
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	11
2.1. Općenito o šljunčanim žalima i osnove hidrodinamika žala.....	11
2.2. Geomorfološke promjene na stjenovitim obalama.....	19
2.3. Istraživanja na Kvarneru, Mediteranu i sličnim obalama	20
2.4. Mjerenja topografije žala	21
3. PRIRODNE ZNAČAJKE KVARNERA.....	23
3.1. Reljef i geološka građa.....	23
3.2. Klimatske posebnosti	27
3.3. Oceanografske značajke	28
4. METODOLOGIJA.....	32
4.1. Primjena fotogrametrije i digitalnog modela terena (DMT).....	32
4.1.1. Digitalni model terena (DMT) i trodimenzionalni oblak točaka.....	32
4.1.2. Generiranje oblaka točaka iz niza fotografija	33
4.1.3. Indirektna metoda georeferenciranja trodimenzionalnih oblaka točaka	34
4.1.4. Automatske metode georeferenciranja oblaka točaka.....	35
4.2. Numeričke simulacije valovanja	35
5. PRILAGODBA I RAZVOJ PROCEDURA ZA KORIŠTENJE STRUCTURE-FROM-MOTION (SfM) FOTOGRAMETRIJE NA MINIJATURNIM ŠLJUNČANIM ŽALIMA..	38
5.1. Dijagram toka snimanja minijaturnog žala pomoću SfM fotogrametrije	39
5.2. Primarna obrada oblaka točaka	43
5.3. Georeferenciranje 3D oblaka točaka	43
5.4. Verifikacija georeferenciranih 3D oblaka točaka i preciznost modela	47
5.4.1. Verifikacija referentnog 3D oblaka točaka	48
5.4.2. Verifikacija 3D oblaka točaka uzastopnih mjerenja žala	54
5.5. Primjena 3D oblaka točaka i digitalnog elevacijskog modela (DEM).....	57
5.6. Zaključak.....	63
6. KRATKOTRAJNE MORFOLOŠKE PROMJENE MINIJATURNOG ŽALA IZAZVANE DJELOVANJEM VALOVA, ŽALO KLANČAC POKRAJ BRSEČA.....	65
6.1. Uvod.....	65

6.2. Korištena metodologija	66
6.3. Rezultati	73
6.3.1. Djelovanje valova.....	73
6.3.2. Amplitude zabilježenih morfoloških promjena žala	73
6.3.3. Integracija volumena žala.....	77
6.3.4. Detaljan opis morfoloških promjena žala između uzastopnih mjerenja	81
6.3.5. Pregled morfoloških promjena žala.....	102
6.4. Diskusija.....	105
6.5. Zaključak i buduća istraživanja žala klančac	108
7. KRATKOTRAJNE MORFOLOŠKE PROMJENE ŽALA IZAZVANE DJELOVANJEM OTJECANJA SLATKIH VODA I VALOVA, ŽALO UBOKA JUGOZAPADNO OD MOŠĆENIČKE DRAGE	110
7.1. Uvod.....	110
7.2. Metodologija	112
7.3. Rezultati	113
7.3.1. Promjene visina žala.....	114
7.3.2. Promjene volumena žala	115
7.3.3. Detaljan opis karakterističnih morfoloških promjene žala.....	118
7.3.4. Oporavak žala – detaljan opis	126
7.4. Diskusija.....	130
7.5. Zaključak i buduća istraživanja u uvali uboka	133
8. EVOLUCIJA STJENOVITE OBALE NA LOKACIJI ŠKRILA KOD STARE BAŠKE 135	
8.1. Uvod.....	135
8.2. Rezultati	139
8.2.1. Morfološke značajke obale.....	139
8.3.2. Marinska erozija.....	141
8.2.3. Analiza stabilnosti obalnog klifa.....	147
8.3. Diskusija.....	150
8.4. Zaključak i buduća istraživanja obale kod stare baške	151
9. ZAKLJUČAK	153
LITERATURA.....	156
PRILOG 1	172
POPIS TABLICA.....	174
POPIS SLIKA	175
ŽIVOTOPIS	179

1. UVOD

Na Kvarneru prevladavaju minijaturna šljunkovita žala, dužine od deset do preko tisuću metara. Najveći broj žala je dužine manje od stotinu metara. Ona imaju važnu krajobraznu, ekološku i ekonomsku vrijednost. Minijaturna žala mogu biti prirodna i umjetna. Umjetna žala formiraju se zbog proširenja kupališnih prostora i obrane obale od štetnog djelovanja mora, odnosno erozije i poplava. Prirodna žala najčešće su vezana uz stjenovite obale, koje prevladavaju na području Kvarnera, te sačinjavaju oko 70% svjetskih obala. Takav tip obala često je izložen intenzivnom djelovanju valova zbog specifičnog oblika podmorja. Uvale i rtovi nastaju djelovanjem valova, tokova slatkih voda, kao posljedica geološke građe, promjene morske razine itd. Žala smještena u uvalama i omeđena rtovima definirana su kao minijaturna žala čija izmjena sedimenta s obližnjim podmorjem je zanemariva. Engleski nazivi za minijaturna žala su: *curved, embayed, hooked, pocket i headli-bay beaches* (Ojeda i Guillén, 2008). Hidrodinamika minijaturnih šljunčanih žala znatno se razlikuje od dobro istražene hidrodinamike dugačkih pješčanih žala. Morfologija minijaturnog žala ograničava uzduž obalni (*long-shore*) transport sedimenta.

1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Osnovni cilj ovog istraživanja je analiza ponašanja i mehanizma dinamike minijaturnih šljunčanih žala na području Kvarnera, te razjasniti pod kojim uvjetima su žala stabilna, a pod kojim uvjetima dolazi do njihove erozije.

Osim osnovnog cilja određeni su i slijedeći ciljevi:

- **Odabir metodologije mjerenja morfologije minijaturnih šljunčanih žala**

Jedan od preduvjeta provođenja istraživanja u sklopu ovog rada je odabir adekvatne metodologije za mjerenje složene topografije istraživanih minijaturnih šljunčanih žala. Odabir metodologije određen je ograničenim financijskim i ljudskim resursima. Istraživana žala nemaju pristup vozilima zbog čega oprema mora biti jednostavna i lagana za dopremanje na mjesto istraživanja.

- **Prilagodba i razvoj procedura za provođenje mjerenja minijaturnih šljunčanih žala**

Primjenu odabrane metodologije potrebno je prilagoditi specifičnostima istraživanih minijturnih žala. Razvijen je niz procedura za provođenje mjerenja i obrade podataka koje su prilagođene potrebama istraživanja.

- **Analiza morfoloških promjena minijturnog žala izazvanih djelovanjem vjetrovnih valova**

Promjene minijturnog žala izazvane djelovanjem vjetrovnih valova istražene su analizom promjena minijturnog žala i primjenom numeričkih simulacija valova. Istraženi su uvjeti se pod kojima dolazi do povećanja i smanjenja (oscilacija) volumena žala, transporta sedimenta uzduž (*long-shore*) i okomito (*cross-shore*) na obalu.

- **Analiza morfoloških promjena minijturnih žala izazvana prodorom slatkih voda**

Analizirane su kratkotrajne morfološke promjene minijturnog šljunčanog žala nastale koncentriranim istjecanjem slatkih voda (bujičnih i/ili podzemnih) te je ustanovljen njihov utjecaj na dinamiku promjena žala u kombinaciji s djelovanjem valova.

- **Analiza srednjoročnih promjena stjenovite obale sastavljene od žala i klifova**

U radu su analizirane srednjoročne promjene stjenovite obale sastavljene od žala i klifova. Istražen je utjecaj degradacije klifova na površinu žala, te je analiziran utjecaj žala na intenzitet degradacije klifova.

Ovo znanstveno istraživanje rezultiralo je će novim spoznajama o geodinamici minijturnih žala, iako su provedena i publicirana istraživanja rijetka, mogu se postaviti polazne hipoteze:

- Koncentrirani tok slatkih voda na žalima bez značajnog antropogenog utjecaja, uzrokuje privremenu, a ne trajnu eroziju žala.
- Minijturna žala su kratkoročno stabilni sustavi u pogledu količine sedimenta u tijelu.
- Rotacija minijturnih žala isključivo je povezana s duž-obalnim transportom sedimenta, bez značajnih oscilacija njihovog volumena.

U ovom radu provedena su znanstvena istraživanja područja koje je nedovoljno istraženo, istraživanjima su prethodila slijedeća istraživačka pitanja:

- Koje su kratkotrajne promjene morfologije šljunčanih žala i što ih uzrokuje?
- Dolazi li do povećanja ili smanjenja površine i količine sedimenta žala, te u kojem vremenskom rasponu?
- Utječe li značajno erozija klifova na formiranje i/ili povećanja minijaturnih šljunčanih žala na području Kvarnera?

1.2. Opravdanost istraživanja

Žala imaju veliku krajobraznu, ekološku i ekonomsku vrijednost, štite obalu od poplava i erozija, a često se koriste za rekreaciju i boravak. Žala na području Kvarnera čine okosnicu turističke ponude. Važnost turizma za gospodarstvo Republike Hrvatske je izrazito velika, o tome svjedoče podaci o ukupnim učincima turizma (izravnim i neizravnim), koji su prema procjenama turističke potrošnje u 2005. godini imali udjel od 14,7% u ukupnoj bruto dodanoj vrijednosti cijelog gospodarstva (Šutalo i dr., 2011). Vlada Republike Hrvatske (2013) donijela je: STRATEGIJU RAZVOJA TURIZMA REPUBLIKE HRVATSKE DO 2020 u kojoj se posebno naglašava uređenje plaža, koje su temelj turističke destinacijske infrastrukture. Jedna od prioritarnih mjera strategije je uspostava sustavnog, promišljenog i održivog pristupa uređenju i upravljanju plažama. Do sada sustavno uređenje i upravljanje plaža temeljilo se na turističkoj ponudi i tome podređenoj izgradnji infrastrukture, dok morfološki parametri žala nisu uzeti u obzir, osim rijetkih izuzetaka.

Posljednjih dvadeset godina intenzivno se pokušavaju proširiti postojeća i stvoriti nova žala. Pri tim pokušajima često nastaju štete nasipavanjem mora neadekvatnim materijalom i/ili pokušajima stvaranja žala na hidrodinamički nepovoljnim pozicijama. U takvim slučajevima mogu nastati značajne materijalne štete, krajobrazne promjene kao i nepovoljan učinak na biocenuznu morskog dna.

1.3. Pozadina istraživanja

Istraživanja na ovoj disertaciji provedena su u sklopu znanstvenih projekata: Procjena, umanjivanje i upravljanje geološkim hazardom u području Kvarnera (voditelj: Prof.dr.sc. Čedomir Benac; broj projekta: 114-0822695-2568, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta); Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu (voditelj: Prof.dr.sc. Nevenka Ožanić; broj projekta: 114-0982709-2549, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta) i Geološki hazard u području Kvarnera (voditelj: Prof.dr.sc. Čedomir Benac; Potpora Sveučilišta u Rijeci). U sklopu izrade rada autor je boravio na Sveučilištu u Lancasteru kod Dr.sc. Suzane Ilić u sklopu stipendijskog programa: Istraživanje morfodinamičkih promjena žala na području Kvarnera (Hrvatska zaklada za znanost, 2012).

Istraživanja žala i priobalja je znanstveno i stručno slabo obrađeno na teritoriju Republike Hrvatske. Nasuprot tomu, posljednjih dvadesetak godina došlo je do ubrzane urbanizacije obalnog prostora. Glavna ekonomska grana obalne hrvatske postao je turizam koji se temelji na ponudi vezanoj uz kupališta, odnosno žala. Nastao je veliki nerazmjer između znanja o obalnim procesima i korištenja obalnog prostora, što je dovelo do brojnih skupih i po okoliš pogubnih zahvata u obalni prostor. Većina tih zahvata je pokušaj stvaranja novih umjetnih ili proširenja postojećih žala.

1.4. Struktura doktorskog rada

Struktura doktorskog rada oblikovana je poštujući preporuke i pravila visokoškolske ustanove (PRAVILNIK O IZRADI I OPREMANJU DOKTORSKIH RADOVA SVEUČILIŠTA U RIJECI). Za sve stručne pojmove autor je nastojao koristiti hrvatsko nazivlje, iako prijevod sa stranog jezika često nije moguć. Zbog toga se uz prijevode pojedinih pojmova ostavljalo i nazivlje na engleskom jeziku u zagradama označeno kurzivom (*engleski naziv*).

Rad sadrži naslovni list, sažetak, sadržaj, glavni tekst, popis literature, priloge, popis slika, popis tablica, popis kratica i životopis autora.

Glavni tekst sastavljen je od uvoda, pregleda dosadašnjih istraživanja, prirodnih značajki Kvarnera, metodologije, rezultata koji su podijeljeni u četiri poglavlja i zaključnih razmatranja.

Poglavlje 2: Pregled dosadašnjih istraživanja

U poglavlju 2 prikazane su osnovne teorijske postavke hidrodinamike šljunčanih žala s naglaskom na hidrodinamiku minijturnih šljunčanih žala. Dat je pregled provedenih istraživanja na području Kvarnera, Hrvatske, Mediterana i drugih morfološki sličnih obala. Nadalje se prikazuju osnovne teoretske postavke i provedena istraživanja geometrije žala. Posljednji dio poglavlja daje pregled mjerenja topografije žala.

Poglavlje 3: Prirodne značajke Kvarnera

U trećem poglavlju opisane su prirodne značajke područja istraživanja – Kvarnera, i to reljef i geološka građa, klimatološke osobitosti i oceanografske značajke.

Poglavlje 4: Metodologija

Četvrto poglavlje prikazuje korištenu metodologiju u provedenim istraživanjima. Prvi dio opisuje teoretske osnove fotogrametrije, Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije, trodimenzionalnog oblaka točaka i digitalnog modela terena (DMT). U drugom dijelu prikazane su osnovne teoretske postavke korištenih numeričkih simulacija valovanja.

Poglavlje 5: Prilagodba i razvoj procedura za korištenje Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije na minijturnim šljunčanim žalima.

U prvom dijelu poglavlja opisana je razvijena procedura provođenja mjerenja topografije minijturnih šljunčanih žala iz niza fotografija pomoću SfM fotogrametrije. Nakon toga slijedi detaljan opis svakog koraka procedure mjerenja, od snimanja žala do georeferenciranja i verifikacije trodimenzionalnih modela žala. Na kraju poglavlja opisan je način primjene trodimenzionalnih oblaka točaka u istraživanjima minijturnih šljunčanih žala.

Poglavlje 6: Kratkotrajne morfološke promjene minijturnog žala izazvane djelovanjem valova, žalo Klančac pokraj Brseča

Poglavlje 6 opisuje rezultate istraživanja kratkotrajnih morfoloških promjena žala Klančac kraj Brseča koje su izazvane valovima iz jugoistočnog - SE (jugo) i sjeveroistočnog - NE (bura) smjera. Provedeno je 9 uzastopnih mjerenja žala od listopada do prosinca 2013. godine. U rezultatima su opisana djelovanja vjetra pomoću numeričkih simulacija, amplitude zabilježenih morfoloških promjena žala, oscilacije

volumena žala, detaljan opis morfoloških promjena žala između provedenih mjerenja i dan je sistematiziran pregled zabilježenih morfoloških promjena. Opisane su prednosti, nedostaci i moguća poboljšanja provedenih istraživanja.

Poglavlje 7: Kratkotrajne morfološke promjene žala izazvane djelovanjem otjecanja slatkih voda i valova, žalo Uboka pokraj Mošćeničke Drage

U poglavlju 7 prikazani su rezultati istraživanja morfoloških promjena minijaturnog žala u uvali Uboka, koje su uvjetovane istjecanjem slatkih voda i djelovanjem valova. Morfološke promjene žala praćene su kroz 11 povremenih mjerenja topografije žala pomoću SfM fotogrametrije od siječnja do travnja 2012 godine. Opisane su promjene visina i volumena žala, nakon čega je dat detaljan opis definiranih specifičnih morfoloških promjena žala.

Poglavlje 8: Evolucija stjenovite obale na području Stare Baške

U poglavlju 8 opisani su rezultati istraživanja nastalih promjena stjenovite obale na području Stare Baške. Prikazane su promjene istraživane obale koje uključuju povlačenja klifova i proširenja žala u razdoblju od 1966. do 2004. godine. Opisani su rezultati istraživanja geomehaničkih karakteristika materijala klifova koji su zasnovani na prilagodbi postojećeg modela stabilnosti obalnog klifa. Analiziran je utjecaj marine erozije na promjene istražene obale s naglaskom na utjecaj površine žala na umanjenje erozije klifova.

Poglavlje 9: Zaključak

U poglavlju 9 dani su zaključci provedenih istraživanja o korištenoj metodologiji, morfološkim promjenama minijaturnih žala izazvanih djelovanjem valova i istjecanja slatkih voda, te o međusobnoj ovisnosti obalnih klifova i žala.

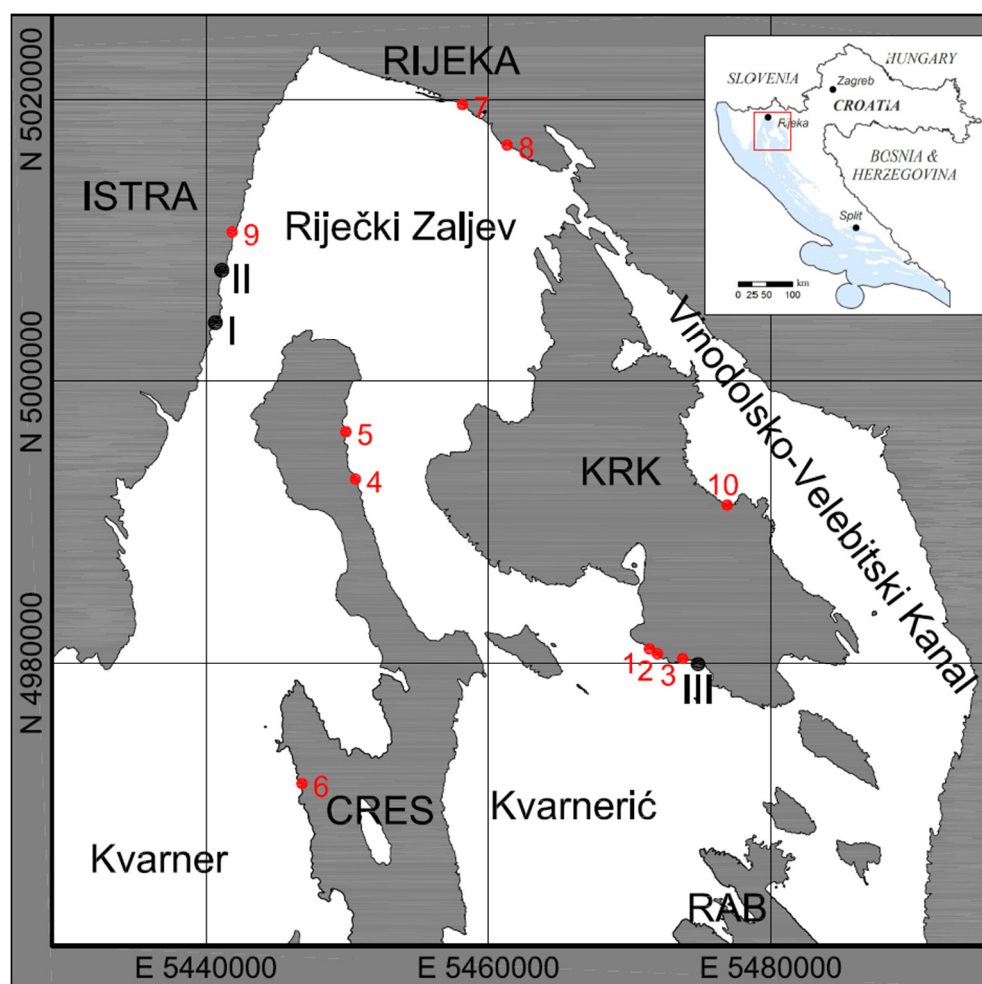
1.5. Metodologija

U ovom radu korišteni su trodimenzionalni oblaci točkica derivirani iz niza fotografija i numeričke simulacije valova bazirane na polju vjetra. Svi podaci obrađeni su originalnim procedurama, korištenjem programskog paketa MATLAB. U radu su korištene i Autodeskovi paketi Autocad i Map3D kao i program CloudCompare. U sklopu ove disertacije veliki naglasak dan je na primjeni trodimenzionalnih oblaka za

istraživanja morfoloških promjena minijturnih žala. Razvijene su i detaljno opisane „korak po korak“ procedure mjerenja minijturnih šljunčanih žala korištenjem SfM fotogrametrije. Numerički model valovanja SWN korišten je za numeričke simulacije valovanja.

1.6. Opis istraživanja

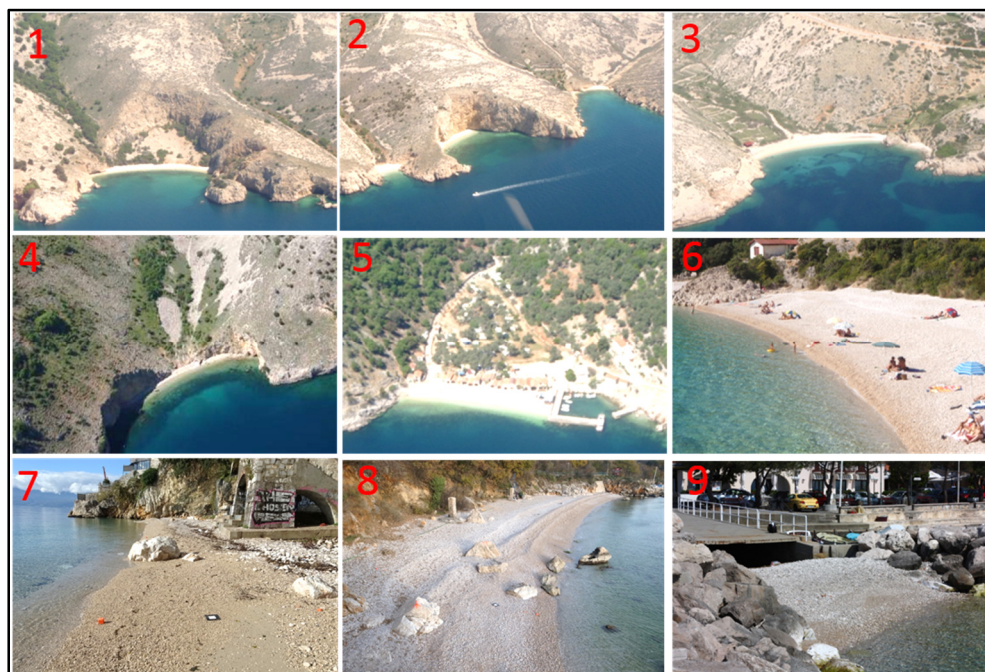
U ovom radu detaljno su istražena žala Klančac kod Brseča, Uboka južno od Mošćeničke Drage i Škrila zapadno od Stare Baške (jugoistočna obala otoka Krka) (slika 1.1.).



Slika 1.1. Pregledna krata provedenih istraživanja. I - Klančac (kraj Brseča); II - Uboka (južno od Mošćeničke Drage), III – Škrile (Stara Baška). 1-9 - karakteristična žala istraživanog područja (slika 1.2.); 10 - Potovšćica (Faivre i dr., 2011)

Odabir detaljno istraženih žala zasnovan je na terenskom obilasku nekoliko desetaka lokacija na području Kvarnera (slika 1.2.). Izabrane lokacije su reprezentativna žala istraživanog područja, različitih morfo-dinamičkih karakteristika, povoljna za provođenje detaljnih mjerenja.

Faivre i dr. (2011) detaljno opisuju morfološke promjene žala Potovščica pokraj Vrbnika. James i dr. (2013) istražuju žalo Uboka, Ružić i dr. (2013) istražuju žalo Mošćenička Draga. Ružić i dr. (2014 a i b) objavljuju rezultate istraživanja na lokalitetu Škrile.



Slika 1.2. Karakteristična žala na području Kvarnera.

Žala prikazana na slici 1.2. formirana su na ušćima bujičnih vodotoka (1,3,5,6 i 9), u podnožju klifova (2, 4 i 7), u podnožju strmih litica (1,2,4,7,9), te u naseljenim područjima pod značajnim antropogenim utjecajem (5, 6, 7, 8, 9).



Slika 1.3. Žalo Klančac pokraj Brseča. 1 – Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka; 2 – Špilja; 3 - Šljunkovito žalo

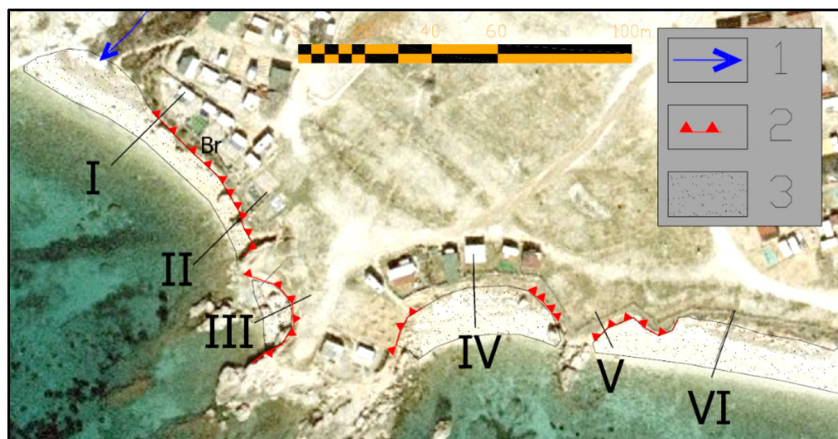
Na slici 1.3. prikazano je detaljno istraženo žalo Klančac pokraj Brseča. Žalo Klančac dugačko je 37 m, širina mu varira od 0 m do 20 m. Veličina zrna šljunka na površini variraju od 5 do 45 mm. Na zapadnom dijelu žala je ušće bujičnog vodotoka, dok se na istočnom dijelu žala nalazi spilja.



Slika 1.4. Žalo Uboka južno od Mošćeničke Drage. 1 – Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka i izvorskih voda; 2 – Povremeno izviranje voda; 3 - Šljunkovito žalo

Na slici 1.4. prikazano je žalo Uboka, južno od Mošćeničke Drage. Žalo Uboka dugačko je 70 m, širina žala varira od 10 do 20 m. Veličina zrna sedimenta žala na

površini varira od 5 do 50 mm. Na središnjem dijelu žala nalazi se ušće bujičnog vodotoka u koje utječu i povremeni krški izvori. Krški izvori se javljaju na više mjesta duž žala (slika 1.4.).



Slika 1.5. Obala na lokaciji Škrila zapadno od Stare Baške. 1 - Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka; 2 – obalni klifovi; 3 - Šljunkovito žalo

Na slici 1.4. prikazana je istražena obala na lokaciji Škrila zapadno od Stare Baške. Na lokaciji Škrila zapadno od Stare Baške istražena je stjenovita obala dužine 500 m, na kojoj se nalaze obalni klifovi i minijaturna žala. Na zapadnom dijelu istraživanog područja je ušće bujičnog vodotoka.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1. Općenito o šljunčanim žalima i osnove hidrodinamika žala

Pod pojmom šljunčanih žala (*gravel beach*) podrazumijevaju se žala na kojima prevladava šljunkoviti sediment. Šljunak je definiran po standardiziranoj Udden–Wentworth klasifikaciji kao sediment promjera od 2 do 64 mm, a ponekad šljunčana žala mogu sadržavati zrna veličine do 265 mm (oblutak). Nevezani sediment se zbog svojih povoljnih hidromehaničkih svojstava sve više primjenjuje kao oblik zaštite obale od štetnog djelovanja valova, kao i za izgradnju umjetnih žala (Dean, 1983; Komar 1998; VanWellen i dr. 2000; Mason i Coates, 2001; Dean i Dalrymple, 2004).

Dominantni obalni procesi šljunčanih žala nedovoljno su istraženi (Buscombe i Masselink, 2006). Većina dosadašnjih istraživanja provedena je na pješčanim žalima, zbog veće zastupljenosti i češćih problema sa erozijom. Laboratorijska i terenska mjerenja šljunčanih žala izrazito su složena, a ponekad i neizvediva. To objašnjava ograničeni broj znanstvenih publikacija i naizgled manji interes istraživača za problematiku šljunčanih žala (Orford i dr., 2002; Horn i Holmes, 2003; Pontee i dr., 2004; Pedrozo-Acuna i dr., 2006; Pranzini i dr., 2013). Razvoj novih tehnologija kao što su optička mjerenja, noviji tipovi kamera i fotoaparata, akustični uređaji i sl. omogućili su niz laboratorijskih i terenskih istraživanja, te razvoj novih modela ponašanja šljunčanih žala (Blewett i dr., 2000; Holmes i dr., 2002; Austin i Masselink, 2006; Almeida i dr., 2013). Prijašnja istraživanja žala građenih od krupnozrnastog sedimenta većinom su zasnovana na srednjoročnim i dugoročnim morfološkim promjenama žala (Carter i Orford, 1984, 1993; McKay i Terich, 1992; Forbes i dr., 1995, 1997; Orford i dr., 1995, 2002; Shulmeister i Kirk, 1997; Jennings i dr., 1998). Manji broj, većinom recentnih, istraživanja vezan je uz kratkotrajne promjene šljunčanih žala (Ojeda i Guillén, 2008; Ivamy i Kench, 2006; Austin i Masselink, 2006; Curtiss i dr., 2009; Ruiz de Alegria-Arzaburu i Masselink, 2010; Poate i dr., 2013). Poznavanje kratkotrajnog ponašanja i promjena žala neophodno je za efikasno upravljanje postojećim i projektiranje novih žala (Mason i Coates, 2001).

Važan parametar upravljanja žalima je budžet sedimenta, koji se temelji na usporedbi donosa i gubitaka sedimenta žala (Bowen i Inman, 1966; Komar, 1998; Masselink i

Hughes, 2003; Rosati, 2005). Gubici sedimenta šljunčanih žala mogu biti izazvani nepovoljnim hidro-dinamičkim uvjetima, odnosno djelovanjem valova, morskih struja, razine podzemnih voda, utjecajem objekata, istjecanja voda itd. Abrazija sedimenta šljunčanih žala može sačinjavati značajan udio u ukupnom budžetu sedimenta žala. Intenzitet abrazije sedimenta ovisi o lokalnim uvjetima kao što su djelovanju valova, vrsti i obliku sedimenta, udjel žala pod djelovanjem valova sl. (Matthews, 1983; Hemmingsen, 2001; Dornbusch i dr., 2002). Teoretski izraz za procjenu abrazije šljunčanih sedimenta nije definiran. Potreban je veći broj istraživanja zasnovanih na „*in-situ*“ mjerenjima da bi se abrazija mogle uvrstiti u budžet sedimenta (Stephenson i Brier, 2003).

Šljunčana žala definirana su kao reflektivni morfološki tip žala (Carter i Orford, 1984 i 1993; Jennings i Shulmeister, 2002). No, refleksija valova može biti značajno umanjena zbog poroziteta žala. Powell (1990) je izmjerio izrazito niski koeficijent refleksije šljunčanog žala od 10%. Iako nedovoljno istražena, pretpostavlja se da porozna berma lica šljunčanog žala značajno utječe na refleksiju valova (Buscombe i Masselink, 2006).

Lom valova šljunčanih žala često se odvija u veoma uskoj zoni, neposredno ispred samog lica žala, zbog strmosti obale i lica žala (Baldock i dr., 1997; Baldock i Holmes, 1999). Na slici 2.1. prikazana je vremenska serija loma valova iz smjera juga na žalu Klančac kod Brseča.



Slika 2.1. Uska zona loma valova iz smjera SE (jugo) na šljunčanom žalu Klančac kod Brseča 26. i 27. 12.2013. a: neposredno prije loma vala; b: lom vala; c: doseg loma vala; d: žalo dan poslije tijekom umjerenih valova

Zona loma valova (*surf-zone*) žala Klančac je relativno uska, valovi se lome neposredno ispred obalne linije, udar loma vala odvija se na samom licu žala (slika 2.1.). Uska zona loma valova uzrokuje prostornu koncentraciju energije disipacije valova zbog čega dolazi do prekoračenja kritičnih vrijednosti pomaka šljunčanih sedimenta (Carter i Orford, 1993). Nagib lica žala najstrmiji je u zoni loma najvećih valova. Strmost lica žala se dodatno povećava induciranim transportom i akumulacijom

sedimenta na licu žala (Pedrozo-Acuna i dr., 2006). Važan čimbenik hidrodinamike svoša šljunčanih žala je asimetrija poroznog toka koja nastaje različitim modalitetima tečenja između faza uzdizanja i spuštanja vala (*uprush i backwash*). Taj proces naziva se asimetrija svoša (Masselink i Pattiaratchi, 1998). Svoš je turbulentni tok koji se uspinje po površini tijela žala nakon loma valova na tijelu žala.

Migracije priobalnih sedimenta većinom su generirane u zoni surfa valova gdje dolazi do loma valova i strujanja induciranih lomom valova (Kraus i dr., 1982). Hidrodinamika šljunčanih žala u zoni svoša incidentnih valova ima značajan utjecaj na migracije sedimenta i morfološke promjene šljunkovitih žala. Hidrodinamika u zoni svoša nije u potpunosti razjašnjena (Bagnold, 1954; Inman i dr., 1966; Clifton, 1969; Sallenger, 1979; Masselink i Li, 2001; Austin i Masselink, 2005). Utjecaj razine i istjecanja podzemnih voda na šljunčana žala je značajan, ali slabo istražen (Austin i Masselink, 2005). Berma žala se pomiče prema moru u slučaju djelovanja valova u kombinaciji s povećanom razinom podzemnih voda, dok se kod smanjenja razina podzemnih voda pomiče prema obali (Lee i dr., 2007).

Uzduž-obalna migracije sedimenta šljunčanih žala u zoni svoša, nazivaju se na engleskom '*grazing*'. Van Wellen i dr. (2000) smatraju da se 50 do 70% ukupnog duž-obalnog (*long-shore*) transporta sedimenta šljunčanih žala odvija u zoni svoša, te da hidrodinamički uvjeti u toj zoni imaju značajan utjecaj na budžet sedimenta tijela žala. Porozitet tijela žala važan je parametar hidrodinamike šljunčanih žala, odnosno režima inter-granularnog toka. Propusnost i hidraulička vodljivost šljunčanih sedimenta je visoka i ovisi o njihovim karakteristikama i prostornoj distribuciji (Horn i dr., 2003; Buscombe i Masselink, 2006). Zbog toga hidraulički parametri pojedinog žala mogu značajno prostorno i vremenski varirati. Numeričke simulacije ponašanja šljunčanih žala složene su zbog burnog režima tečenja među granulama šljunka, kada ne vrijedi Darcy-ev zakon (Holmes i dr., 2002; Horn i dr., 2003). Djelovanjem valova na šljunčano žalo dolazi i do stvaranja zračnih džepova (Horn i dr., 2003). Hidraulički modeli često previše pojednostavljuju njihovu složenu hidrodinamiku (Horn, 2002; Pedrozo-Acuna i dr., 2006).

Formiranje berme šljunčanog žala ovisi o nizu međusobno povezanih procesa kao što su: transport sedimenta prema obali (*cross-shore*), režim morskih mijena, infiltracija tijekom uzdizanja valova (*runup*) i sl. Prva istraživanja povezuju visinu berme s visinom

incidentnih valova (Bagnold, 1940; Bascom, 1953; King, 1972). Kasnija istraživanja utvrđuju vezu visine berme sa dužinom (periodom) incidentnih valova (Sunamura, 1975; Takeda i Sunamura, 1982). Najviše berme žala formiraju se interakcijom djelovanja valova i plime kada dolazi do prebacivanja valova preko (*overtopping*) berme. Visoki valovi tijekom plime formiraju najvišu bermu, no najviši valovi izazivaju eroziju lica žala a time i smanjuju visinu berme, taj proces je poznat kao „paradoks visine berme“ (*berm-height paradox*) (Bascom, 1953; Strahler, 1966; Komar, 1998; Hughes i Turner, 1999; Austin i Masselink, 2006; Weir i dr., 2006). Poprečni presjeci šljunčanih žala dijele se na profile jednolikog nagiba i profile nejednolikog nagiba s jednom ili više bermi (Carter i Orford, 1993).

Weir (2006) je istražila ciklus formiranja i erozije berme nakon probijanja žala lagune. Zaključuje da se ulaz u lagunu brzo zatvara formiranjem berme, a da je migracija sedimenta koji tvore bermu inducirana kombinacijom djelovanja plimnih amplituda i visokih valova. Vertikalni prirast berme je brz, dok se njezin horizontalni prirast odvija sporije. On ovisi o formiranju nižih bermi koje se formiraju tijekom manje plima i djelovanja umjerenih valova na prednjem licu žala. Duncan (1964) je uočio da se tijekom formiranja berme veća zrna sedimenta žala više pomiču prema obali, te formiraju bermu, dok manja zrna ostaju na nižim kotama. On to pripisuje manjoj snazi ekfiltracije toka na licu žala u fazi povlačenja vala (*rundown*). Takva distribucija sedimenta šljunčanih žala potvrđena je i kasnijim istraživanjima (Orford i dr., 1995; Everts i dr., 2002; Osborne, 2005).

Mnoge studije potvrdile su cikličan i/ili sezonski modalitet promjene morfologije šljunčanih žala. Erozija žala nastaje tijekom djelovanja olujnih valova, akumulacija sedimenta (oporavak žala) javlja se tijekom djelovanja valova mrtvog mora (*swell condition*) i umjerenijeg djelovanja valova (Caldwell i Williams, 1985; 1986). Dio objavljenih istraživanja zasnovan je na praćenju morfoloških promjena žala (Caldwell i Williams, 1985; Stapleton i dr., 1999), dok dio studija povezuje promjene šljunčanih žala s parametrima incidentnih valova (Lewis, 1931; Sherman, 1991; Coates i Hawkes, 1998; Lorang i dr., 1999) bez provedenih mjerenja njihove hidrodinamike.

Važan, a do sada zanemaren, utjecaj na pokretanje zrna veličine šljunka u tijelu žala ima način loma valova na samom tijelu žala (Pedrozo-Acuña i dr., 2007; 2008). Lomom vala na tijelu žala induciraju se veliki pritisci između poram zrna žala koji poništavaju

njihovu međusobnu povezanost, odnosno otpornost prema posmičnim pomacima (Youd, 1977). Zbog toga dolazi do pomicanja veće količine zrna žala prema obali, zoni djelovanja *svoša*, gdje se pomiču prema višim kotama prednjeg lica žala. Slika 2.1. prikazuje intenzitet loma valova i površine zahvaćene *svošom* žala Klančac.

Zrna u tijelu šljunčanih žala pomiču se kotrljanjem, klizanjem i skakutanjem, pomaci ovise o veličini i obliku sedimenta, heterogenosti lica žala, te o hidrodinamičkim uvjetima. Prostorni raspored sedimenta žala ovisi o načinu transporta sedimenta, te značajno utječe na morfo-dinamičke parametre lica žala. Prostorna raspodjela zrna šljunčanih žala veoma je izražena, na žalima se javljaju različite zone karakteristika zrna šljunka (Bluck, 1967; Orford, 1975). Mnoga istraživanja potvrđuju postojanje više zona različitih veličina i oblika sedimenta na jednom žalu (Sharp i Fan 1963; Wright i Short, 1984; Williams i Caldwell, 1988; Petrov, 1989; Isla, 1993). Razlozi takvog sortiranja sedimenta nisu u potpunosti razjašnjeni (Buscombe i Masselink, 2006).

Raspored zrna duž profila žala određen je njegovim oblikom, odnosno stupnjem zaobljenosti. Pločasta zrna lakše migriraju induciranim morskim strujama prema višim kotama profila žala, na kojima se zadržavaju zbog njihovog oblika (Bluck, 1967). Nasuprot tome zrna sfernog oblika teže se zadržavaju na višim kotama berme zbog odnošenja u povratnoj fazi strujanja *svoša* (*backwash*). Ovu tezu potvrđuje više autora (Petrov, 1989; Wright i dr., 1979), dok su je neki negirali (Carr, 1971; Jackson i Nordstrom, 1993). Williams i Caldwell (1988) testirali su Bluckovu (1967) tezu na šljunčanim žalima, te su došli do zaključka da raspored sedimenta duž lica žala primarno ovisi o veličini zrna žala. Navedena teza ne vrijedi u slučaju izražene nejednolikosti parametara sedimenta, intenzivnih dužobalnih (*long-shore*) migracija sedimenta i djelovanja ekstremnih valova (Orford i dr., 2002; Carter i Orford, 1991; 1993).

Caldwell i Williams (1985) su predložili podjelu šljunčanih žala na osnovi geometrije profila žala, odnosno njegove berme. Definirali su deset vrsta profila, koje nisu uspjeli povezati s obalnim procesima. Jennings i Shulmeister (2002) su istražili vezu između nagiba profila i veličine sedimenta na šljunčanim, mješovitim šljunčano-pjeskovitim i kompozitnim žalima. Dokazali su čvrstu povezanost veličine zrna i nagiba profila žala. Njihovi rezultati nadopunjuju rezultate istraživanja Sheparda (1962) i Komara (1998) za veća zrna šljunka. Jennings i Shulmeister (2002) mjere nagibe lica i aktivnog profila

žala, izražavajući ih pomoću kuta nagiba žala β . Najveći nagibi lica žala zabilježeni su na šljunčanim žalima, te taj nagib iznosi između 0,08 i 0,25, prosječno 0,18. Nagibi aktivnog profila su nešto manji i za šljunkovita žala se kreću između 0,09 i 0,19, prosječno 0,12.

Po definiciji minijaturnog žala izmjena sedimenta između minijaturnog žala i obližnjeg podmorja je zanemariva. Na žalo djeluje energija incidentnih valova ograničenog smjera ovisno o obliku uvale u kojoj se žalo nalazi. Zbog toga nastaju velike razlike u djelovanju valova i promjenama svakog pojedinačnog žala. Minijaturna žala udaljena svega nekoliko stotina metara mogu biti potpuno različite morfodinamičke parametre (Dehouck i dr., 2009). Svako minijaturno žalo potrebno je zasebno istražiti zbog jedinstvenog djelovanja valova, karakteristike sedimenta, morfologija obale i podmorja (Bowman i dr., 2009). Oblik minijaturnog žala pokušalo se opisati na osnovi tri statička modela obalne linije: logaritamski (Silvester, 1960), paraboličnim (Hsu i dr., 1989 a i b) i hiperbolički (Moreno i Kraus, 1999).

Mnoga minijaturna žala, gdje su zaleđa obale brdovita, nastala su na ušćima potoka i bujičnih vodotoka (Storlazzi i Field, 2000; Dehouck i dr., 2009; Pranzini i Rosas, 2009; Jackson i dr., 2010; Cipriani i dr., 2011; Thomas i dr., 2012; Pranzini i dr., 2013). Minijaturna žala u pravilu su ograničene dužine zbog morfoloških karakteristika obale (Short, 2010), no postoje i duža od četiri kilometra (Norcross i dr., 2002). Rotacija žala uzrokuje njihovo lokalno povlačenje ili napredovanje, pri čemu ne dolazi do dugotrajnog gubitka ili akumulacije sedimenta. Minijaturno žalo se jednostavno vraća u prvobitan položaj kao reakcija na promjenu smjera incidentnih valova (Klein i dr., 2002). Rotacija minijaturnog žala smatra se glavnim parametrom promjene njegove obalne linije. Promjene presjeka žala mogu izazvati promjene obalne linije žala (Harley i dr., 2011; Sancho-García i dr., 2013).

Minijaturna žala najčešće imaju ograničenu mogućnost donosa sedimenta (Brunel i Sabatier, 2009). Lokalne izvore sedimenta mogu činiti erozija klifova, debristi tok, padinski procesi i sl. (Norcross i dr., 2002; Juračić i dr., 2009). Većina donosa sedimenta brdovitog reljefa potječe od planinskih potoka i bujičnih vodotoka (Inman i Jenkins, 1999). Količina donosa bujičnog sedimenta ovisi o fizičkim i geološkim karakteristikama sliva (površina i nagib sliva, geološka građa, koeficijent otjecanja, mreža vodotoka i sl.), intenzitetu oborina, korištenju zemljišta, uređenje vodotoka,

izgradnja brana, korištenje voda (Inman i Jenkins, 1999; Syvitski i Milliman, 2007; Pranzini i dr., 2013). 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). Aktivacija bujičnih voda može donijeti značajne količine sedimenta na žalo, no nastale promjene teško je izmjeriti, jer se radi o rijetkim, teško predvidljivim događajima (Barnard i Warrick, 2010). Akumulacija sedimenta na minijturnim žalima rijetko je opisana u znanstvenim publikacijama (Wheatcroft i dr., 1997; Warrick i Fong, 2004). Rijetke studije opisuju ponašajne šljunkovitih sedimenta u interakciji ušća vodotoka i žala (Barnard i Warrick, 2010; Faivre i dr., 2011; Pranzini i dr., 2013).

Rijetka su istraživanja prirodnih i umjetnih minijturnih žala, zanimljiva istraživanja provedena su u Italiji (Del Grosso i Pranzini, 2003; Mannori i Pranzini, 2004; Nordstrom i dr., 2004; Pranzini i Rosas, 2009; Pranzini i dr., 2013); Španjolskoj (Basterretxea i dr., 2004; Ojeda i Guillén, 2008; Bowman i dr. 2009); Francuskoj (Dehouck i dr., 2009), Ujedinjenom Kraljevstvu (Short i Masselink, 1999); Grčkoj (Velegrakis i dr., 2005; Voudoukas i dr., 2009), Sjedinjenim Američkim Državama (Finkelstein, 1982; Inman i Jenkins, 1999; Storlazzi i Field, 2000; Norcross i dr., 2002); Južnoj Americi (Klein i Menezes, 2001; Klein i dr., 2002; Anthony i Dolique, 2004; Klein i dr., 2010), Australija i Noviom Zelandu (Weir i dr., 2006; Harley i dr., 2011).

U Italiji se ističu istraživanja Pranzinija (Del Grosso i Pranzini, 2003; Mannori i Pranzini, 2004; Nordstrom i dr., 2004; Pranzini i Rosas, 2009; Pranzini i dr., 2013). Ta istraživanja povezuju procese na žalu i njegovom zaleđu. Pranzini istražuje promjene produkcije i pronosa sedimenta rijeka i bujica kao posljedica promjene korištenja zemljišta.

Erozija mnogih žala nastala je promjenom prirodnog režima pronosa aluvijalnog sedimenta (Wheatcroft i dr., 1997; Storlazzi i Field, 2000; Hooke, 2006; Syvitski i Milliman, 2007; Barnard i Warrick, 2010; Cipriani i Pranzini, 2011). U Kaliforniji je smanjena količina fluvijalnog nanosa za čak 75% izgradnjom akumulacija i retencija. To mjestimice znatno utječe na povećanje erozije obale, zbog čega se veliki novčani iznosi troše za umjetnu dohranu žala (Willis i Griggs, 2003). Izgradnja akumulacija na grčkim otocima mogla bi smanjiti donos nanosa na žala za čak 50% (Velegrakis i dr., 2008).

2.2. Geomorfološke promjene na stjenovitim obalama

Geomorfološke promjene stjenovitih obala ovise o vrsti stijene i vanjskim utjecajima poput valova i oborina. Promjene mogu biti dugoročne (izazvane bioerozijom i abrazijom stijena) ili kratkotrajne, izazvane rijetkim događajima poput djelovanja ekstremnih valova na stijene manje čvrstoće. Promjene stjenovitih obala najčešće su dugotrajne, izazvane rijetkim događajima visokog intenziteta, zbog čega su teško uočljive na kratkoročnim istraživanjima. Takve obale često su opasne za provođenje terenskih istraživanja zbog nepristupačnosti i česte izloženosti visokim valovima. Zbog toga su rijetka detaljna istraživanja temeljena na direktnim terenskim mjerenjima, te je potreban razvoj i primjena novih tehnologija za daljinsko (*remote*) prikupljanje podataka (Felton, 2002; Trenhaile, 2002).

Stjenovite obale s klifovima čine oko trećine svjetskih obala (Bird, 2000), a građene su od klifova i morskih terasa oblikovanih djelovanjem valova (Grabau, 1913; Semeniuk i Johnson, 1985; Sunamura, 1992). Velike količine šljunčanog sedimenta nastaje trošenjem stjenovite obale. U povoljnim uvjetima akumulacije sedimenta mogu nastati žala. Ona mogu umanjiti procese trošenja klifova ukoliko je tijelo žala dovoljno veliko da adsorbira energiju djelovanja valova (Jennings i dr., 1998; Anthony i Dolique, 2001; Pontee i dr., 2004; Pye i Blott, 2009). No, šljunčani sedimenti mogu djelovati i abrazivno na nožicu klifa (Sunamura, 1982; 1992).

Stjenovita obala građena od rtova i uvala (*crenulated coasts*) nastaje tijekom dužeg perioda (Trenhaile, 1989) i to kao rezultat razlike čvrstoće stijena uvale i rta. Stijene na rtu su veće konzistencije i otpornije na marinsku eroziju. Navedeni tip obale može postići stanje ekvilibrijuma kada erozija u uvalama i rtovima postaje podjednakog intenziteta zbog transformacija valova u uvalama.

Stabilnost obalnih klifova povezana je s erozijom baze klifa izazvanom djelovanjem valova, te smanjenjem čvrstoće stijenske mase njezinim močenjem (*weathering*) (Sunamura, 1992). Produbljivanje potkapine na nožici klifa dolazi do smanjenja stabilnosti i na koncu samog prevrtanja klifa (Williams i dr., 1993; Matsukura, 2001; Kogure i dr., 2006; Kogure i Matsukura, 2010). Većina modela analize stabilnosti obalnih klifova zasnovano je na osnovnoj vezi prevladavajućih fizičkih procesa obale, žala i klifa (Walkden i Hall, 2005, 2011; Trenhaile, 2009; Castedo i dr., 2012).

2.3. Istraživanja na Kvarneru, Mediteranu i sličnim obalama

Istraživanja geomorfoloških procesa na sjeveroistočnoj strani Jadranskog mora su rijetka i najčešće provedena bez detaljnih mjerenja. Nakon relativnoavnog pregleda geološke građe Jadranskog podmorja (Alfirević, 1964; 1965), prvi novi cjeloviti pregled prikazuju Pikelj i Juračić (2013). Detaljnija istraživanja izvršena su jedino za područje Kvarnera, a djelomično i za područje Istre. Benac (1989) opisuje morfogenezu vrlo strmih i okomitih obala u području Kvarnera, Benac i Šegota (1990) prikazuju morfogenezu sjeverne obale Riječkog zaljeva, Benac i Juračić (1998) geomorfološku evoluciju Kvarnera od gornjeg pleistocena. Postanak i morfološka evolucija estuarija rijeke Raše opisana je u više radova (Benac i dr., 1991; Arbanas i dr., 2004; Benac i dr., 2007; Juračić i dr., 2009). Benac i Arbanas (1990) opisuju morfološku evoluciju ušća Rječine. Benac i dr. (1992) objašnjavaju evoluciju riječnih ušća u području Kvarnera, a Crmarić i dr. (2007) opisuju sedimentacijske procese na ušćima Dubračine i Novaljske Ričine.

Recentni geomorfološki procesi u Riječkom zaljevu opisani su u nekoliko radova (Benac, 1992; Benac, 1994; Benac, 1996a). Juračić i dr. (1999) prikazuju prvu modernu kartu sedimenta u podmorju Kvarnera. Magdalenić i dr. (1992) i Benac i dr. (2003) govore o inženjerskogeološkim značajkama jugoistočnog dijela Bakarskog zaljeva. Probleme zaštite prirodnih žala u području Kvarnera opisuju Benac i dr. (1998) i Jardas i dr. (1998). Procesii bioerozije na karbonatnim stijenama u području Riječkog zaljeva i Vinodolskog kanala opisani su u nekoliko radova (Benac i dr., 2004; Juračić i Benac, 2006; Benac i dr., 2008). Geomorfološki procesi na obalama Kvarnera i mogući rizici vezani za očekivano podizanje morske razine opisani su u nekoliko radova (Benac i dr., 2007; Juračić i dr., 2009; Benac i dr., 2009; 2010; 2012).

Morfodinamika minijturnih žala u području Kvarnera analizirana je u nekoliko radova (Benac i dr., 2010; Ružić i dr., 2011; Ružić i Benac, 2011, Faivre i dr., 2011, James i dr., 2013, Ružić i dr., 2013). Podložnost obalnih padina marinskoj eroziji i klizanju, analizirana je za područje Kvarnera (Benac i dr., 2013) i za jugozapadnu obalu otoka Krka (Benac i dr., 2014, Ružić i dr., 2014 i 2015).

2.4. Mjerenja topografije žala

U posljednje vrijeme došlo je do intenzivnog razvoja novih tehnologija mjerenja geomorfoloških tvorevina, a najveći razvoj doživjele su tehnologije daljinskog prikupljanja podataka (Westoby i dr., 2012). Primjena novih tehnologija, kao što su fotogrametrija, radar, optički radar (Lidar) i sl., omogućuje brzo i jednostavno prikupljanje trodimenzionalnih podataka visoke razlučivosti i preciznosti. Sve je češća primjena trodimenzionalnih oblaka točaka generiranih iz niza fotografija u geomorfološkim istraživanjima (Lane i dr., 2000; Grosse i dr., 2012; James i dr., 2012; Westoby i dr., 2013). Zbog malih troškova i jednostavne logistike, topografska mjerenja temeljena na nizu fotografija imaju značajne prednosti u odnosu na korištenje laserskog skenera i to u slučajevima kada se radi o teško pristupačnim područjima brzo promjenjive morfologije (James i dr., 2012). Fotografske kamere se mogu instalirati na razne tipove bespilotnih letjelica, što mjerenja čini bržim, preciznijim i jednostavnijim (Marzoff i dr., 2003; Boike i Yoshikawa, 2003; Eisenbeiss i dr., 2005; Lejot i dr., 2007; Smith i dr., 2009; Vericat i dr., 2009; Niethammer i dr., 2012; Dandois i Ellis, 2013; Wallace i dr., 2012). SfM fotogrametrija primijenjena je za istraživanje morfologije riječnih korita (Barker i dr., 1997; Pyle i dr., 1997; Chandler i dr., 2002; Brasington i Smart, 2003; Bird i dr., 2010;), erozije (Betts i DeRose, 1999; Marzoff i Poesen, 2009; Heng i dr., 2010), stijenskih pukotina (Sturznegger i Stead, 2009). Široko-pojasna fotogrametrija primijenjena je za laboratorijska istraživanja erozije (Stojic i dr., 1998; Hancock i Willgoose, 2001; Brasington i Smart, 2003; Heng i dr., 2010).

Daljinska istraživanja žala provode se korištenjem: satelitskih snimaka (Schiaffino i dr., 2012; Harris i dr., 2011), avionskih snimaka, laserskih skenera i video snimaka. House i Crescent (2000) uspoređuju primjenu klasičnih mjerenja, satelitskih i avionskih snimaka, te radara za mjerenja topografije pješkovitog žala.

Tlocrtne karakteristike minijaturnih žala najčešće su istraživane primjenom satelitskih i avionskih snimaka, te video sistema praćenja (Bowman i dr., 2009; Klein i dr. 2010; Silveira i dr., 2010; Schiaffino i dr., 2012; Turki i dr., 2013; Sancho-García i dr., 2013).

Sve je učestalije korištenje video sustava za praćenje morfoloških promjena žala (Holman i Lippmann, 1987; Holman i Stanley, 2007). Video tehnika omogućuje praćenje promjene žala u funkciji vremena, te predstavlja povoljan odnos cijene i

kvalitete podataka (Turki i dr., 2013). Video sistem primjenjuje se za pozicioniranje obalne linije žala, profila žala između plime i oseke (Aarninkhof i dr., 2000; Harley i dr., 2011), dubina ispred žala (Stockdon i Holman, 2000).

Laserski skeneri se sve češće koriste u istraživanjima obale (Guenther, 1998; Saye i dr., 2005; Turki i dr., 2013). Rezultat mjerenja su trodimenzionalni oblaci točaka visoke razlučivosti i preciznosti, koji daju puno više podataka o žalu u odnosu na korištenje klasičnih geodetskih metodi (Young i Ashford, 2006; Theuerkauf i Rodriguez, 2012). Blizu-pojasna (*soft-copy*) fotogrametrija često se koristi za mjerenje morfologije žala (Ojeda i dr., 2002; Dornbusch i dr., 2009.). Mogućnost primjene SfM fotogrametrije na žalima prikazana je tek posljednjih godina, u manjem broju publiciranih radova (Harwin i Lucieer, 2013; Westoby i dr., 2013; James i dr., 2013; Ružić i dr. 2013, 2014a, 2014b).

3. PRIRODNE ZNAČAJKE KVARNERA

3.1. Reljef i geološka građa

Područje Kvarnera je poluzatvoreni dio Jadranskog mora, smješten između liburnijske obale na zapadu i vinodolsko-velebitske obale na sjeveroistoku. Otočni nizovi Cres-Lošinj i Krk-Rab-Pag dijele to područje na Riječki zaljev, Kvarnerski zaljev (Kvarner u užem smislu), Kvarnerić i Vinodolsko-velebitski kanal. Ove geomorfološke jedinice imaju dinarski smjer pružanja SZ-JI, dok se istočna obala istarskog poluotoka pruža smjerom SSI-JJZ (slika 1.1).

Na površini kopnenog dijela kvarnerskog područja nalaze se vapnenci donje krede, prijelazne kredne karbonatne breče, gornjokredni vapnenci i dolomiti u izmjeni, kao i gornjokredni rudistni vapnenci. Od paleogenskih naslaga zastupljeni su foraminiferski vapnenci i siliciklastične naslage (lapori i fliš), te karbonatne breče (Velić i Vlahović, 2009). Karbonatne stijene su dominantne, dok je rasprostranjenost siliciklastičnih ograničena. Iznimka je otok Rab, koji je većim dijelom oblikovan u naslagama fliša i po tomu jedinstven na Hrvatskom dijelu Jadranskog mora. Karbonatne i siliciklastične stijene tvore osnovnu stijensku masu koja je na kopnu djelomično pokrivena mlađim tvorevinama.

Kvartarne i recentne poluvezane do nevezane tvorevine su pokrivač na stjenovitoj podlozi. Vrlo su različite geneze i litološkog sastava. U kvartarne tvorevine pripadaju: crvenica, les, vezani i aktivni sipar, padinski nanos na flišu, potočni i riječni nanos, marinski sedimenti i antropogene tvorevine (Benac, 2000).

Podvlačenje Jadranske karbonatne platforme pod Dinaride u izravnoj je svezi s tektogenezom kvarnerskog područja (Blašković, 1999). Neotektonski pokreti od donjeg pliocena do danas imali su presudnu ulogu u oblikovanju današnjih struktura. Odražavali su se u horizontalnim i vertikalnim pokretima različitih predznaka i intenziteta. Osim rotacije cjelokupnog prostora, događala su se značajna izdizanja grebena Učke, dijelova otoka Cresa i Krka, uz istovremeno tonjenje dijelova sadašnjih morskih bazena (Prelogović i dr., 1995).

Kredne i paleogenske karbonatne siliciklastične stijene (fliš) borane su i rasjednute. Stijenski kompleks bio je tijekom geološke prošlosti podvrgnut stresu promjenljivih smjerova i intenziteta, budući da je područje Kvarnera imalo vrlo dinamičan tektonski razvoj (Blašković, 1999; Vlahović i dr., 2005). Posljedica toga je nastanak često složenog strukturnog sklopa, čije se značajke bitno razlikuju i na relativno malim udaljenostima. Uslijed boranja i rasjedanja stvoreni su genetski različiti sustavi pukotina, koji karbonatnu stijensku masu dijele na monolite centimetarskih do metarskih dimenzija. Uz izraženije tektonske zone, prvenstveno navlačne, ali i zone velikih smičnih rasjeda sa subhorizontalnim kretanjima tektonskih blokova, stijenske mase bitno su jače zdrobljene.

Karbonatne stijene često su ogoljene, odnosno područja oblikovana u njima imaju tipičan krški izgled. Na tim stijenama česte su zone crvenice, posebice u ponikvama. Nasuprot tomu, siliciklastične stijene podložne su ubrzanom trošenju pa je stoga uglavnom pokrivene glinovito-prašinastom zonom raspadanja (Benac, 2000).

U podmorju Kvarnera (u širem smislu) nalazi se tri osnovna tipa morskoga dna: golo kamenito morsko dno, gdje se krupnozrnasti sedimenti nalaze u izoliranim udubljenjima na površini stijene, morsko dno prekriveno krupnozrnastim pjeskovitim do šljunkovitim sedimentom i morsko dno prekriveno sitnozrnastim pjeskovito-muljevitim sedimentom. Sitnozrnati muljeviti sedimenti ustanovljeni su u Riječkom zaljevu, sjevernom dijelu Kvarnera (u užem smislu), Kvarneriću, te Vinodolskom i Velebitskom kanalu. Pjeskoviti sedimenti nađeni su uz južni dio otoka Krka, oko otoka Raba i Suska, te jugoistočno od otoka Cresa i Lošinja prema otvorenom moru sjevernog Jadrana (Juračić i dr., 1999).

U plićim, priobalnim zonama oblikovanim u karbonatnim stijenama podmorske padine su kamenite, odnosno hridinaste. To je litoralna i sublitoralna zona pod utjecajem erozijskog djelovanja valova. Na stjenovitoj podlozi mjestimice se nalazi sediment nastalo marinskom erozijom obale ili pak doneseni s kopna vodom (nastavci proluvijalnih nanosa) ili gravitacijom (podmorski sipari). Šljunkovita dna karakteristična su za podmorske nastavke brojnih bujičnih dolina, a ispod vrlo strmih ili okomitih litica česti su podmorski sipari. Uz obale oblikovane u naslagama fliša morsko dno je blagog nagiba i najčešće pokriveno pijeskom, koji je nastavak pjeskovitih žala na obali.

Dno Riječkog zaljeva gotovo je zaravnjeno, najveće dubine su od -65 do -66 m. Dno postupno postaje pliće od Velih vrata prema otvorenom dijelu Jadrana, do dubine -50 do -55 m. Međutim, u prolazu Srednja vrata dno postupno tone prema akvatoriju Kvarnerića, gdje su dubine veće od -90 m. U tjesnacu Krušija, između otoka Cresa i otoka Plavnika najveća izmjerena dubina je čak -125 m. U vrlo uskom Tihom kanalu najdublji dijelovi dna dosižu dubinu -60 m.

Liburnijska obala, odnosno istočna obala Istre okrenuta Riječkom zaljevu i Kvarneru izdužena je gotovo usporedno s gorskim hrptom Učke. Pružanje hrpta Učke prekinuto je na jugu poprečno Plominskim zaljevom, uvučenim u kopno preko tri kilometra. Podno glavnog grebena pruža se blaže nagnuti dio padine, čija cjelovitost je poremećena poprečnim suhim dolinama, od kojih su morfološki najizraženije one u zaleđu Opatije, Ičića, Ike, Medveje i Moščeničke Drage. Od ulaza u Plominski zaljev, na sjever sve do Moščeničke Drage, obale su vrlo strme, a ponegdje i vertikalne. Padine i veliki dio obale oblikovan je u karbonatnim stijenama, koje su mjestimično pokrivena crvenicom. Na dnu duboko usječenih dolina nalaze se višemetarske nakupine šljunka.

Kopneni okvir Liburnijske obale određuje i njegov podmorski reljef. Uz istarsku obalu, od rta Mašnjak, na ulazu u Plominski zaljev, do Medveje i obale Cresa, izobata od -50 m nalazi se svega desetak metara od obalne crte. Brojni su podmorski strmci i sipari. Idući od Medveje na sjever prema Rijeci, nagib dna postaje blaži pa se izobata od -50 m nalazi i do 1000 m udaljena od obale. Potopljeni dijelovi proluvijanih lepeza vidljivi su u reljefu podmorja i nekoliko desetaka metara od obalne linije.

Sjeverni dio otoka Cresa gotovo u cjelini ima oblik krške zaravni oblikovane u karbonatnim stijenama gornje krede i paleogena. Gorskim hrptom smjera pružanja SSZ-JJI, zaravan je podijeljena na niži sjeverni dio, prosječne nadmorske visine oko 300 m i viši jugozapadni dio prosječne visine 400 do 450 m. Od rubova zaravni padine se strmo obrušavaju prema moru. Stoga su obale sjeveroistočnog dijela otoka Cresa, okrenute prema Riječkom zaljevu i prolazu Vela vrata, izrazito strme i hridinaste. Izobata -50 mjestimično se nalazi svega desetak metara od obalne crte. Mjestimično su vidljive jaruge, plitko usječene u karbonatnu stijensku masu, čiji priobalni dijelovi su ispunjeni šljunkovitim nanosom. Na obali su česti aktivni sipari čija se tijela protežu u podmorje.

Jugozapadni dio krške visoravni na otoku Krku oblikovan je u vapnenačko-dolomitičnim karbonatnim gornjokrednim stijenama, te djelomice u foraminiferskim vapnencima i vapnenačkim brečama paleogena. Uska i isprekidana zona siliciklastičnih stijena pruža se uz jugozapadni rub ove visoravni. Kod naselja Stara Baška zona siliciklastičnih stijena, djelomično pokrivenih siparnim brečama pruža se uz obalu, a zatim prema sjeverozapadu odvajaju poluotok Negrit od krškog uzvišenja.

Opisane geomorfološke značajke i geološka građa kopna imaju izravan odraz na reljef obale i podmorje tog dijela otoka Krka. Ispred naselja Stara Baška na obali je oblikovan klif, a ispred njega marinska terasa. Zbog toga je podmorje vrlo blagog nagiba, a izobata -10 nalazi se 100 do 200 m od obalne crte. Sjeverozapadno, prema rtu Negrit, obale su strmije i pretežito oblikovane u karbonatnim stijenama. Na karbonatnim stijenama vidljiva su korita bujičnih tokova, a na njihovom kraju su žala oblikovana u bujičnim sedimentima. Mjestimično su razvijeni klifovi. Izobata -30 m nalazi se približno 100 m od obalne crte. Markantna pojava u reljefu je duboko usječena dolina periodičnog vodotoka Oprna. Dno nižeg dijela doline pokriveno je šljunkovitim sedimentima.

Današnja raznolikost reljefa na kopnu i u podmorju posljedica je litološkog sastava, recentnih tektonskih pokreta kao i geomorfoloških procesa prouzročenih klimatskim promjenama i oscilacijama morske razine tijekom kvartara (Benac i Juračić, 1998). Morfološke odlike reljefa i strukturni sklop naslaga kao i izražena seizmičnost, također ukazuju na vrlo živu recentnu tektonsku aktivnost. More je počelo plaviti sjeverni Jadran, pa tako i područje Kvarnera prije nešto više od 18.000 godina. Holocenski rast morske razine bio je vrlo brz, ali prije skokovit nego kontinuiran. Hidrografski i sedimentacijski uvjeti slični današnjima nastali su tijekom holocena, pred oko 5000 godina (Benac i dr., 2007). More je potopilo krški reljef, a budući da je donos materijala s kopna bio relativno malen, izdignuta kamenita područja su ostala nepokrivena, međutim u udubljenim dijelovima paleoreljefa počelo je taloženje onog dijela materijala koji ipak dopijeva s obale (Benac, 1996; Juračić, i dr., 1999).

3.2. Klimatske posebnosti

Na području Jadranskog mora sukobljavaju se klimatski utjecaji europskog, azijskog i afričkog kontinenta te Atlantskog oceana i Sredozemnog mora. Kvarner se nalazi približno na 45^o sjeverne geografske širine, u području prevladavajuće zonalne cirkulacije zraka iz zapadnoga smjera. Zbog toga u većem dijelu godine ovim područjem prolaze ciklonalni poremećaji koji donose znatne količine vlage. Međutim, u ljetnom razdoblju granica zapadnog strujanja pomiče se prema sjeveru i nastupa dugotrajnije sušno razdoblje. Uz navedenu opću cirkulaciju atmosfere, pojavljuju se i sekundarni centri cirkulacije prouzročeni nejednolikim zagrijavanjem kopna i mora (Šegota i Filipčić, 1996). Zbog toga područje Kvarnera ima vrlo promjenljive klimatske značajke s općenito toplijim i sušnijim ljetnim, te hladnijim i vlažnijim zimskim razdobljem, što su tipične odlike submediteranske i mediteranske klime. Ipak, nazire se i prostorna diferencijacija kao posljedica modifikatorskog utjecaja reljefa (Penzar i dr., 2001).

Ukupna prosječna godišnja količina oborina u razdoblju od 1971. do 2000. godine na Liburnijskoj obali bila je viša od 1500 mm, dok je na vrhovima Učke prelazila 2500 mm. Na sjevernom dijelu otoka Cresa prosječna godišnja količina oborina je između 1200 i 1400 mm, a na jugozapadnoj obali otoka Krka manja od 1200 mm (DHMZ, 2003). Najmanje oborina je u ljetnim mjesecima, a najviše u jesen i početkom zime. Međutim, i zimi se javljaju kraća sušna razdoblja, a ljetne oluje mogu biti praćene izrazito velikim intenzitetom oborina, s dnevnim intenzitetom većim od 100 mm. Posljedica vrlo promjenljivih klimatskih prilika sjevernog Jadrana je vrlo nestalna vjetrovna i valna klima.

Bura je tipičan vjetar u području Kvarnera, izražen je u hladnijem dijelu godine. Puše iz sjeveroistočnog kvadranta, poznata je po svojoj naglom nastajanju i velikim brzinama. Bura nastaje kad se hladniji zrak nad kopnom ruši niz primorske planine u toplije područje iznad mora. Najjača bura javlja se kada opći gradijent tlaka potiče zračno strujanje preko planinskog lanca. Tada čini razorne štete. Bura puše na mahove, prosječna brzina bure iznosi više desetaka kilometara na sat, brzina udara mnogo je veća. Najveći zabilježeni udar bure je 69 m/s, odnosno 248 km/h. Najjača je u podvelebitskom području, a slabi s udaljavanjem od obale. Jugo je postojan i snažan jugoistočnjak koji puše približno ujednačenom brzinom. Javlja se u sklopu zračnog

strujanja iz južnoga kvadranta, koje na pučini često ima južni smjer, a obalne ga planine u donjem dijelu atmosfere skreću u smjeru jugoistoka.

3.3. Oceanografske značajke

Jadransko more karakteriziraju vrlo male amplitude plimnih oscilacija. Maksimalne astronomske morske mijene u odnosu na srednji morski raz iznose oko 80 cm, izraženije su u sjevernom dijelu Jadrana. Oscilacije nivoa mora uzrokovane su, osim astronomskih utjecajem i raznim meteorološkim čimbenicima, primarno vjetrovima i promjenama atmosferskog tlaka. Vjetrovi mogu uzrokovati promjenu nivoa mora do 10 cm, južni vjetrovi generiraju i seše, čija amplituda može biti veća od 50 cm. Osim navedenih oscilacija javljaju se i slobodne oscilacije, posebno u zaljevima i kanalima.

Razine mora imaju važan utjecaja na žala i objekte u blizini obalne linije. Povišene morske razine mogu izazvati poplave priobalnih mjesta. Osnovni statistički parametri srednjih mjesečnih i godišnjih razina mora Bakra, za razdoblje od 1959. do 2001. godine prikazani su u tablici 3.1. (Ružić, 2003)

Tablica 3.1. Statistički podatci za mjesečne srednjake u Bakru, (1959-2001)

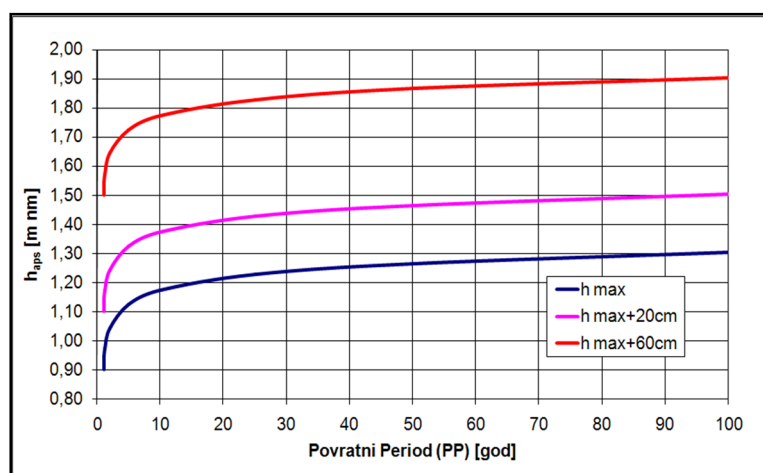
MJESEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	GOD
SV [m.n.m.]	0,13	0,11	0,10	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,14	0,19	0,21	0,18	0,14
max [m.n.m.]	0,32	0,30	0,35	0,27	0,26	0,22	0,21	0,22	0,26	0,35	0,40	0,40	0,21
min [m.n.m.]	-0,09	-0,13	-0,10	0,03	0,00	0,04	0,03	0,02	0,04	0,00	0,03	-0,01	0,08
σ	0,11	0,11	0,10	0,06	0,07	0,04	0,04	0,04	0,06	0,09	0,09	0,10	0,04

Srednja vrijednost morske razine u Bakru iznosi 0,14 m. n.m. Statistički parametri maksimalnih mjesečnih i godišnjih razina mora Bakra za razdoblje od 1959. do 2001. godine prikazani su u tablici 3.2. Najveća zabilježena razina mora u Bakru je 1,25 m. n.m. (veljača 1986).

Tablica 3.2. Statistički podatci za mjesečne i godišnje maksimume u Bakru (1959-2001)

MJESEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	GOD
SV [m.n.m.]	0,74	0,70	0,65	0,66	0,67	0,65	0,60	0,60	0,62	0,77	0,86	0,89	1,04
max [m.n.m.]	1,06	1,23	0,94	0,93	1,13	1,06	0,89	0,89	0,87	1,25	1,18	1,22	1,25
min [m.n.m.]	0,29	0,31	0,36	0,42	0,45	0,40	0,41	0,38	0,34	0,41	0,48	0,57	0,87
σ	0,21	0,21	0,15	0,13	0,16	0,13	0,11	0,10	0,13	0,22	0,20	0,16	0,11

Obradom podataka mareografske postaje Bakar za razdoblje od 1959. do 2001. godine, prognozirane su učestalosti pojave maksimalne razine mora u Bakru (slika 3.1.).



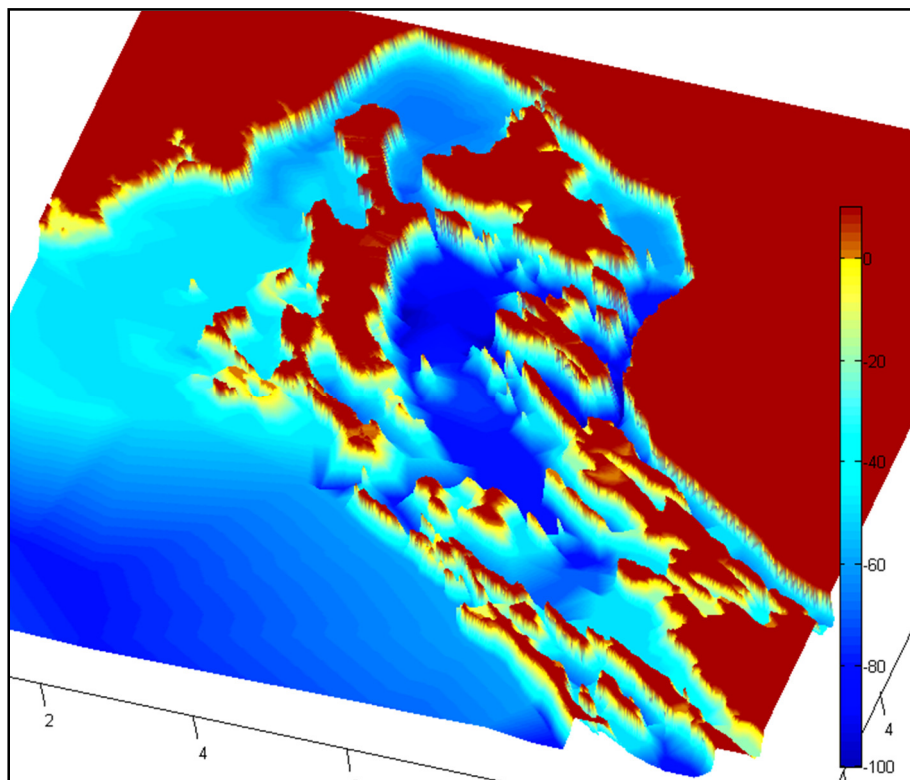
Slika 3.1. Prognoze učestalosti pojave maksimalne razine mora u Bakru, sadašnja morska razina (plava), u slučaju povećanja morske razine 20 cm (ljubičasta) i 60 cm (crvena).

Prognozirane razine mora u slučaju povećanja morske razine od 20 do 60 imele bi značajan utjecaj na promjenu intenziteta obalnih procesa.

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. Iako sjeveroistočni vjetar bura ima najveću učestalost i doseže najveću brzinu, vjetrovi koji pušu iz južnog kvadranta generiraju najviše valove. Mjerenja su pokazala povećanje učestalosti juga tijekom zadnjih desetljeća u području Jadranskog mora. Valna klima determinirana je vjetrovima (smjerom, trajanjem i intenzitetom) i razvijenom morfologijom obale i podmorja. Najčešći valovi su iz smjera sjeveroistok - bura, dok najveće valove stvara jugo koje puše iz smjera jugoistok. Najveći valovi zabilježeni su na otvorenom moru sjevernog Jadrana, 31. 1. 1986., a njihovi parametri su: $H_{max}=10,8$ m, $H_s=6,0$ m, $T_{sr}=8,5$ s.

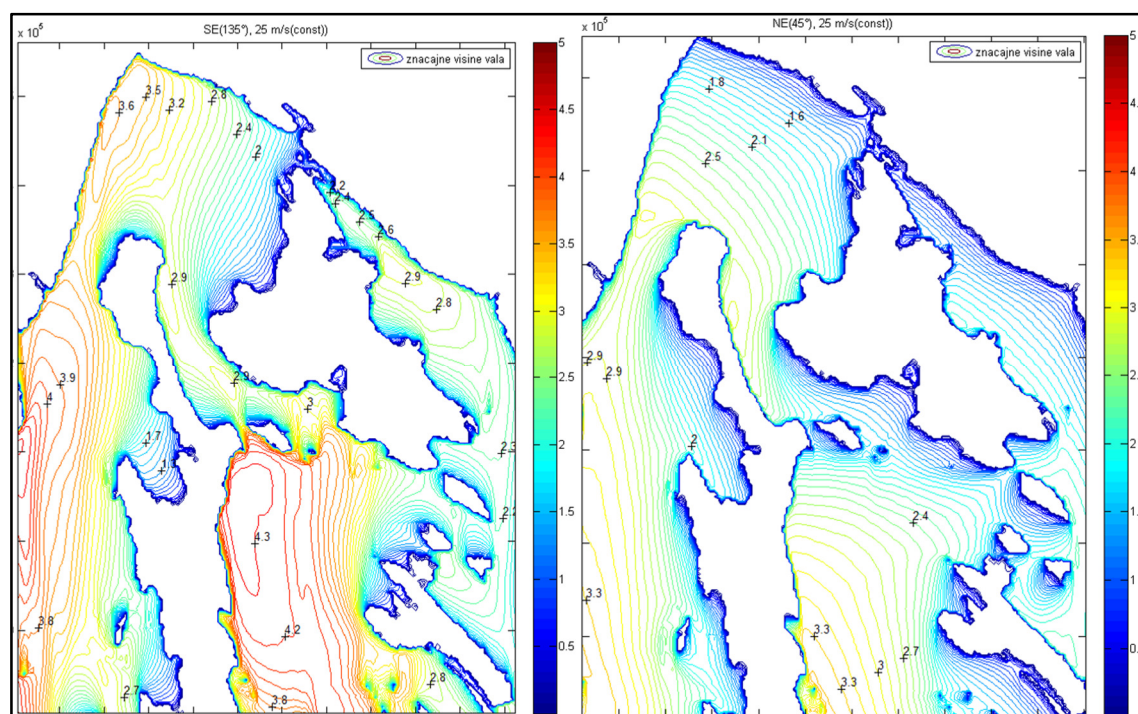
Na području Jadranskog mora koji pripada Primorsko-goranskoj županiji izvršena su rijetka mjerenja morskih valova, struja, saliniteta, temperatura. Istraživanja su lokalnog karaktera, vezana uz pojedine projekte. Mali broj istraživanja u koliziji je s važnošću i predviđenim razvojem Riječkog lučkog bazena. U svijetu, prognoziranja visine valova uobičajeno se provode korištenjem numeričkih modela. Postoji više vrsta modela kojima se prognoziraju valovi na regionalnoj i globalnoj skali. Numerička simulacija

valovanja za potrebe ovog rada izvršena je korištenjem numeričkog modela SWAN. Za provođenje numeričkih simulacija valovanja korišten je digitalni model podmorja Kvarnera, dobiven digitalizacijom izobata topografske karte mjerila 1:25000 (slika 3.2.).



Slika 3.2. Digitalni model podmorje Kvarnera

Na slici 3.3. prikazani su rezultati numeričkih simulacija značajnih valova iz SE i NE smjera, za stalno polje vjetra jačine 25 m/s, što približno odgovara jakosti 100 godišnjeg povratnog perioda, ovisno o meteorološkoj postaji i obradi meteoroloških podataka.



Slika 3.3. Značajne visine valova (H_s) iz SE i NE smjera; vjetar konstantne jačine 25 m/s

Značajne visina valova vjetra iz SE smjera u pravilu su veće od visina valova iz NE smjera zbog većih površina privjetrišta.

Osnovni pokretački mehanizam izmjene vodenih masa na otvorenom dijelu Jadrana su gradijentne struje. Rezultat tih procesa je osnovna ciklonska struja u površinskom sloju istočnog Jadrana, s krakom koji ulazi u područje Kvarnera. U proljeće, na sjevernom dijelu Jadrana uspostavlja se vrtložna cirkulacija kao posljedica jačeg dotoka slatke vode, što može inducirati površinsku struju koja prolazi pravcem Kvarner - Riječki zaljev kroz prolaz Vela vrata. Zimi su u Riječkom zaljevu struje usmjerene od Kvarnerića i Vinodoskog kanala prema Riječkom zaljevu, pa Kvarneru i otvorenom dijelu Jadranskog mora. Koncem proljeća izmjena vodenih masa između Kvarnera, Kvarnerića i Riječkog zaljeva je minimalna, ljeti je prisutan tok u dva sloja, prilikom čega je smjer pridnenih struja ciklonalni, a površinskih anticiklonalni. Utjecaj dotoka slatke vode u akvatorijima Kvarnera je vrlo značajan. To se posebno odnosi na Riječki zaljev i Vinodolsko-velebitski kanal. Prema saznanjima temeljenim na analizi satelitskih snimaka u infracrvenom dijelu spektra, na priobalnom području prisutna su i vrlo znatna istjecanje slatkih voda u more koje se ranijim pristupima nisu dala detektirati (Horvat i Rubinić, 2006).

4. METODOLOGIJA

4.1. Primjena fotogrametrije i digitalnog modela terena (DMT)

Fotogrametrija je tehnika mjerenja pomoću koje se iz fotogrametrijskih snimki dobivaju oblik, veličina i položaj snimljenog objekta. S obzirom na poziciju kamere u prostoru fotogrametrija se dijeli na aero fotogrametriju, terestričku fotogrametriju, orbitalnu fotogrametriju i extra-terestričku fotogrametriju. Ovisno o metodologiji obrade fotogrametrijskih snimaka koriste se: mjerne kamere, djelomično mjerne kamere i amaterske kamere. Fotogrametrija omogućava rekonstruiranje objekata i utvrđivanje njihovih značajki bez izravnog kontakta. Taj način dobivanja informacija naziva se daljinskim istraživanjem (*remote sensing*).

4.1.1. Digitalni model terena (DMT) i trodimenzionalni oblak točaka

Ljudi od pamtivijeka pokušavaju vjerno prikazati teren na kojem borave. Najprije su to činili pomoću skica terena do prvih karata sa simbolima značajki terena. U 18 stoljeću pojavljuju se prve karte sa slojnicama (Zhu i Gold, 2005). Prvi modeli terena bili su fizički modeli, nastali u vojne svrhe tijekom Drugog svjetskog rata (Baffisfore, 1957). U drugoj polovici 20. stoljeća razvijaju se novi načini prikaza terena, koji su omogućeni razvojem računala. Površina terena digitalno se prezentira matematički i grafički. Prve primjene digitalnog modela terena datiraju u pedesete godine 20. stoljeća, kada Robers predlaže korištenje fotogrametrije za planiranje i projektiranje autocesta, što su detaljno opisali Miller i LaFlamme (1958), koji daju prvu definiciju digitalnog modela terena (DMT). Digitalni model terena predstavlja površinu terena kao kontinuiranu trodimenzionalnu plohu, koje se ne može prikazati poznatim matematičkim formulama. "DMT je statistička reprezentacija kontinuirane površine terena pomoću velikog broja odabranih točaka sa poznatim X, Y i Z koordinatama u nadređenom koordinatnom sustavu DMT" (Miller i LaFlamme, 1958). U usporedbi s tradicionalnim analognim kartografskim prikazom, DMT imaju mnoge prednosti kao što su različite mogućnosti prikaza i primjene (npr. jednostavno izvlačenje profila, 3D animacije, jednostavna integracija volumena). Kod takvih modela nema gubitka preciznosti tijekom vremena, digitalni podaci lako se ažuriraju i obrađuju, a jednostavna je izrada modela različitih

mjerila. Digitalni elevacijski model (DEM) sastoji se od dvodimenzionalne matrice visina raspoređene u pravilan pravokutan ili šesterokutan raster. Elevacija modela je apsolutna visina neke točke iznad određenog datuma. DMT je kontinuirani prikaz površine terena koji osim visina na određenom rasteru (DEM), sadrži i druge elemente koji opisuju topografiju terena kao što su nagibi, bridovi, karakteristične točke. DMT omogućuje analize i prostorna modeliranja terena, zbog čega ima veliku primjenu u građevinarstvu i geoznanostima.

Danas se sve češće koriste 3D oblaci točaka, dobiveni pomoću laserskog radara (LIDAR) i fotogrametrije, za izradu DMTa. Oblak točaka predstavlja skup trodimenzionalnih točaka u prostoru, pomoću kojih se može dobiti realističan trodimenzionalni prikaz nekog objekta. Oblak točaka može sadržavati i podatak o boji točke (RGB).

4.1.2. Generiranje oblaka točaka iz niza fotografija

U 21. stoljeću primjena blizu-pojasne (*close-range*) fotogrametrije postaje standardni način generiranja trodimenzionalnih topografskih modela (Remondino i El-Hakim, 2006; Matthews, 2008; Fraser i Cronk, 2009; Westoby i dr., 2013). Osnovni princip generiranja trodimenzionalnog modela iz dvaju ili više fotografija analogan je trodimenzionalnoj percepciji slike kod ljudi zasnovanoj na udaljenosti ljudskih očiju. Ljudske oči projiciraju trodimenzionalnu sliku na dvodimenzionalnu šarenicu, što mozak pretvara u trodimenzionalni prikaz. Trodimenzionalni oblik nekog objekta generira se iz dvaju ili više fotografija, pronalaženjem niza piksela istog objekata na fotografijama. Pozicija piksela određuje se na osnovi pozicije i parametara leće kamere. Generiranje 3D oblaka točaka iz niza fotografija bazirano je na principima klasične fotogrametrije (Bird i dr., 2010; Gessesse i dr., 2010). Oblaci točaka visoke preciznosti i razlučivosti najprije su generirani iz klasične fotogrametrije (Lane i dr., 2000; Westaway i dr., 2000), dok recentno dolazi do sve češće primjene Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije.

Razvoj SfM algoritma povezan je s razvojem računalnih vizualizacija (Spetsakis i Aloimonos, 1991; Boufama i dr., 1993). Razvoju SfM algoritama prethodio je razvoj algoritama automatskog prepoznavanja istih oblika na fotografijama (Förstner, 1986;

Harris i Stephens, 1988). SfM algoritam baziran je na sličnim principima kao i klasična stereoskopska fotogrametrija, bez potrebe za kalibriranom fotografskom opremom, velikog broja poznatih kontrolnih točaka i njihovim označavanjem tijekom obrade. Trodimenzionalna mjerenja objekta zasnovana su na seriji fotografija snimljenih s različitih pozicija, čija se scena preklapa. Osnovna razlika SfM algoritama i klasične fotogrametrije je u automatskom generiranju geometrije scene, lokacija kamere generira se automatski koristeći iterativni postupak podešavanja (*iterative bundle adjustment procedure*). Iterativni postupak podešavanja zasniva se na bazi podataka o sceni, automatski generiranih iz niza fotografija (Snavely, 2006; Snavely i dr., 2008). Točna pozicija kamere i koordinate objekata određuju se iterativnim postupkom koristeći nelinearnu metodu najmanjeg kvadrata. Za razliku od klasične fotogrametrije lokacija kamere i koordinate točaka nisu u apsolutnom koordinatnom sustavu, već u relativnom koordinatnom sustavu. 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 (Westoby i dr., 2012; James i dr., 2012).

SfM rekonstrukcija je automatski postupak baziran na automatskom generiranju parametra scene koristeći iterativni postupak podešavanje (*iterative bundle adjustment procedure*) (Snavely, 2006; Snavely i dr., 2008). Postoji niz metoda koje se mogu koristiti za ovaj postupak, od kojih je dio otvorenog koda (*open source*): Bundler - Structure from Motion for Unordered Photo Collections; FIT3D, Structure from Motion toolbox for Matlab; Matlab Functions for Multiple View Geometry; Matlab Code for Non-Rigid Structure from Motion; Matlab Code for Non-Rigid Structure from Motion; Photogrammetry Toolbox GUI (Python); Libmv - A C++ Structure from Motion library itd.). Postoje i slobodni online servisi: Microsoft's Photosynth, 3DF Samantha i sl., kao i servisi pod naplatom.

4.1.3. Indirektna metoda georeferenciranja trodimenzionalnih oblaka točaka

Indirektna ili konvencionalna metoda georeferenciranja oblaka točaka temelj se na poznatim koordinatama minimalno tri točke oblaka točaka. Pozicije točaka određuju se pomoću geodetskog instrumenta, same točke posebno se označavaju zbog lakšeg prepoznavanja na terenu i generiranom oblaku točaka. Te točke nazivaju se kontrolne točke (*ground control points - GCP*). Mjerodavna transformacija oblaka točaka definira

se na osnovi apsolutnih i relativnih koordinata GCP točaka. U slijedećem poglavlju detaljno se opisuje upotreba različitih meta i njihov utjecaj na preciznost georeferenciranja 3D oblaka točaka minijaturnog žala. Broj kontrolnih točaka ovisi o karakteristikama snimanog područja, preporuča se da svaka snimljena fotografija sadrži barem tri. Kontrolne točke mogu biti izraženi oblici rekonstruirane scene kao što su rubovi objekata ili najviša točka stijene. Preporuka je da kontrolne točke imaju i značajan kontrast boja u odnosu na scenu zbog lakšeg prepoznavanja tijekom obrade oblaka točaka. U prirodi često nema dovoljno izraženih kontrolnih točaka pa je potrebno unaprijed pripremiti kontrolne točke koristeći boje ili postavljajući određene lako uočljive mete.

4.1.4. Automatske metode georeferenciranja oblaka točaka

Automatske metode georeferenciranja trodimenzionalnih oblaka točaka temelje se na identičnim skupovima podataka različitih oblaka točaka. Oblaci točaka se georeferenciraju automatski, bez poznavanje koordinata kontrolnih točaka, nema potrebe za upotrebom dodatne opreme poput totalne stanice ili GPS prijemnika. Svaka točka trodimenzionalnog oblaka točaka transformirana je sukladno referentnom oblaku točaka, primjenom *Iterative Closest Point* (ICP) algoritma (Besl i McKay, 1992.). ICP algoritam funkcionira na način da se u prvom koraku približnim manualnim referenciranjem svake točke referentnog oblaka točaka (\mathbf{p}_i) odredi najbliža točka oblaka točaka koji se referencira (\mathbf{q}_i). U drugom koraku provodi se ICP algoritam koji metodom najmanjih kvadrata registrira skupove točaka \mathbf{p}_i i \mathbf{q}_i . ICP algoritam pokazao se uspješnim za georeferenciranje oblaka točaka koji sadrže pravilne, pravokutne objekte. Nedostatak automatskih metodi georeferenciranja korištenjem ICP algoritma je u potreba za manualnim približnim lociranjem referencirajućeg oblaka točaka (Schuhmacher i Böhm, 2005).

4.2. Numeričke simulacije valovanja

Analiza utjecaja valova na žalo procijenjena je pomoću numeričkom modela valovanja 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). SWAN uzima u obzir sljedeća fizikalna svojstva: širenje vala u vremenu i prostoru, shoaling, refrakciju uzrokovanu strujama i dubinom, promjenu frekvencije uslijed djelovanja morskih struja i promjenjivu dubinu, generiranje valova vjetrom, nelinearna djelovanja: trostruku i četverostruku interakciju valova, površinski lom valova, trenje s dnom i lom uslijed promjene dubine, transmisiju kroz prepreke, refleksiju od prepreka i difrakciju. Holthuijsen i dr. (2003) nadograđuju model promjene parametara valova u plitkom području difrakcijom.

SWAN primjenjuje zakon očuvanja energije valnog spektra u interakciji s morskim strujama:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

N - Gustoća valnog spektra jednaka $E(\sigma, \theta)/\sigma$,

σ - Relativna valna frekvencija

θ - Smjer propagacije valova

c_σ - Brzina i smjer propagacije

c_x i c_y – brzine propagacije valova u x i y smjeru grupe valova c_g

c_θ - brzina zakretanja smjera propagacije valova

$S=S(\sigma, \theta)$ – osnovni izraz koji predstavlja generiranje, disipaciju i interakciju valova u funkciji spektra frekvencije i direkcije

Brzina propagacije valova pod utjecajem morskih struja u interakciji s difrakcijom je:

$$\bar{c}_g = \bar{c}_g (1 + \delta_E)^{1/2} + \bar{U} \quad (2)$$

$$C_\sigma = \frac{\partial d}{\partial t} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \bar{\kappa} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} (1 + \delta_E)^{1/2} \quad (3)$$

$$C_\theta = - \left[c_g (1 + \delta_E)^{1/2} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial m} + \frac{1}{2(1 + \delta_E)} \frac{\partial \delta_E}{\partial m} \right) + \frac{\bar{\kappa}}{\kappa} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right], \quad (4)$$

\vec{U} brzina morskih struja

$$\vec{c}_g = (c_x, c_y) = \frac{\vec{k}}{\kappa} \frac{\partial \sigma}{\partial k} + \vec{U}, \quad (5)$$

Difrakcija je predstavljena parametrom:

$$\delta_E = \frac{\nabla \cdot (c c_g \nabla \sqrt{E})}{\kappa^2 c c_g \sqrt{E}}. \quad (6)$$

$E=E(\omega, \theta)$ – Energija spektra valova

c je fazna brzina (ω/κ); ω - valna frekvencija; κ parametar separacije definiran na osnovi izraza:

$$\omega^2 = g \kappa \tanh(\kappa d), \quad (7)$$

g – ubrzanje sile teže, d – dubina vode

Ako je parametar difrakcije δ_E zanemaren, jednačbe (2-4) postaju jednačbe propagacije valova u interakciji s morskim strujama. Broj odvajanja κ je jednak valnom broju k .

5. PRILAGODBA I RAZVOJ PROCEDURA ZA KORIŠTENJE STRUCTURE-FROM-MOTION (SfM) FOTOGRAMetriJE NA MINIjATURNIM ŠljUNČANIM ŽALIMA.

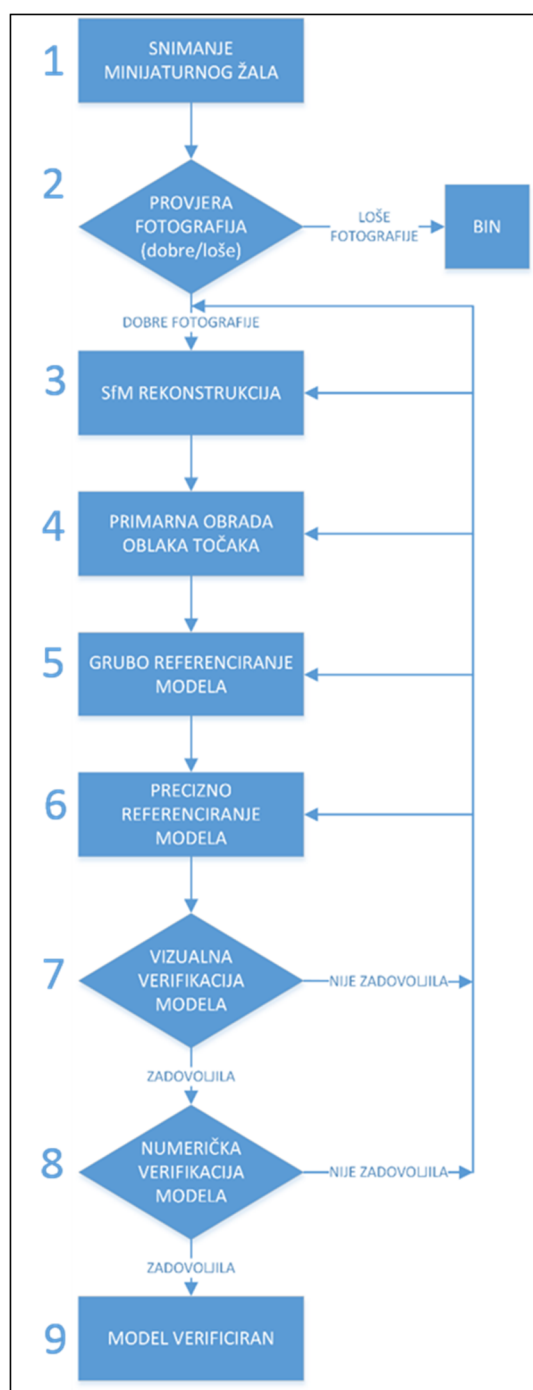
Ovo poglavlje sintetizira prilagodbu SfM metodologije za geomorfološka istraživanja šljunčanih minijturnih žala. Morfološke promjene minijturnih šljunčanih žala odvijaju se brzo, izrazito su prostorno i vremenski promjenjive. Migracija sedimenta ovisi o karakteristikama žala i nizu čimbenika koji djeluju na žalo, kao što su djelovanje valova, istjecanje bujični voda, ograničenja migracije sedimenta zbog morfologije uvale i sl. Istjecanjem slatkih voda dolazi do formiranja privremenog toka voda na žalu, koje se mijenja ovisno o djelovanju valova i protocima otjecanja, što je opisano u poglavlju 7. Šljunčana žala mogu imati velike varijacije poprečnih i uzdužnih nagiba, zbog čega su njihove promjene oblika trodimenzionalnog karaktera. Zbog toga promjene minijturnih šljunčanih žala nije moguće pratiti preko karakterističnih poprečnih presjeka, kao kod dugačkih pješćanih žala, već je potrebno pratiti čitavo tijelo žala.

U ovom radu razvijen niz metodoloških procedura sukladno specifičnostima morfodinamike minijturnih šljunčanih žala. Mjerenja topografije žala i okolnog priobalja kao što su stijene, klifovi i spilje, provedea su uz pomoću SfM fotogrametrije. To je složen zadatak budući da se radi o metodologiji u razvoju, čije su primjene u geomorfologiji tek naznačene nekolicinom pionirskih radova (James i Robson, 2012; Westoby i dr.; 2012). Do sad nema objavljenih radova primjene SfM fotogrametrije na istraživanju promjena morfologije žala. Jedan od razloga može biti činjenica da SfM fotogrametrija nije povoljna za snimanje velikih pješćanih žala (James i Robson, 2012).

Trodimenzionalni oblaci točaka, dobiveni pomoću laserskog radara (LIDAR), imaju sve veću primjenu u geomorfološkim istraživanjima pa tako i u istraživanjima žala. Trodimenzionalni oblak točaka najčešće se koristi za izradu digitalnog elevacijskog modela (DEM) žala, iz kojeg se mogu odrediti morfološki parametri žala. Jedan od ciljeva ovog doktorata je razvoj metode za mjerenje topografije žala koja će biti bazirana na SfM fotogrametriji zbog njene pristupačnosti.

5.1. Dijagram toka snimanja minijaturnog žala pomoću SfM fotogrametrije

U sklopu ovog rada provedena su mnogobrojna snimanja žala SfM fotogrametrijom i obrade dobivenih podataka. SfM metodologija isprobana je na više žala različitih veličina, oblika i karakteristika sedimenta na području Kvarnera. Tijekom provedenih istraživanja eksperimentiralo se s primjenom SfM fotogrametrije i načinom obrade podataka, što je dovelo do usavršavanja procesa snimanja, te razvoja i prilagodbi procedura obrade potaka. Na osnovi prikupljenih iskustava predložen je dijagram toka snimanja topografije minijaturnog šljunčanog žala pomoću SfM fotogrametrije (slika 5.1.)

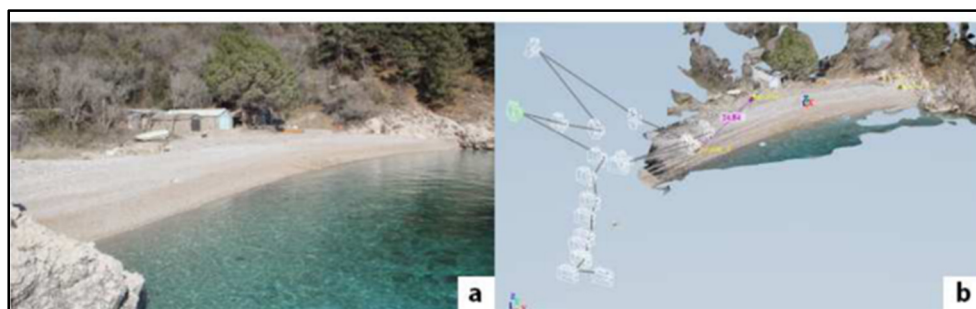


Slika 5.1. Dijagram toka snimanja minijaturnog žala pomoću *Structure-from-Motion* (SfM) fotogrametrije

Uspješnost SfM rekonstrukcije u prvom redu ovisi o kvaliteti fotografija i uvjetima na terenu prilikom snimanja. Snimanje žala treba provesti kada je čim veći dio žala iznad morske razine, odnosno zone djelovanja valova. Mutne i zrnate fotografije nisu povoljne za rekonstrukciju. Neka žala imaju zrna šljunka izrazito bijele boje, zbog čega

može doći do nepovoljne refleksije svjetlosti. Da bi se to izbjeglo preporuča se snimati žala za oblačnog vremena ili u doba dana kad je povoljno osvijetljene.

Tijekom snimanja fotografija žala za ovo istraživanje, cilj je bio snimiti dobro fokusirane fotografije, povoljnog osvjetljenja. ISO postavke senzora su bile u rasponu od 80 do 120, a kao format datoteka fotografija odabran je JPEG. Žala su snimana s različitim brojem fotografija od 5 do 250 fotografija po žalu dužine oko 100 metara. Snimanja žala treba detaljno isplanirati da bi se dobili što bolji rezultati ovisno o uvjetima. Preporuča se izvođenje probnog snimanja s ciljem upoznavanja terena i mogućih ovdje opisanih ograničenja. Na osnovi probnog snimanja treba razviti sistematski 'hod kamere', te definirati pogodne vremenske prilike za snimanje. Slika 5.2., prikazuje fotografiju žala i foto-realistični oblak točaka žala sa lokacijama snimanja žala Uboka.

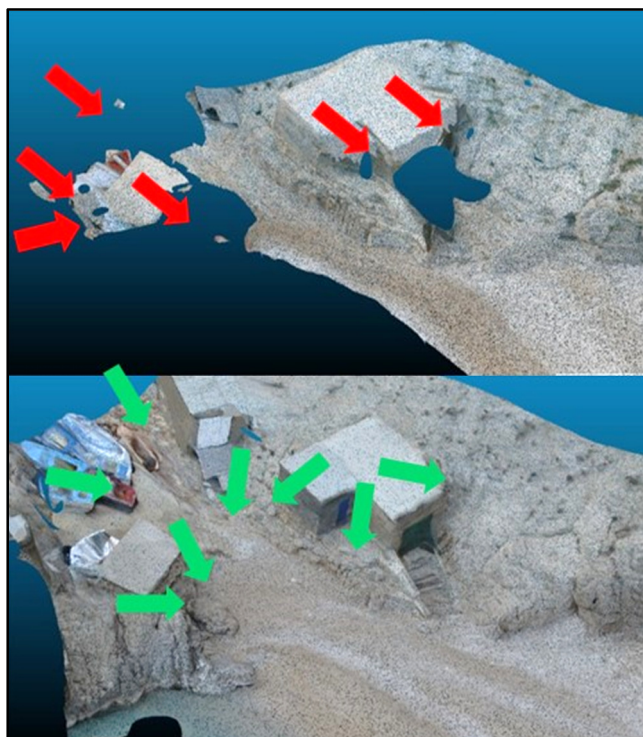


Slika 5.2. Rekonstrukcija minijalnog šljunčanog žala pomoću SfM fotogrametrije. a – fotografija žala u uvali Uboka, b – lokacije snimanja niz fotografija (James i dr. 2013.)

Nakon snimanja, slijedi vizualni pregled snimljenih fotografija s ciljem uklanjanja onih koje bi mogle ugroziti SfM rekonstrukciju. Potrebno je ukloniti sve fotografije koje nisu fokusirane, nemaju zadovoljavajuću oštrinu i teksturu, te na kojima se nalaze objekti u pokretu.

Trodimenzionalni oblaci točaka mogu sadržavati dio scene koji nije snimljen zbog prepreka na terenu između točke snimanja i objekta. Taj dio scene naziva se projekcija u sjeni (*shadow projection*). Jedna od prednosti korištenja SfM fotogrametrije u odnosu na LIDAR je minimalni udio ili nepostojanje projekcija u sjeni ukoliko je snimanje dobro isplanirano i provedeno. Kod LIDAR snimanja kompleksnih morfologija potrebno je promijeniti više točaka snimanja da bi se izbjegle projekcije u sjeni (Brodu i Lague, 2012). Minijalna žala istražena u ovom radu imaju složenu morfologiju i veći broj

objekata koji prekrivju dio žala iz pojedinih lokacija fotografiranja. Projekcije u sjeni različito snimljenih oblaka točaka prikazane su na primjeru žala Klančac (slika 5.3.).



Slika 5.3. Trodimenzionalni oblaci točaka žala Klančac, snimljeni 30.10.2013. (crvena) i 18.11.2013. (zeleni). Strelicama su prikazane pojednostavljene pozicije i kutovi snimanja fotografija

Oblak točaka snimljen 30.10.2013. ima značajan udio projekcije u sjeni uz objekte na žalu. Fotografije su snimljene paralelno sa žalom, cilj snimanja je bilo tijelo žala, ali nije obraćena pažnja na objekte uz žalo. To je rezultiralo da generirani oblak točaka ne sadrži dijelove žala na istočnom dijelu, koji su u projekciji sjene (slika 5.3.). Pregledom rezultata (oblaka točaka) i načina snimanja fotografija došlo se do zaključka da je potrebno snimiti žalo i objekte uz žalo iz više horizontalnih i vertikalnih kutova (slika 5.3.) da bi se dobio cjelovit trodimenzionalni oblak. Oblak točaka snimljen 18.11.2013. obuhvatio je čitavo žalo i objekte uz žalo.

U ovom radu korišteni su Autodeskovi SfM servisi:

- ReCap (<https://recap360.autodesk.com/signin.aspx>)
- 3DCatch (<http://www.123dapp.com/catch>).

Autodeskovi servisi provode proračune SfM algoritma na mrežnom super računalu, korisnik prikupljene fotografije učita na Autodeskov servis. Tijekom istraživanja pokazalo se da nije potrebno snimati fotografije visoke rezolucije (veće od 10 Mb).

5.2. Primarna obrada oblaka točaka

Nakon što je 3D oblak točaka generiran potrebno ga je prilagoditi potrebama istraživanja. Inicijalna ReCap SfM rekonstrukcija oblaka točaka je u OBJ (*object*) format. Definirana je trodimenzionalna geometrija mreže rekonstruiranog objekta, položajem svakog vrha, koordinatama i normalama točaka tekstone svakog poligona. Ti podaci prebacuju se u oblak točaka - LAS format. LAS format razvijen je od strane Američkog društva za fotogrametriju i daljinska istraživanja (ASPRS), te je standardni format za razmjenu LIDAR podataka.

Inicijalni oblaci točaka generirani SfM fotogrametrijom u pravilu sadržavaju previše neunificiranih podataka. Snimljena područja i gustoće točaka su različite. U primarnoj obradi oblaka točaka odstranjuju se dijelovi modela izvan zone interesa istraživanja kao i rubni dijelovi modela koji mogu biti distorzirani. Gustoća modela (broj točaka) reducira se ovisno o potrebama istraživanja. U provedenim istraživanjima koristila se gustoća točaka međusobne udaljenosti točaka od 1 do 5 cm. Prosječan broj točaka po dužnom metru profila je oko 50, što je prikazano kasnije u ovo poglavlju. Prevelik broj točaka može značajno usporiti sve numeričke obrade oblaka točaka. U ovom radu istraživanje žala bazirana su na uzastopnim mjerenjima jednog žala, te su se izmjereni oblaci točaka unificirali.

5.3. Georeferenciranje 3D oblaka točaka

SfM fotogrametrija generira trodimenzionalne oblake točaka u relativnom koordinatnom sustavu. Oblake točaka potrebno je transformirati u apsolutni koordinatni sustav da bi se mogle provesti analize nastalih promjena, te da bi se podaci mogli usporediti s drugim podacima istraživanog područja, kao što su rezultati numeričkih simulacija valova i sl. Transformacija oblaka točaka iz relativnog u apsolutni koordinatni sustav zasniva se na manualnoj ili automatskoj identifikaciji zemaljskih kontrolnih točaka poznatih koordinata (*ground control points* - GCP) na oblaku točaka

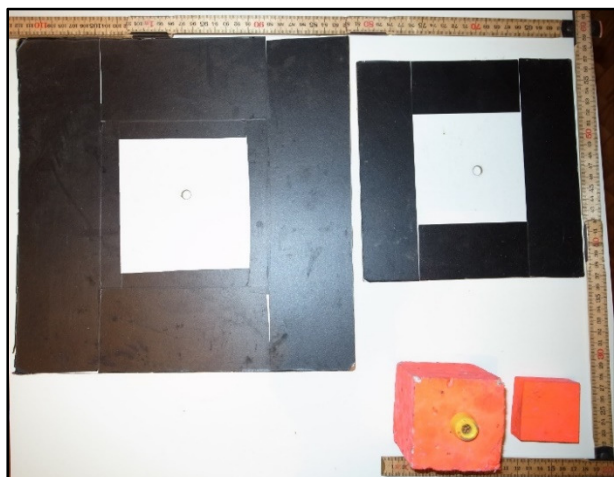
i primjenom odgovarajuće transformacije (Westoby i dr. 2012). Oblaci točaka se georeferenciraju na osnovi koordinata GCP, koje se mjere geodetskim instrumentom. Za provođenje uspješne transformacije relativne koordinate GCP moraju se jednoznačno detektirati i označiti na oblaku točaka. Georeferenciranja u ovom radu provedena su u programu CloudCompare (www.danielgm.net/cc/).

Grubo referenciranje modela zasniva se na odabiru tri ili četiri približno identične točke na referentnom modelu i modelu koji je u postupku referenciranja. Grubo referenciranje je priprema za precizno referenciranje modela, omogućuje lakše pronalaženje parova kontrolnih točaka (GCP).

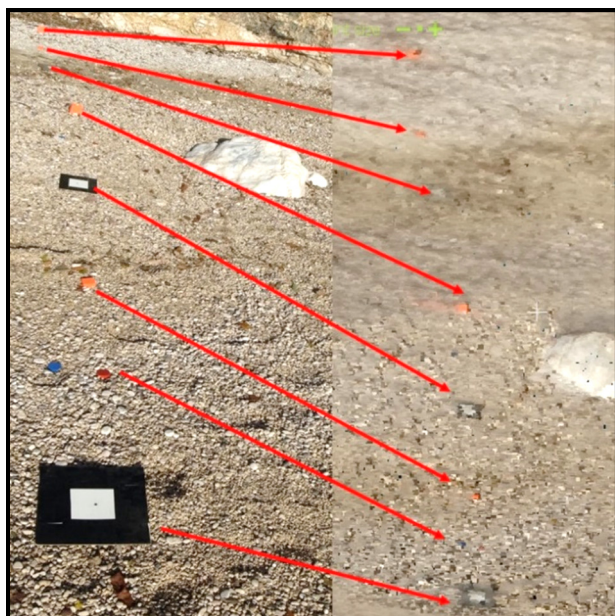
Precizno referenciranje modela provodi se preciznim odabirom kontrolnih točaka referencirajućeg i referentnog modela. Minimalan broj korespondentnih točaka je tri. U ovom radu nastojalo se koristiti minimalno 4 GCP točaka, smještenih na rubovima žala ili na obližnjim stijinama. Neki SfM servisi omogućuju definiciju koordinati kontrolnih točaka na odabranim fotografijama, što rezultira gotovim georeferenciranim oblacima točaka, u tom slučaju grubo i precizno referenciranje modela nije potrebno provoditi.

Tri su standardna pristupa georeferenciranja trodimenzionalnih oblaka točaka deriviranih pomoću laserskih skenera i fotogrametrije: indirektno, direktno i automatsko (Schuhmacher i Böhm, 2005; Harwin i Lucieer, 2012). U ovom radu oblaci točaka su georeferencirani indirektnim metodama. Automatska metoda referenciranja korištena je kod modela žala Klančac, što je detaljnije opisano u poglavlju 6.

Kako bi se ispitala preciznost georeferenciranja modela tijekom provedenog istraživanja korišteno je nekoliko tipova GCP markera (slika 5.4.), različitih boja i dimenzija. Pokazalo da veličina GCP mora biti sukladna površini snimljenog područja, gustoći oblaka točaka i zahtijevanom preciznošću. Vidljivost GCP postiže se na osnovi njihove veličine i kontrasta između žala i GCP ili unutar same GCP.



Slika 5.4. Primjer korištenih zemaljskih kontrolnih točaka (*ground-control-points (GCP)*)



Slika 5.5. Korištene zemaljske kontrolne točke (GCP) na fotografiji i foto-realističnom oblaku točaka.

Na slici 5.5. prikazane su GCP na fotografiji i foto-realističnom oblaku točaka deriviranom iz niza fotografija. Korištene GCP lako se detektiraju na deriviranom oblaku točaka (slika 5.5.). Veće mete lakše su uočljive, no mogu generirati i veću grešku u postupku referenciranja. Utjecaj veličine i oblika GCP na preciznost georeferenciranja modela istražena je kasnije u ovom poglavlju.

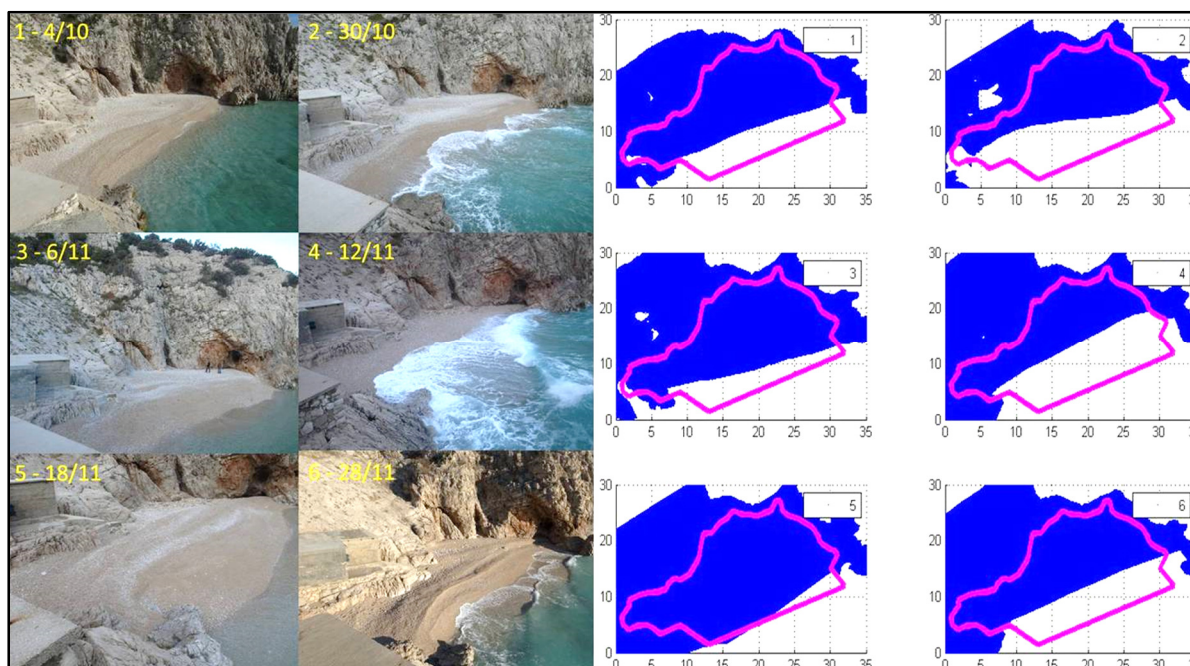
Promjena oblika minijturnih šljunčanih žala istražene su uzastopnim mjerenjima oblaka točaka žala. Na žalu Klančac kod Brseča poznate kontrolne točke (GCP) označene su crvenom bojom na fiksnim objektima, slika 5.6. prikazuje njihov prostorni

raspored. Te točke korištene su za georeferenciranje 3D oblaka točaka uzastopnih mjerenja. Fiksne GCP omogućile su brzo i jednostavno provođenje mjerenja žala Klančac u svega petnaestak minuta.



Slika 5.6. Fiksne kontrolne točke (GCP) na žalu Klančac kod Brseč označene su crvenim krugom

Georeferenciranje uzastopnih mjerenja minijturnog žala detaljno je opisano na primjeru žala Klančac kraj Brseča. Na slici 5.7. prikazane su fotografije žala i tlocrtni prikaz snimljenog georeferenciranog 3D oblaka točaka žala od 4.10.2013. do 28.11.2013.



Slika 5.7. Žalo Klančac (Brseč) tijekom provedenih istraživanja od 4.10.2013. do 28.11.2013. Desno je tlocrtni prikaz oblaka točaka sa granicama žala (ljubičasta)

Mjerenje br. 3 (11.2013.) je referentno mjerenje, kada su provedena usporedna mjerenja SfM fotogrametrijom i GPS uređajem, te su na osnovi tog mjerenja referencirani ostali modeli žala.

U ovom radu ispitana je primjena automatskih metoda referenciranja trodimenzionalnih oblaka točaka u programu CloudCompare. Precizna registracija oblaka točaka zasniva se na *Iterative Closest Point (ICP) algoritmu* (Besl i McKay, 1992). Algoritam automatski referencira oblak točaka identičnim dijelovima scene referentnog i referencirajućeg oblaka točaka. Oblaci točaka moraju biti referencirani i značajan dio scene treba se preklapati da bi se mogao primijeniti ICP algoritam. Minijaturno žalo okruženo je nepokretnim dijelovima scene kao što su stijene i drugi nepomični objekti, na kojima se temeljilo automatsko referenciranje modela uzastopnih mjerenja. Prvi pokušaji primjene automatskog referenciranja oblaka točaka bazirao se na transformacijskim parametrima dobivenih iz snimljenih oblaka točaka žala s kojih je uklonjeno žalo, kao promjenjivi dio scene (slika 5.21.). Takav pristup nije polučio zadovoljavajuće rezultate na dijelovima scene koji nisu uniformno rekonstruirani u svim oblacima točaka. Nakon toga, parametri transformacije ICP algoritma ograničeni su na dijelove scene koji su snimljeni na svim oblacima točaka. Na taj način postignuta su značajna poboljšanja prilagodbe oblaka točaka uzastopnih mjerenja, što je prikazano kasnije u ovom poglavlju.

5.4. Verifikacija georeferenciranih 3D oblaka točaka i preciznost modela

Georeferencirani trodimenzionalni oblaci točaka provjeravaju se u postupku verifikacije modela. Tada se provjerava dali je došlo do pogreška tijekom generiranja i georeferenciranja modela, te se definira preciznost modela. Preciznost pojedinog modela važan je parametar prilikom tumačenja rezultata morfoloških promjena. U ovom radu korištene i razvijene su vizualne i numeričke metode verifikacije oblaka točaka. Vizualna verifikacija modela promptno detektira moguće grublje greške generiranih oblaka točaka (Podobnikar, 2009). Ukoliko model ne zadovoljava vizualnu verifikaciju, potrebno je ponovno provesti odabir fotografija, SfM rekonstrukciju i georeferenciranje. Numerička verifikacija modela zasnivana je na usporedbi

nepokretnih dijelova oblaka točaka modela koji se referencira s referentnim modelom ili usporedbe modela s GPS mjerenjima.

5.4.1. Verifikacija referentnog 3D oblaka točaka

Verifikacija trodimenzionalnih oblaka točaka temelji se na vertikalnom odstupanju točaka mjerenih RTK-GPS uređajem i SfM fotogrametrijom na identičnim prostornim koordinatama (X i Y). Nominalna preciznost RTK-GPS uređaja povezanog na CROPOS sustav je 2 cm vertikalno i 4 cm horizontalno (Državna Geodetska Uprava (DGU), 2014).

Ako se RTK-GPS točke označe: X^{GPS}_i , Y^{GPS}_i , Z^{GPS}_i , točke oblaka točaka: X^{3DPC}_i , Y^{3DPC}_i , Z^{3DPC}_i tada je vertikalna razlika visina (odstupanja) u mjerenoj GPS točki:

$$\Delta Z_i = \text{abs}(Z^{3DPC}_i(X^{GPS}_i, Y^{GPS}_i) - Z^{GPS}_i)$$

ΔZ_i – vertikalno odstupanje točke mjerene GPSom i oblakom točaka

$Z^{3DPC}_i(X^{GPS}_i, Y^{GPS}_i)$ – visina točke oblaka točaka u koordinatama (X^{GPS}_i , Y^{GPS}_i)

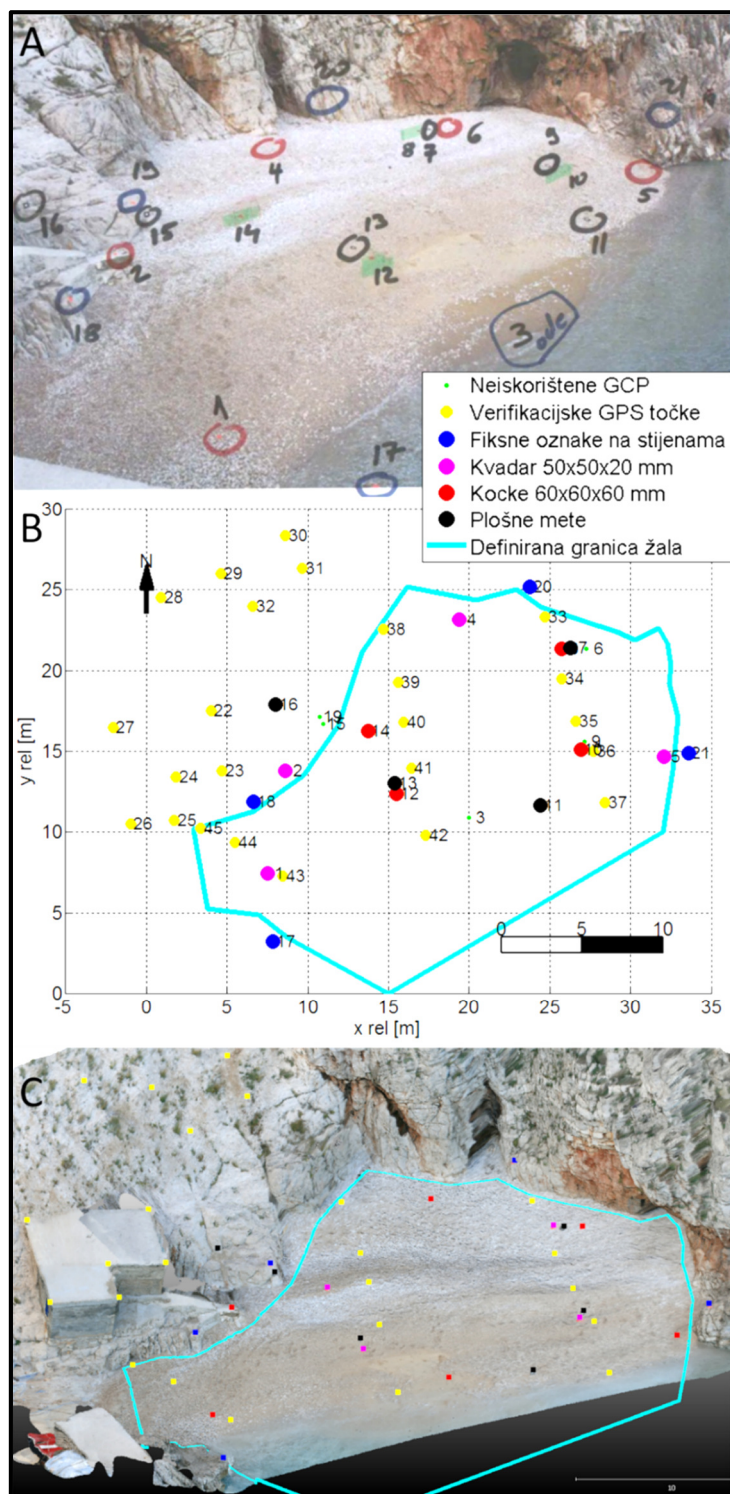
Z^{GPS}_i – visina točke mjerene GPSom

Na osnovi vertikalnog odstupanja verifikacijskih točaka 3D modela žala Klančac mjerenja broj 3 (6.11.2013.), ispitan je utjecaj četiri tipa GCP (slika 5.4. i 5.5.) na preciznost georeferenciranja oblaka točaka, kroz četiri scenarija georeferenciranja i verifikacije modela. Tipovi i redni brojevi točaka pojedinog scenarija prikazani su u tablici 5.1. Za verifikaciju modela korištene su 24 verifikacijske točke izmjerene pomoću GPS uređaja, od kojih je 13 unutar definirane površine žala (slika 5.8.).

Tablica 5.1. Pregled kontrolnih (GCP) i verifikacijskih točaka. Korištene GCP su označene sivom bojom.

Scenarij	Vrsta Točke	Redni broj točke					
I	Fiksne oznake na stijenama	17	18	19	20	21	
II	Kvadar dim.: 50x50x20 mm	1	2	3	4	5	6
III	Kocke dim.: 65x65x65 mm	8	10	12	14		
IV	Pravokutne ploče dim.: 100x100 - 200x200mm	7	9	11	13	15	16
Kontrolne GPS točke na žalu		33-45					
Kontrolne GPS točke izvan žala		22-32					

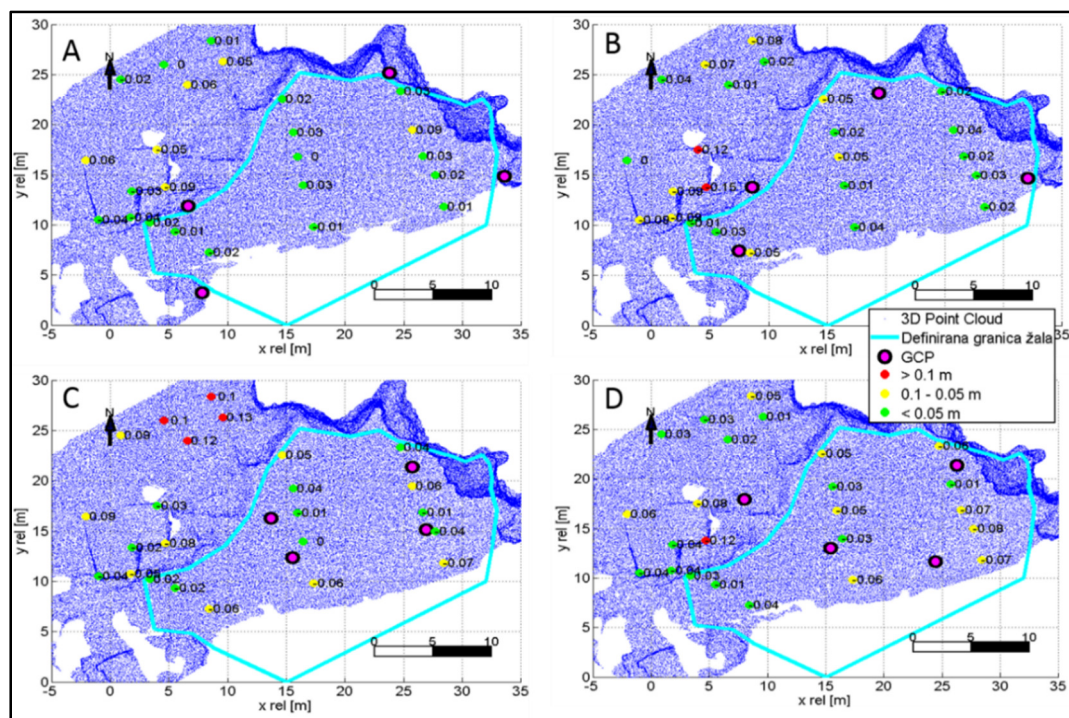
Raspored GCP i verifikacijskih točaka prikazan je na radnoj fotografiji, tlocrtnoj dispoziciji i 3D oblaku žala Klančac (slika 5.8.).



Slika 5.8. Prostorna raspodjela GCP i verifikacijskih točaka, prikazani na radnoj fotografiji 6.11.2013 (A), tlocrtnom rasporedu (B) i trodimenzionalnom foto realističnom oblaku točaka (C).

Slika 5.8.A. je radni ispis fotografije s terena, označene su kontrolne i verifikacijske točke s rednim brojem mjerenja. Kontrolna točka broj tri (drveni kvadar) stavljena je uz samu obalnu crtu zbog boljeg rasporeda kontrolnih točaka, no odnesena je valom

nastalim prolaskom broda. Validacija svakog georeferenciranog modela temeljena je na vertikalnom odstupanju točaka modela i verifikacijskih GPS točaka. Na slici 5.9. prikazane su korištene GCP i vertikalna odstupanja verifikacijskih točaka svakog od ispitanih scenarija validacije trodimenzionalnih oblaka točaka.



Slika 5.9. Vertikalna odstupanja (m) verifikacijskih točaka četiri ispitana scenarija korištenja različitih tipova GCP (crveno ljubičasti krug)

A) Scenarij I: fiksne oznake, RMSE = 4 cm ;

B) Scenarij II: kvadar dim.: 50x50x20 mm, RMSE = 6 cm ;

C) Scenarij III: kocke dim.: 65x65x65 mm, RMSE 7 = cm ;

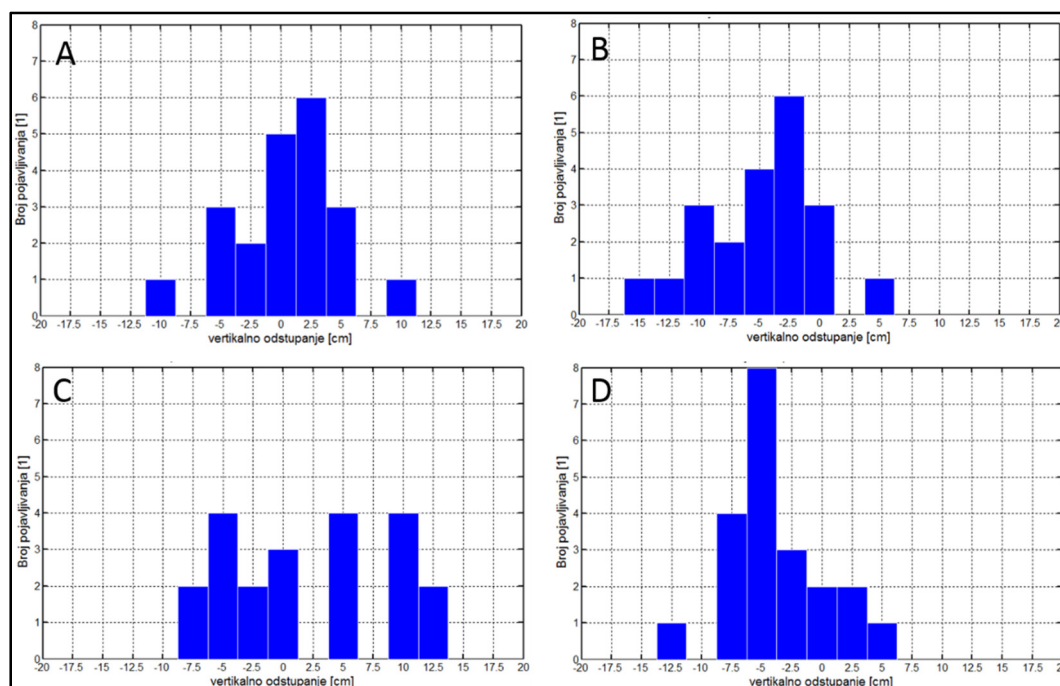
D) Scenarij IV: pravokutne ploče dim.: 100x100 - 200x200mm, RMSE 5 = cm ;

Na slici 5.9. prikazano je vertikalno odstupanje verifikacijskih točkama pojedinog modela s označenim kriterijima odstupanja. Kriterij vertikalnog odstupanja ovisi o ciljevima istraživanja, karakteristikama istraživanog područja i preciznosti korištene opreme. Za istraživanja žala Klanča, definirani kriteriji vertikalnog odstupanja modela u verifikacijskim točkama prikazani su u tablici 5.2. Vertikalno odstupanje definirano je za svaku točku, te korijen srednjeg kvadrata pogreške (RMSE) vertikalnog odstupanja svih verifikacijskih točaka.

Tablica 5.2. Kriteriji vrednovanja vertikalnog odstupanja 3D modela u verifikacijskim točkama

Vertikalno odstupanje		
Definicija	Kriterij	Oznaka
Dobro	$\leq 5\text{cm}$	Zelena
Srednje	5-10cm	Žuta
Loše	$\geq 10\text{cm}$	Crvena

Na slici 5.10. prikazani su statistički parametri vertikalnih odstupanja verifikacijskih točaka četiri ispitana scenarija.



Slika 5.10. Histogram vertikalnih odstupanja verifikacijskih točaka,
A) Scenarij I: fiksne oznake, RMSE = 4 cm ;
B) Scenarij II: kvadar dim: 50x50x20 mm, RMSE = 6 cm;
C) Scenarij III: kocke dim: 65x65x65 mm, RMSE 7 = cm;
D) Scenarij IV: pravokutne ploče dim: 100x100 - 200x200mm, RMSE 5 = cm;

Korijen srednjeg kvadrata pogreške (RMSE) i maksimalno vertikalno odstupanja verifikacijskih točaka ispitanih scenarija prikazani su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Korijen srednjeg kvadrata pogreške – RMSE (cm) i maksimalno (cm) vertikalno odstupanja verifikacijskih točaka ispitanih scenarija georeferenciranja oblaka točaka žala Klančac (Brseč)

Scenarij	Sve verifikacijske točke N=23		Verif. točke unutar granice žala N=13		Verif. točke izvan granice žala N=11	
	RMSE	MAX	RMSE	MAX	RMSE	MAX
I	4.0	8.9	3.2	8.9	4.9	6.3
II	6.0	15.0	3.3	3.6	8.2	0.1
III	6.6	13.1	4.4	6.2	8.5	13.1
IV	5.2	6.1	4.9	3.3	5.5	6.1

Scenarij I (fiksne oznake)

Trodimenzionalni oblak točaka georeferenciran je pomoću četiri fiksne oznake na stijeni. Te oznake su korištene i za georeferenciranje uzastopno snimljenih modela. Na slici 5.11. prikazane su GCP 18 i 19.

**Slika 5.11. Kontrolne točke - fiksne oznake na stijenama 18 i 19 (slika 5.7.), snimljeno 18.11.2013.**

Za georeferenciranje modela korištene su četiri točke (17, 18, 20 i 21), iako je definirano 5 fiksnih GCP (tablica 5.1), zbog uniformnosti eksperimenta. Fiksne GCP postavljene su na stijenama neposredno uz granicu žala (slika 5.8. i 5.11.). Sve verifikacijske točke na žalu (33-45) mogu se smatrati interpolirane između kontrolnih točaka. Korijen srednjeg kvadrata pogreške (RMSE) vertikalnog odstupanja svih verifikacijskih točaka je 4,0 cm, točaka unutar žala (33-45) 3,2 cm, ekstrapoliranih točaka (22-33) 4,9 cm. Verifikacijska točka 34 ima najveće vertikalno odstupanje od svih točaka unutar definirane površine žala (9 cm). Ta točka je postavljena ispod

samog klifa, zbog čega postoji mogućnost pogreške RTK-GPS mjerenju zbog lošijeg prijema signala.

Rezultati vertikalnih odstupanja zabilježeni na verifikacijskim točkama unutar definiranih granica žala su (RMSE=3,2 cm) manji od nominalno definirane vertikalne preciznosti GPS uređaja (4 cm), povezanog na CROPOS sustav (DGU, 2014).

Scenarij II (kvadar dimenzija 50x50x20 mm)

Za georeferenciranje modela korištena su četiri kvadra, dimenzija 50x50x20 mm (točke 1, 2, 4 i 5, slika 5.8. i 5.9., tablica 5.1.). GCP su postavljene na rubovima žala i sve verifikacijske točke (33-45) unutar granice žala su interpolirane (slika 5.8. i 5.9.B.). RMSE vertikalnih odstupanja svih verifikacijskih točaka je 6,0 cm, točaka unutar granice žala je 3,3 cm (slika 5.9.B.). Najveća vertikalna odstupanja su na samom rubu krova (22-26), koji se nalazi izvan istraživanog područja. Vertikalna odstupanja unutar granica žala su identična odstupanjima zabilježenim u prvom scenariju.

Scenarij III (kocke dimenzija 65x65x65 mm)

Za georeferenciranje modela korištene su betonske kocke dimenzija 65x65x65 mm. RMSE vertikalnih odstupanja svih verifikacijskih točaka je 6 cm, unutar žala 4,4 cm (slika 5.9.C.). Vertikalna odstupanja su neznatno veća od odstupanja scenarija I i II, što je posljedica visine samih GCP od 65 mm. Nešto lošiji rezultati mogu biti i posljedica rasporeda kontrolnih i verifikacijskih točaka (slika 5.8. i 5.9.C.), četiri verifikacijske točke (38,41,42,43) unutar žala su ekstrapolirane u samome modelu (slika 5.8.B.). Iako su zabilježena vertikalna odstupanja scenarija III nešto su veća (oko 1 cm) od odstupanja scenarija I i II, preciznost modela je i dalje zadovoljavajuća u odnosu na zabilježene promjene tijela žala Klančac (poglavlje 6). Kontrolne točke korištene u scenariju III su lako uočljive na trodimenzionalnom oblaku točaka zbog njihove veličine, zbog čega su pogodne kao GCP većih žala.

Scenarij IV (plošne mete dimenzija 100x100 – 200x200 mm)

Model je georeferenciran pomoću plošnih meti dimenzija 100x100 i 200x200 mm (slika 5.8.). Unutrašnja dimenzija bijelog kvadrata mete je 50x50 i 100x100 mm. RMES

vertikalnih odstupanja svih verifikacijskih točaka je 5,2 cm, točaka unutar žala je 4,9 cm. Mete se lako mogu prepoznati na trodimenzionalnom oblaku točaka zbog čega se mogu koristiti kao GCP većih žala. Povećanje preciznosti georeferenciranja žala može se postići smanjivanjem veličine mete ili dodavanjem polja u sredini mete, čime bi se preciznije odredile koordinate GCP na oblaku točaka.

Ispitani scenariji georeferenciranja 3D oblaka točaka žala korištenjem četiri različita tipa GCP dali su dobre rezultate verifikacije modela. Vertikalna odstupanja svih modela unutar definirane površine žala su manja od 5 cm, što je sukladno nominalno definiranoj preciznosti korištenog RTK-GPS uređaja. Srednja kvadratna greška kreće se u rasponu od 4,0 do 6,0 cm ovisno o korištenom tipu kontrolnih točaka ispitanih na polju od 22 neovisno odabrane točke od kojih je 11 izvan površine žale, koje se mogu smatrati ekstrapolirane. Te vrijednosti su slične rezultatima istraživanja Harwin i Lucieer (2012) (RMSE = 3,6 cm).

Raspored kontrolnih točaka ima značajan utjecaj na kvalitetu georeferenciranih modela. Svaki od četiri ispitana scenarija zasnovan je na četiri GCP koje su se pokazale dovoljne za primjer žala Klančac. Dodatno poboljšanje modela moguće je postići korištenjem većeg broja točaka te mjerenjem pozicije GCP pomoću totalne stanice (Harwin i Lucieer, 2012).

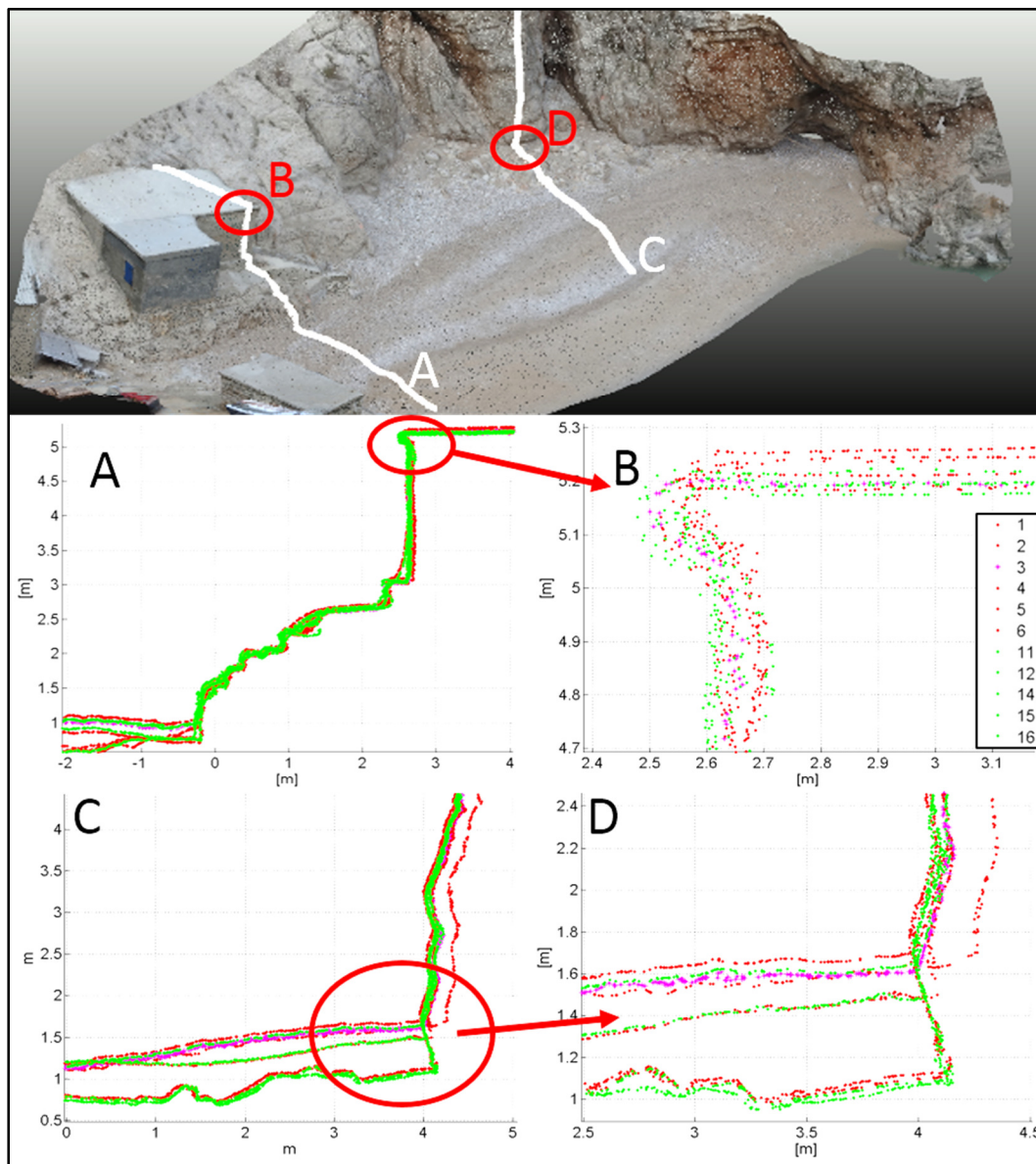
Horizontalna preciznost georeferenciranih oblaka točaka u ovom radu ispitana je vizualnom kontrolom odstupanja vertikalnih dijelova scene (slika 5.12.). Provjera vertikalne preciznosti modela moguća je u slučaju korištenja verifikacijskih točaka kod kojih se mogu očitati točne koordinate (Harwin i Lucieer, 2012). U ovom radu verifikacijske točke nisu posebno označavane tijekom provedenog mjerenja pomoću RTK-GPS uređaja, već su nasumično odabrane duž profila žala.

5.4.2. Verifikacija 3D oblaka točaka uzastopnih mjerenja žala

U ovom radu provedena su i analizirana uzastopna mjerenja topografije žala Klančac i Uboka. Oblaci točaka žala Klančac najprije su georeferencirani pomoću 5 fiksnih GCP (slika, 5.8. i 5.11.), da bi se nakon toga provelo i automatsko referenciranje oblaka točaka korištenjem ICP algoritma. Sve verifikacije 3D oblaka točaka uzastopnih

mjerenja zasnovane su na usporedbi s referentnim modelom mjerenja broj 3 (18.11.2012.), čija je verifikacija prethodno opisana.

Na slici 5.12. prikazana je usporedba dva karakteristična profila prije i nakon automatskog referenciranja modela.

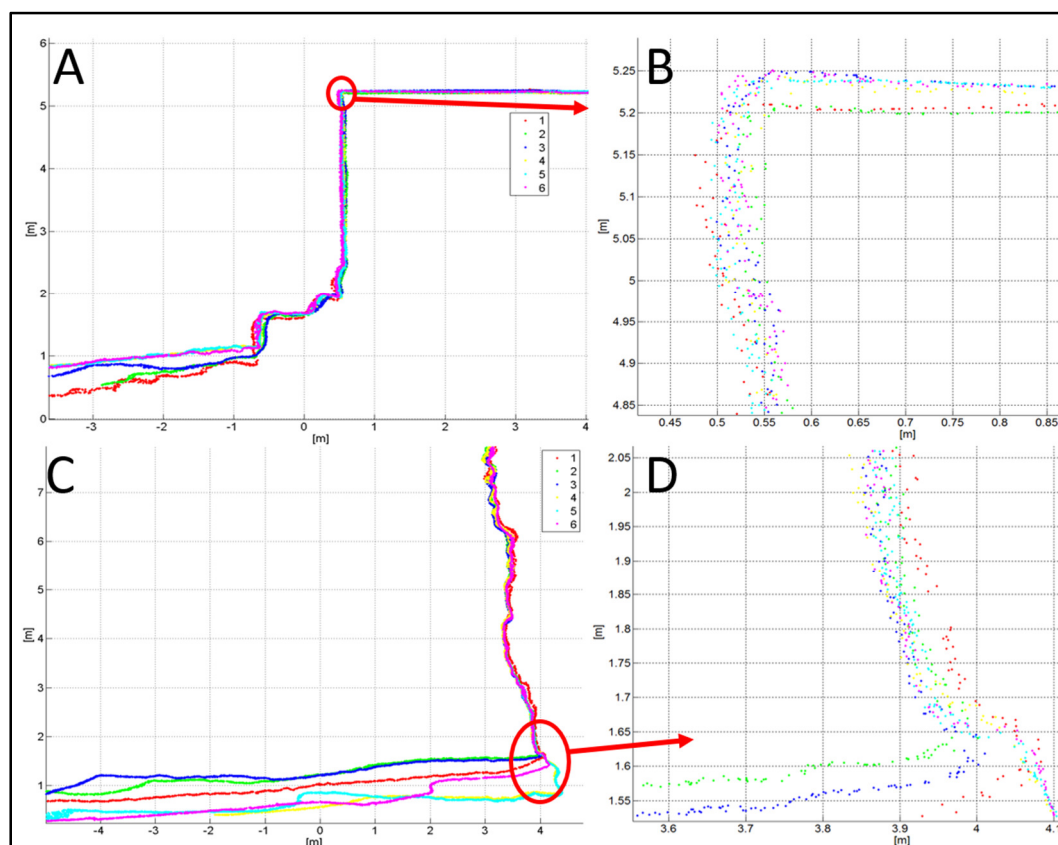


Slika 5.12. Poprečni presjeci derivirani iz oblaka točaka prije (crveno) i nakon (zeleno) primjene ICP algoritma u odnosu na referentno mjerenje broj 3 (ljubičasta). A – poprečni presjek sa prikazanim detaljem na objektu (B); C – poprečni presjek s prikazanim detaljem na granici stijene i žala (D)

Vizualno numerička verifikacije oblaka točaka uzastopnih mjerenja žala bazirana je na usporedbi slobodno odabranih poprečnih presjeka na fiksnim dijelovima scene kao što su stijene i objekti uz žalo. Razvijen je kod u programskom paketu Matlab koji omogućuje slobodno definiranje i ispis poprečnih presjeka iz oblaka točaka. Slika 5.12. prikazuje značajno smanjenje odstupanja profila deriviranih iz oblaka točaka nakon primjene automatskih metoda referenciranja. Vertikalna razlika (preciznost) mjerenih oblaka točaka na krovu fiksnog objekta prije primjene automatskog referenciranja je bila oko 8 cm, dok je ta razlika smanjena na oko 3 cm nakon automatskog referenciranja (slika 5.18.B.). Vertikalna preciznost nije znatno smanjena (više u poglavlju Diskusija).

Profil C deriviran iz mjerenja broj 1, prije primjene automatskog referenciranja znatno je odstupao od ostalih mjerenja (slika 5.12. C i D, profil odvojen od ostalih), da bi se ta razlika umanjila nakon primjene automatskog referenciranja. Oblaci točaka mjerenja 1 i 2 su georeferencirani pomoću karakterističnih dijelova scene bez korištenje fiksnih GCP, koji su postavljeni u mjerenju broj 3.

Na slici 5.13. prikazana su poklapanja profila žala Klančac nakon automatskog referenciranja modela. Vertikalna odstupanja oblaka točaka svih mjerenja na krovu objekta su manja od 4 cm, ako se izuzmu mjerenja 1 i 2, tada je vertikalna preciznost modela 2 cm. Horizontalna preciznost na fiksnom objektu profila A (slika 5.13.) je unutar 5 cm, dok je na profilu C oko 8 cm, odnosno 5 cm ako se izuzme mjerenje broj 1. Može se zaključiti da je horizontalna preciznost uzastopno mjerenih modela 5 cm, ukoliko se izuzme mjerenje broj 1 kada nisu korištene fiksne GCP. Vertikalno poklapanje modela je bolje od 4 cm. Nominalna preciznost modela je višestruko manja od zabilježenih morfoloških promjena žala, promjene visine žala su oko 60 cm u profilu C (slika 5.13.).

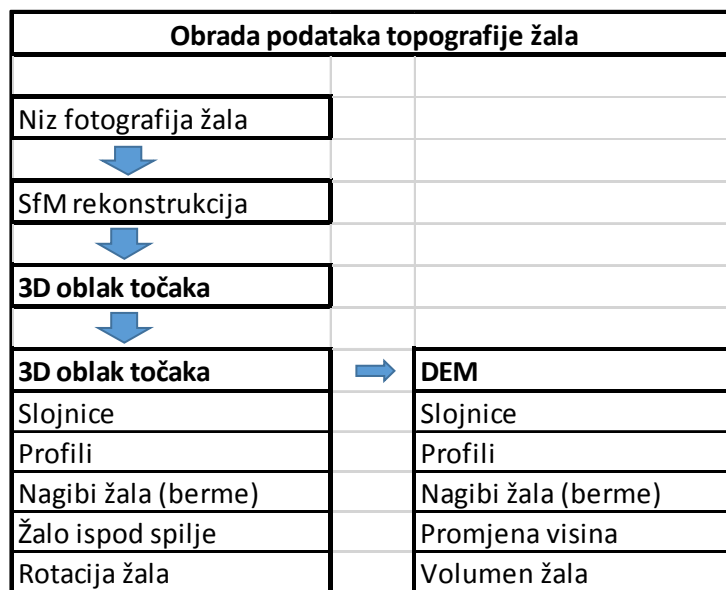


Slika 5.13. Poprečni presjeci derivirani iz oblaka točaka nakon primjene ICP algoritma. A – poprečni presjek s prikazanim detaljem na objektu (B); C – poprečni presjek s prikazanim detaljem na granici stijene i žala (D)

5.5. Primjena 3D oblaka točaka i digitalnog elevacijskog modela (DEM)

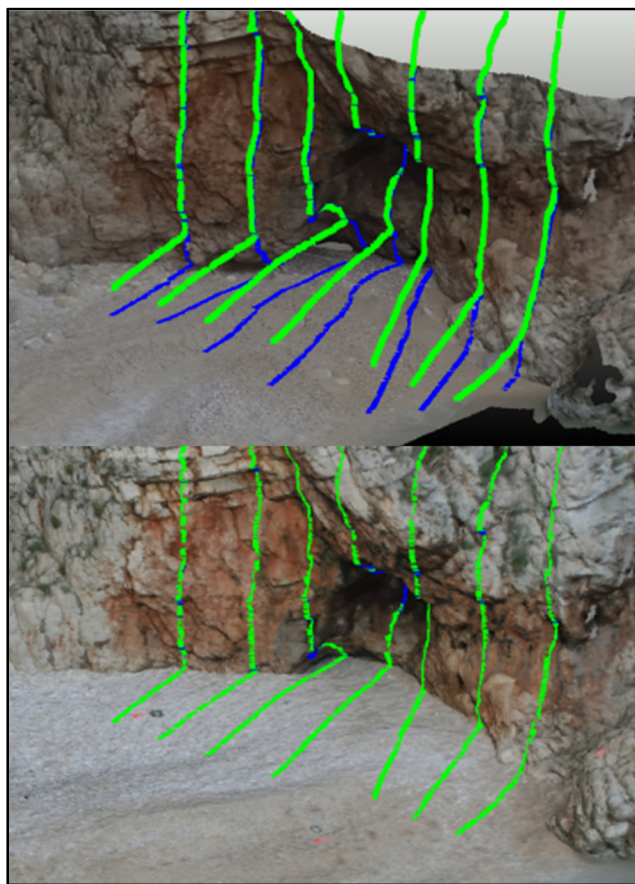
U ovom radu analize morfoloških promjena šljunčanih žala baziraju se na trodimenzionalnim oblacima točaka i DEM generiranim iz tih oblaka točaka.

DEM koriste pravilnu kvadratnu mrežu rasporeda točaka modela (*regular square grid* – RSG), svakom cijelom kvadratu može biti dodijeljena jedna visinska točka, što čini stepenasti model terena. Zbog toga nije moguće prikazati presjeke s više visina na istoj lokaciji pomoću DEMa. Slijed obrade podataka topografije žala prikazan je na slici 5.14.



Slika 5.14. Analize morfolo minijaturnih šljunčanih žala baziraju se na podacima deriviranim iz trodimenzionalnih oblaka točaka i DEM.

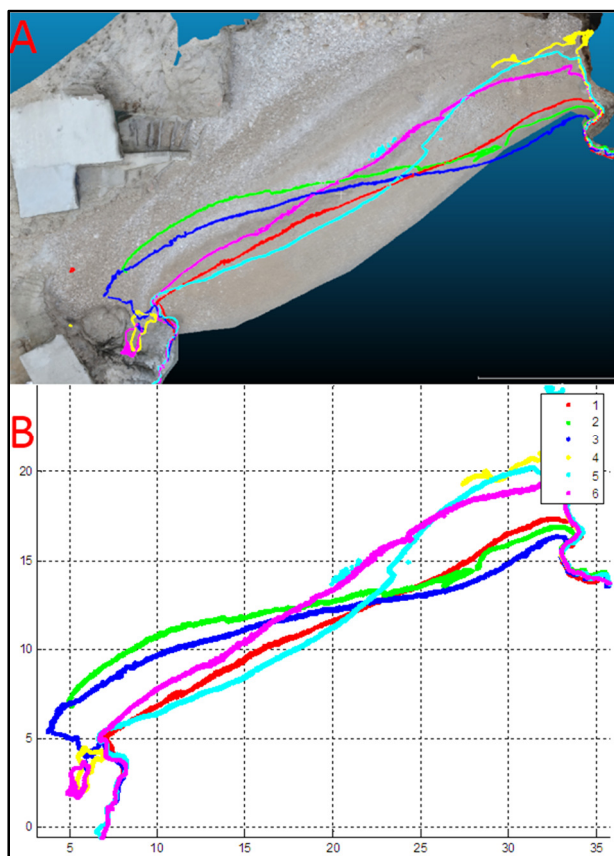
Trodimenzionalni oblaci točaka žala derivirani su pomoću SfM fotogrametrije iz niza fotografija, pružaju mogućnost foto-realističnog prikaza modela žala iz kojega se mogu očitati važni podaci, kao što su lokacije i dimenzije: stijene uz žalo, prodora slatke vode, vegetacije, objekta i slično (slika 5.8.C.). Iz oblaka točaka jednostavno je izvlačenje slojnica i profila koji prikazuju samo izmjerene točke i ne sadrže interpolacije. Pružaju mogućnost prikaza složenih profila u spilji (Slika 5.15.)



Slika 5.15. Primjer promjena složenog profila žala prikazan trodimenzionalnim oblakom točaka.

Iz oblaka točaka žala generiraju se DEM žala, koji imaju niz prednosti prilikom obrada podataka o samom tijelu žala. Matrični zapis visina tijela žala omogućuje jednostavne unificirane obrade i pohrane podataka. Iz DEMa jednostavno se obrađuju podaci o promjenama volumena i migracijama sedimenta žala, promjenama visina i nagiba žala. Slojnice žala mogu se generirati iz oblaka točaka i DEMa.

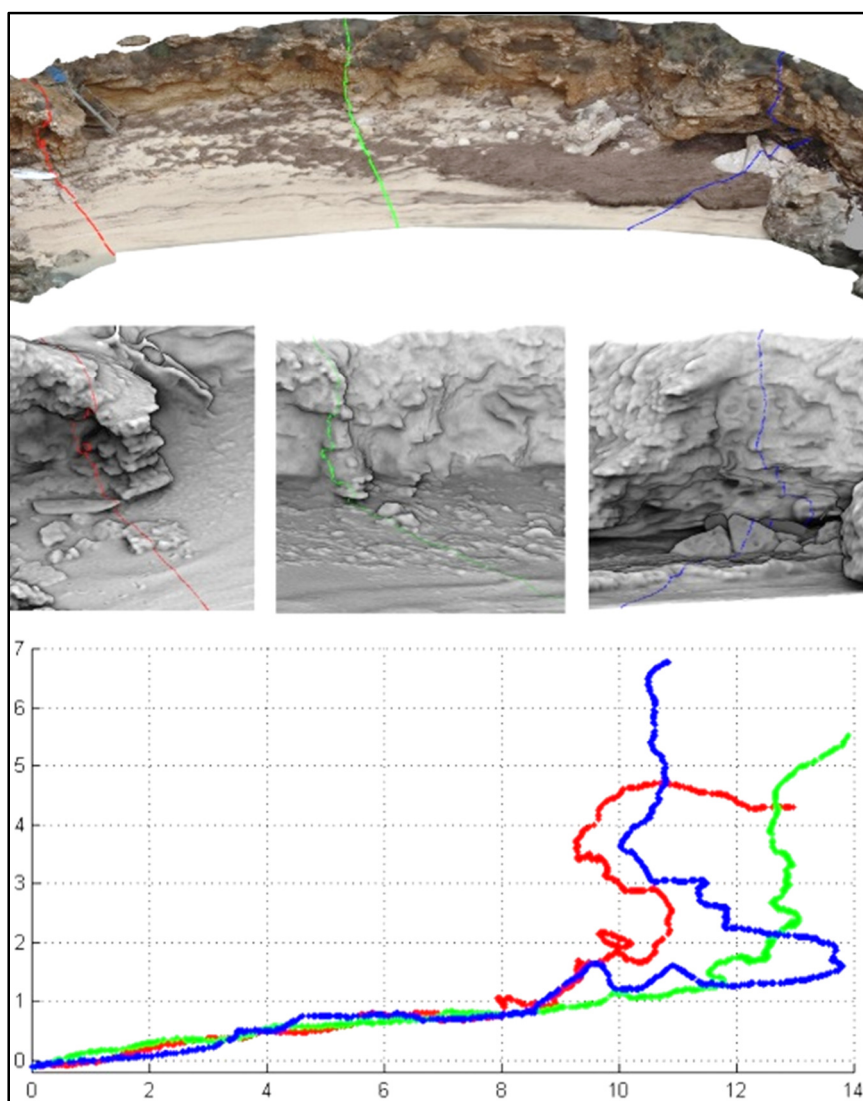
U ovom radu slojnice derivirane iz oblaka točaka korištene su kao kontrola interpolacije DEM minijaturnih šljunčanih žala, te za prikaz rotacije šljunčanog žala. Slika 5.16. prikazuje slojnice 0,30 m n.m. minijaturnog žala Klančac koje predstavljaju obalnu liniju žala pojedinog mjerenja.



Slika 5.16. Rotacija minijaturnog žala Klančac (Brseč) od 4.10.2013 do 28.11.2013, prikaz slojnice 0.30m na foto-realističnom oblaku točaka

Promjene obalne linije prikazane na 3D oblaku točaka (slika 6.16.A.) daju bolji uvid u odnos obalnih procesa i samog prostora. Slojnica mjerenja broj 4 (žuta) djelomično je prikazana, i to samo njezin izmjereni dio. To mjerenje je provedeno tijekom visokih valova (slika 5.7.) zbog čega čitava obalna linija visine 0.30 m nije snimljena.

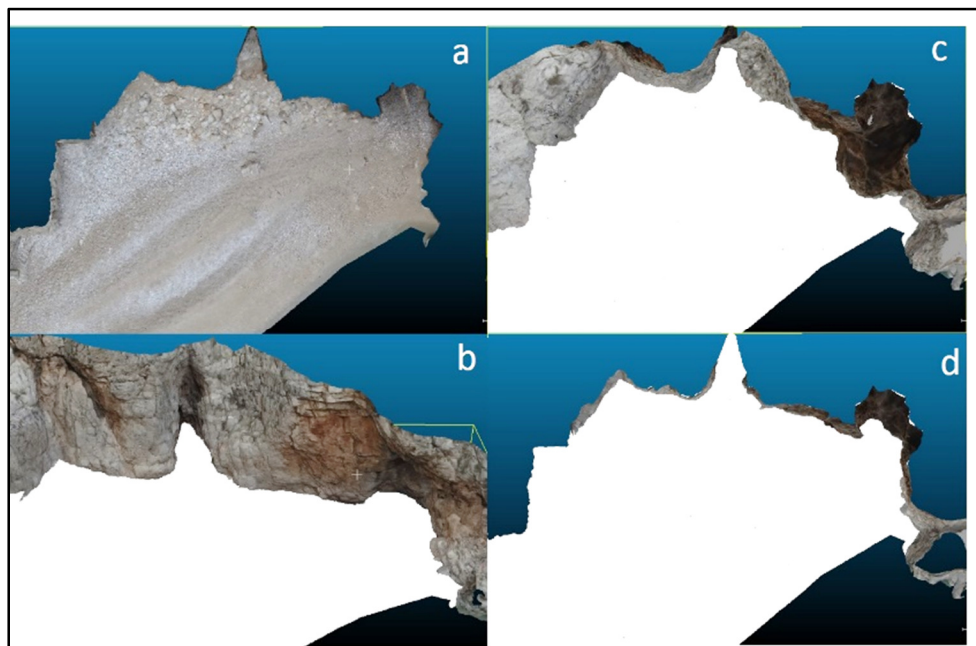
Slika 5.17. prikazuje prednosti primjene trodimenzionalnih foto-realističnih oblaka točaka za prikaz i obradu složenih profila obale sastavljene od žala i klifova.



Slika 5.17. Primjer profila žala i klifa generiranih iz 3D oblaka točaka (Stara Baška)

Profili žala i klifa generirani iz foto-realističnih 3D oblaka točaka pružaju informaciju o profilu u potkapini ispod klifa. Snaga SfM fotogrametrije je kombinacija foto-realističnog prikaza sa raznim mogućnostima analize oblaka točaka. DEM ne mogu prikazati niti jedan od tri profila prikazanih na slici 5.17. O kvaliteti i mogućnostima primjene trodimenzionalnih oblaka točaka najbolje svjedoči prikaz ostatka daske za surfanje na lijevom (crvenom) profilu, gdje je snimljen i prikazan čitav poprečni presjek daske.

Integracija volumena minijturnih šljunčanih žala, kakva prevladavaju na Kvarneru složen je zadatak zbog specifičnosti morfologije stijena uvale u kojoj su sedimenti žala akumulirani i pojave toka slatkih voda. Slika 5.18. prikazuje složenost morfologije minijturnog žala kroz odnos samog tijela žala i stijena.



Slika 5.18. Trodimenzionalni oblak točaka žala. a – oblak točaka tijela žala; b – ortogonalni prikaz oblaka točaka žala (bijelo) i okonih stijena; Tlocrtni prikaz žala i okonih stijena presjek na 7 m n.m.(c) i 2 m n.m.(d)

Na slici 5.18.a. prikazan je izdvojeni oblak točaka tijela žala, koji je na prikazima c-d označen bijelom bojom. Na slici 5.18.b. prikazane su stijene i akumulirani sedimenti (bijelo) u trodimenzionalnom prikazu na kome se jasno vidi granica žala i stijena. Na slici 5.18.c. prikazan je tlocrtni pogled na žalo i stijene. Prikazane su točke stijene niže od 7 m n.m. Na tom prikazu značajan dio žala je prekriven stijenama. Isti pogled (slika 5.17.d.) sa prikazanim točkama stijena do visine 2 m n.m. također ne prikazuje čitavo tijelo žala. Zbog toga promjene tijela žala ne mogu se pratiti generiranjem DEMa žala iz oblaka točaka prikazanih na slikama 5.18. c i d. Zbog pokrivenosti dijela žala, morfologija čitavog žala ne može biti snimljena pomoću avionskog snimka primjenom LIDARa ili fotogrametrije. Ispod stijena ne radi niti GPS uređaj zbog lošeg prijema signala satelitskog signala. Zbog toga praćenje morfologije prikazanog žala moguće je jedino pomoću 3D oblaka točaka deriviranih iz SfM fotogrametrije ili zemaljskog LIDARa.

U ovom radu razvijena je metodologija za integraciju volumena minijaturnog šljunčanog žala zasnovanog na DEM unutar definirane površine tijela žala. Oblak točaka tijela žala (slika 5.17.) odvaja se od snimljenog oblaka točaka, te se iz njega generira DEM tijela žala.

Volumen žala definiran je kao volumen sedimenta žala iznad srednje morske razine (SMR). U ovom radu volumen žala ne može se integrirati kao volumen sedimenta žala iznad SMR, zbog različitih uvjeta tijekom snimanja žala. Na slici 6.7. prikazane su snimljene konture žala Klančac kod Brseča tijekom provedenih mjerenja.

Kontura 0 m n.m. (-0.15 od SMR) snimljena je tijekom mjerenja broj 3 i 5, koja su provedena tijekom idealnih uvjeta za snimanje žala, odnosno oseke u kombinaciji s mirnim morem. Kontura 0.25 m n.m. (+0.10 od SMR) snimljena je tijekom mjerenja broj 1, 3, 5. Kontura 0.50 m n.m. sadrži i mjerenje broj 2, dok kontura 0.75 sadrži sva mjerenja.

Integraciju volumena žala potrebno je prilagoditi graničnim visinama snimljenih oblaka točak. Na slici 6.9 i tablici 6.2. prikazani su integrirani volumeni žala Klančac. Integracije volumena su od određene visine (0, 0.25, 0.50, 0.75 m n.m.). Sve vrijednosti ispod zadane visine nisu ulazile u integraciju volumena. Analize promjena volumena žala potrebno je prilagoditi snimljenoj situaciji, jer se ne mogu uspoređivati integrirani volumeni žala ukoliko donja kota integracije volumena nije snimljena.

5.6. Zaključak

Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrija pokazala se kao idealan alat za snimanje topografije minijaturnih žala i obalnih klifova. Mjerenja se obavljaju jeftino i brzo, oblaci točkaka su visoke preciznosti i gustoće točkaka. Mjerenje topografije žala Klančac moguće je obaviti za 15 minuta, nakon što su postavljene fiksne kontrolne točke (GCP). Preciznost mjerenja uzastopnih oblaka točkaka je bolja od 5 cm u horizontalnom i vertikalnom smislu, što je višestruko manje od zabilježenih promjena.

Verifikacija modela napravljena je za žalo Klančac, dužine oko 35 m koje je povoljno za provođenje SfM fotogrametrije zbog oblika stijena koje omogućuju snimanje fotografija sa velikog raspona horizontalnih i vertikalnih kutova. Slični rezultati verifikacije su se pokazali za žalo u uvali Uboka dužine oko 70m. Uspješne SfM rekonstrukcije šljunčanih minijaturnih žala isprobane su na više primjera kroz. Kroz sve te radove šljunčana minijaturna žala na području Kvarnera, koja su se mogla snimati sa viših visina, pokazala su se povoljna za snimanje SfM fotogrametrijom. Na većim

šljunčanim žalima, Baški i Mošćeničkoj Dragi (žalo Sipar) SfM rekonstrukcija probnih snimanja nije uspjela zbog nemogućnosti snimanja žala s viših kota. Takva žala mogu se snimiti korištenjem bespilotnih letjelica (*Unmanned aerial vehicle*). Dodatna poboljšanja snimanja mogu se postići i korištenjem plovila.

Oblaci točaka su idealni za mjerenje i prikaz složenih morfologija minijaturnih žala. Integracija volumena minijaturnih šljunčanih žala pomoću oblaka točaka prilagođava se složenim promjenama žala, omogućuje preciznu integraciju volumena, što nije moguće klasičnim metodama integracije volumena koje se baziraju na mjerenju određenog broja poprečnih presjeka žala.

6. KRATKOTRAJNE MORFOLOŠKE PROMJENE MINIJATURNOG ŽALA IZAZVANE DJELOVANJEM VALOVA, ŽALO KLANČAC POKRAJ BRSEČA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati istraživanja morfoloških promjena žala Klančac pokraj Brseča, nastalih u periodu od listopada do prosinca 2013. godine. Morfološke promjene žala uzrokovane su vjetrovima iz SE (jugo) i NE (bura) smjera. Provedeno je devet uzastopnih mjerenja žala primjenom SfM fotogrametrije, pomoću koje su dobiveni foto-realistični georeferencirani oblaci točaka žala.

U radu su prikazane promjene volumena žala, za koje su razvijene nove i prilagođene postojeće procedure prikupljanja i obrade podataka, sukladno posebnim karakteristikama istraživanih minijturnih šljunčanih žala (poglavlje 5). Tijekom provedenih istraživanja zabilježene su značajne migracije sedimenta tijela žala, koje su rezultirale oscilacijama volumena i rotacijom tijela minijturnog žala Klančac. Najveća erozija žala zabilježena je nakon orkanskih SE i NE vjetrova, dok se žalo oporavilo nakon umjerenih SE vjetrova. Žalo Klančac omeđeno je vrlo strmim, gotovo vertikalnim vapnenačkim stijenama, koje utječu hidrodinamiku djelovanja valova na žalo. Te stijene omogućuju brzo i precizno snimanje žala pomoću SfM fotogrametrije, fotografije žala mogu se snimiti s velikog raspona horizontalnih i vertikalnih kuteva. Morfološke promjene žala Klančac dobivene su pomoću 3D oblaka točaka preciznosti do 5 cm (poglavlje 5).

6.1. Uvod

Žalo Klančac kod Brseča dugačko je 37 m, a širina mu varira od 0 m kada je žalo na nekim dijelovima potpuno erodirano, pa do 20 m u specifičnim slučajevima akumulacije sedimenta. To je klasičan primjer šljunkovitog minijturnog žala. Veličine zrna na površini žala varira od 2 do 45 mm, prema mjerenju iz svibnja 2012. Na žalu se mogu pojaviti i zrna veća od šljunka – valutice i blokovi. Takav primjer zabilježen je 11.11.2013. na sjevernom dijelu žala, nakon jakog NE (bure) vjetrova koji je uzrokovao eroziju tog dijela žala (slike 6.2. i 6.3.).

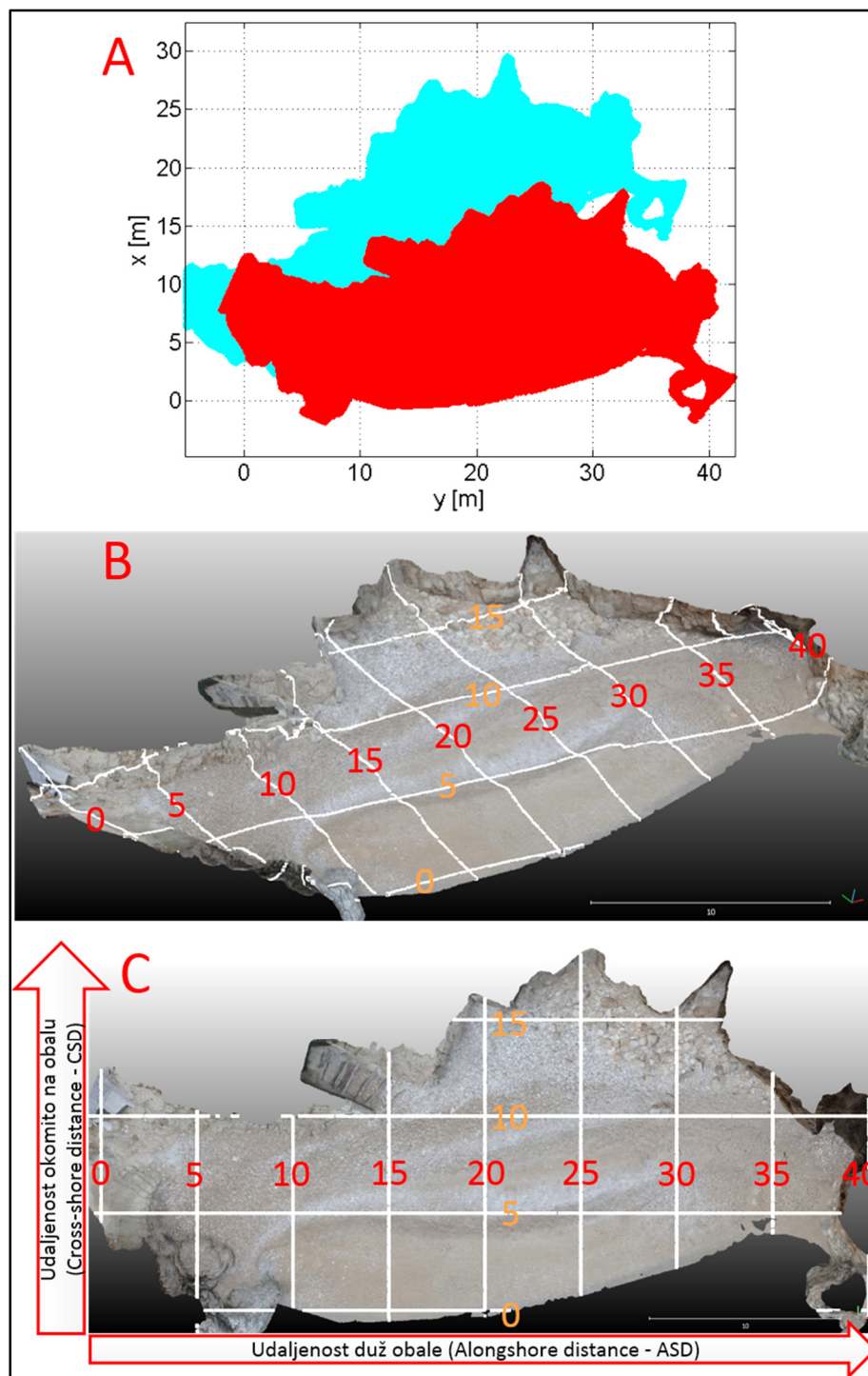
Zona loma valova (*surf-zone*) žala Klančac je uska, valovi se lome neposredno ispred i na samom tijelu žala (slike 2.1. i 6.26.), uslijed čega dolazi do koncentracije energije loma valova, odnosno do migracija zrna žala (Carter i Orford, 1993; Pedrozo-Acuna i dr., 2006). Pritisci inducirani lomom valova imaju važan utjecaj na mobilizaciju (podizanje) šljunčanih sedimenta (Pedrozo-Acuña i dr., 2007; 2008). Rotacija i oscilacija glavni su dinamički procesi žala u uvalama. Rotacija žala je longitudinalni transport sedimenta s jednog na drugi kraj žala, najveći pomaci su na suprotnim krajevima žala, dok su najmanji na sredini žala u blizini točke rotacije žala (*pivot point*). Rotacija žala najčešće je istražena praćenjem promjena obalne linije žala (Klein i dr., 2002; Ranasinghe i dr., 2004; Short i dr., 2000). Rotacija žala je posljedica uzduž-obalnog transporta sedimenta (Short i Masselink, 1999). No, Ranasinghe i dr. (2004) pretpostavljaju da pomaci sedimenta okomito na obalu (*cross-shore*) suprotnih strana minijaturnog žala, također mogu uzrokovati rotaciju žala. Oscilacija volumena žala definirana je kao ukupna promjena volumena tijela čitavog žala. Turki i dr. (2013) predlažu koncept predviđanja oblika minijaturnog žala koji je zasnovan na memoriji minijaturnog žala (*beach memory*), a temelji se na modelu evolucije žala i djelovanju valova. Laboratorijska istraživanja u hidrauličkom žlijebu (Wan der Werf i Van Gent, 2010) pokazala su da se zrna šljunka akumuliraju u podnožju zida, te da obalni zid ne izaziva eroziju žala.

6.2. Korištena metodologija

Topografija žala rekonstruirana je korištenjem SfM fotogrametrije. Djelovanje valova simulirano je numeričkim programom simulacije valova SWAN, na osnovi motrenih i prognoziranih jačina vjetra. Numeričke simulacije valovanja provedene su na batimetrijama deriviranim iz mjerenih oblaka točaka i digitalizacijom topografskih karata.

U analizama rezultata istraživanja, prikaz žala rotiran je sukladno prosječnoj orijentaciji obale žala. Na taj način se mogu pratiti morfološke promjene žala, odnosno migracije sedimenta duž obale (*long-shore*) i okomito na obalu (*cross-shore*). Tijelo žalo Klančac u prikazima je rotirano za 23.7° , a točka E 322710, N 5007320 je ishodište relativnog koordinatnog sustava (slika 6.1.A.). Kut rotacije prikaza žala određen je na osnovi

obalne linije žala (slojnica 0.40 m) mjerjenja broj 1 (4.10) (slika 6.2.), koje predstavlja neutralnu orijentaciju žala u odnosu na zabilježene promjene (slike 6.2. i 6.3.).



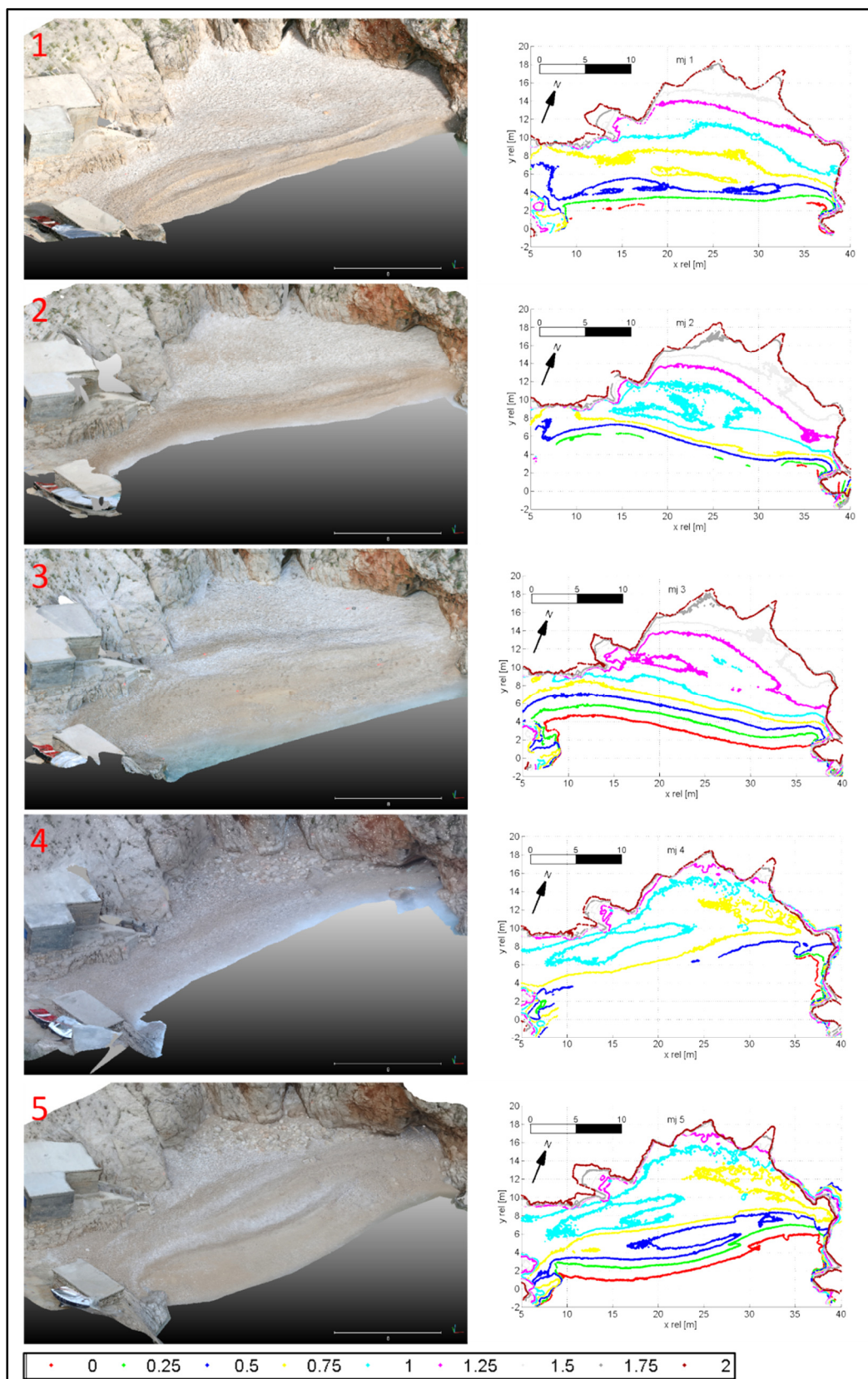
Slika 6.1. A - Oblak točaka žala prikazan u relativnom koordinatnom sustavu s ishodištem u točki E 322710, N 5007320, H 0, HTRS96 (svjetlo plava) i relativnom rotiranom koordinatnom sustavu (crvena) s kutom rotacije 23,7°; B – 3D prikaz oblaka točaka sa karakterističnim udaljenostima; C – Prikaz udaljenosti duž obale (*long-shore*) i okomito na obalu (*cross-shore*) žala

Koncem 2013. godine provedeno je devet uzastopnih mjerenja topografije žala Klančac. Prikaz rednih brojeva i datuma mjerenja dat je u tablici 6.1. Mjerenja su se nastojala provesti nakon većih promjena morfologije žala, tijekom povoljnih uvjeta za snimanje žala SfM fotogrametrijom. Određeno mjerenje u daljnjem tekstu je naveden pod rednim brojem, te danom i mjesecom mjerenja u zagradi. Datum je naveden uz redni broj mjerenja da bi se prikazala vremenska komponenta nastalih promjena. Godina nije navedena jer su sva mjerenja provedena tijekom 2013. godine

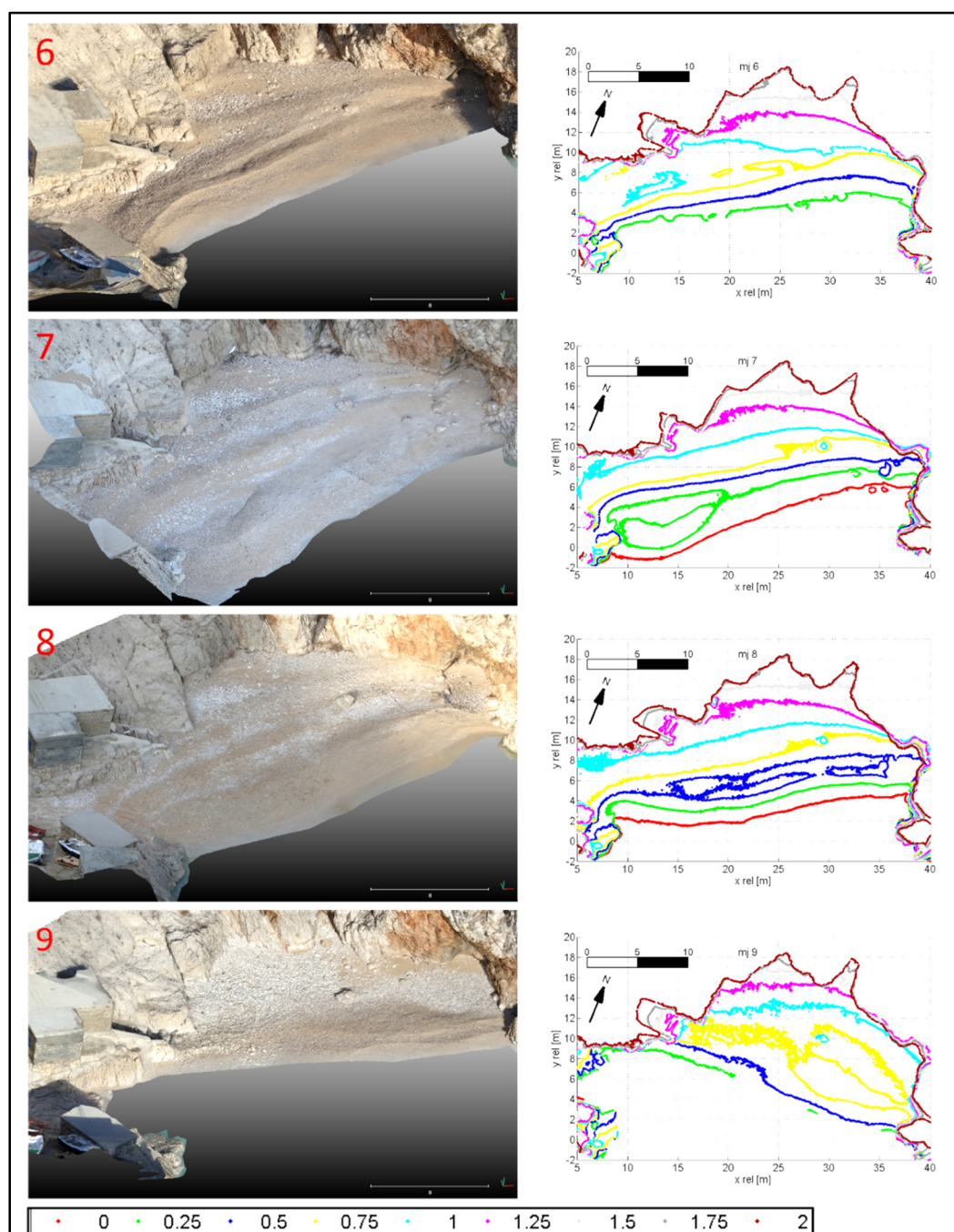
Tablica 6.1. Pregled mjerenja žala Klančac (Brseč)

mj. Br	Datum
1	4.10.2013
2	30.10.2013
3	6.11.2013
4	12.11.2013
5	18.11.2013
6	28.11.2013
7	4.12.2013
8	24.12.2013
9	27.12.2013

Trodimenzionalni oblaci točaka uzastopnih mjerenja georeferencirani i verificirani su po metodologiji opisanoj u poglavlju 5. Slike 6.2. i 6.3. prikazuju foto-realistične georeferencirane oblake točaka žala Klančac iz iste perspektive, te slojnice u relativnom rotiranom koordinatnom sustavu.



Slika 6.2. Trodimenzionalni foto-realistični oblak točkica i slojnice derivirane iz oblaka točkica žala Klančac. Mjerenja: 1 (4.10.), 2 (30.10.), 3 (6.11.), 4 (12.11.) i 5 (18.11.)



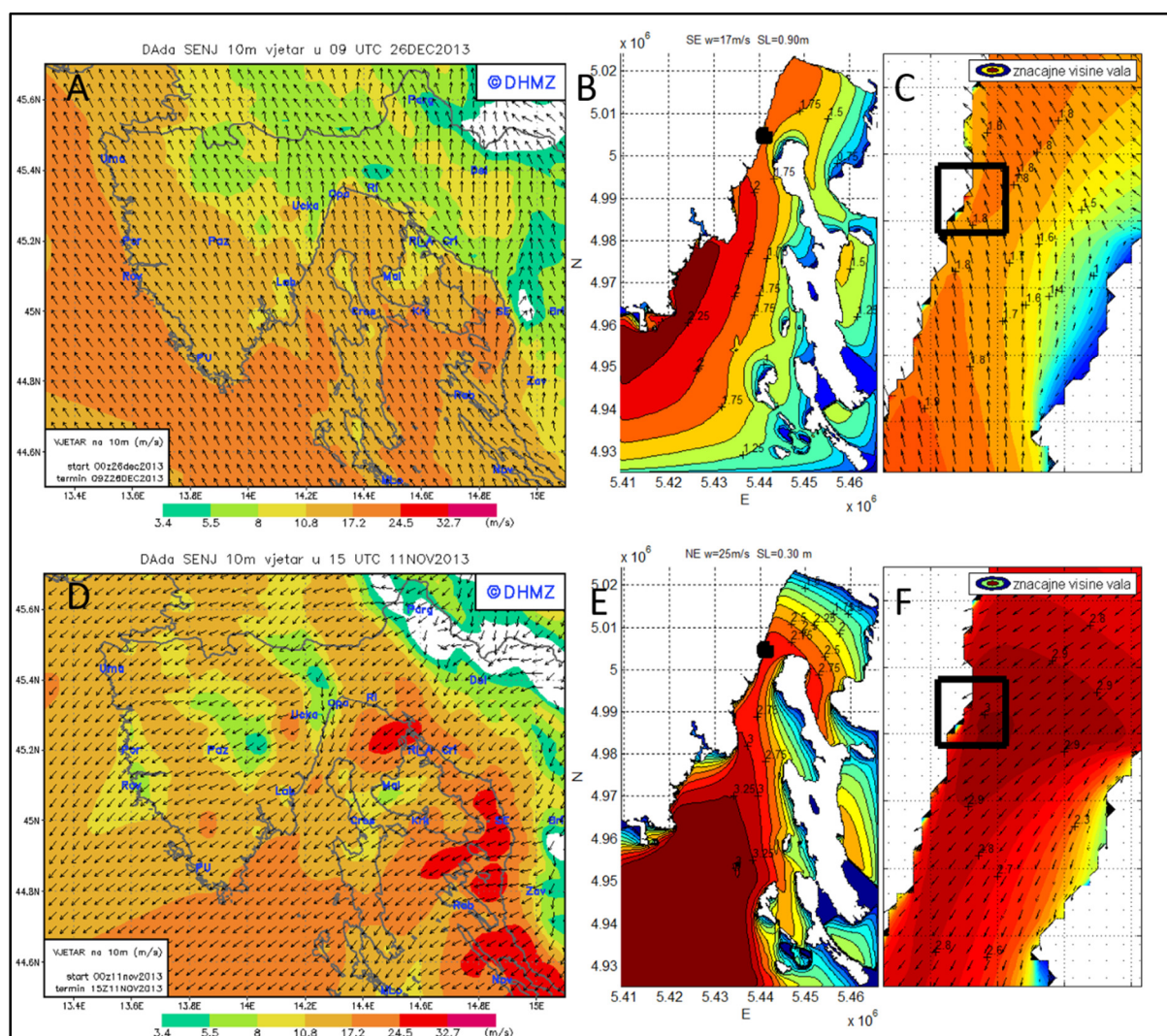
Slika 6.3. Trodimenzionalni foto-realistični oblak točaka i slojnice derivirane iz oblaka točaka žala Klančac. Mjerenja: 6 (28.11.), 7 (4.12), 8 (24.12) i 9 (27.12).

Slike 6.2. i 6.3. daju kronološki pregled zabilježenih promjena žala Klančac tijekom provedenih istraživanja. Prikazani oblaci točaka prikazuju relevantnu vizualnu usporedbu nastalih promjena.

Djelovanje valova na žalo simulirano je numeričkim modelom SWAN na temelju uniformnog polja vjetra. Mjerodavne jačine vjetra između pojedinih mjerenja definirane

su na osnovi podataka sa službenih motriteljskih meteoroloških postaja Kukuljanovo i Crikvenica (DHMZ). Ostale službene meteorološke postaje na istraživanom području (npr. Rijeka, Opatija) ne mjere realne parametre vjetra zbog njihove specifične lokacije. Nakon analize podataka sa motriteljskih meteoroloških postaja, analizirane su prognoze vjetra modela Aladin – Dinamička adaptacija vjetra za Istru i Kvarner. Polje vjetra modela Aladin korišteno je kao ulazni parametar za provođenje numeričkih simulacija valova jer najbolje opisuju realno stanje polje vjetra zbog složene morfologije terena (Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004; Bajić i dr., 2009; Horvath i dr., 2011). Na temelju analize podataka sa motriteljskih meteoroloških stanica i rezultata modela Aladin definirale mjerodavne prognoze vjetra. Slika 6.4. prikazuje primjer simulacije značajne visine vala (SWAN) na osnovi prognoza jačina vjetra modela Aladin za područje Istre i Kvarnera. Numerička simulacija prognoze valova provedena je na batimetriji deriviranoj iz topografskih karti mjerila 1:25000, dok je za detaljne simulacije korištena karta mjerila 1:5000 i izmjereni oblaci točaka.

Razine mora u numeričkim simulacijama pretpostavljene su 0.60 m n.m. za jugo i 0.50 m n.m. za buru. To su realne morske razine, SE vjetar (jugo) u pravilu je popraćeno s povišenim višim razinama mora, a NE vjetar (bura) s nižim (Ružić, 2003).



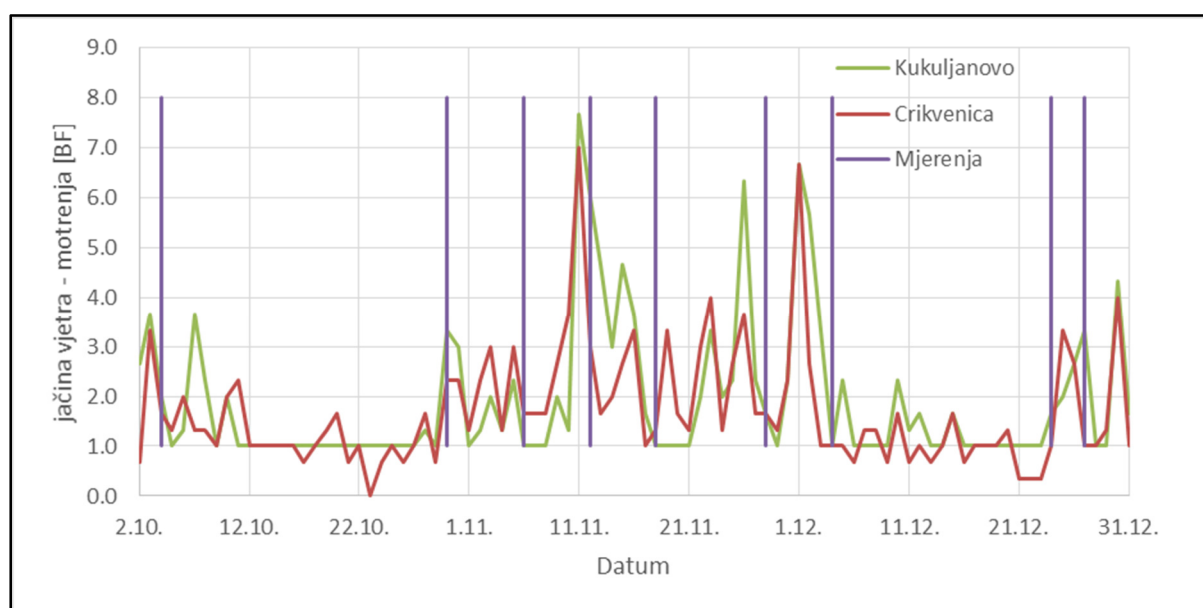
Slika 6.4. Numerička simulacija valova SE (jugo) i NE (bura) vjetra. A – C: jugo, 26.12.2013.; D – F: bura, 11.11.2013.; Prognozirano polje vjetra modela Aladin - DHMZ (A,D); Numeričke simulacije valova Kvarnera i Riječkog zaljeva (B,E), te detalja oko Brseča (C,F)

Rezultati numeričkih simulacija (SWAN) sugeriraju da jugo konstantne jačine 17 m/s generira značajni val ispred Brseča visine 1.8 m, dok bura jačine 25 m/s val visine 2.90 m (slika 6.4.). Smjer dubokovodnih valova juga zakreće od jugoistoka (SE) ka smjeru jug-jugoistok (SSE) zbog utjecaja morfologije obale, odnosno Velih vrata (slika 6.4.C.). Valovi bure do ulaska u Vela Vrata zadržavaju inicijalni smjer sjeveroistok (NE) (slika 6.4.F.).

6.3. Rezultati

6.3.1. Djelovanje valova

U Prilogu 1 prikazan je zapis motriteljskih podataka sa meteoroloških postaja Crikvenica i Kukuljanovo. Tijekom provedenih mjerenja najjači NE vjetrovi (bura) zabilježeni su 11. i 12. studenog 2013., te 1. prosinca 2013. Najjače jugo zabilježeno je 2. prosinca 2013. Prosječne dnevne vrijednosti motrenih jačina vjetra grafički su prikazane na slici 6.5.

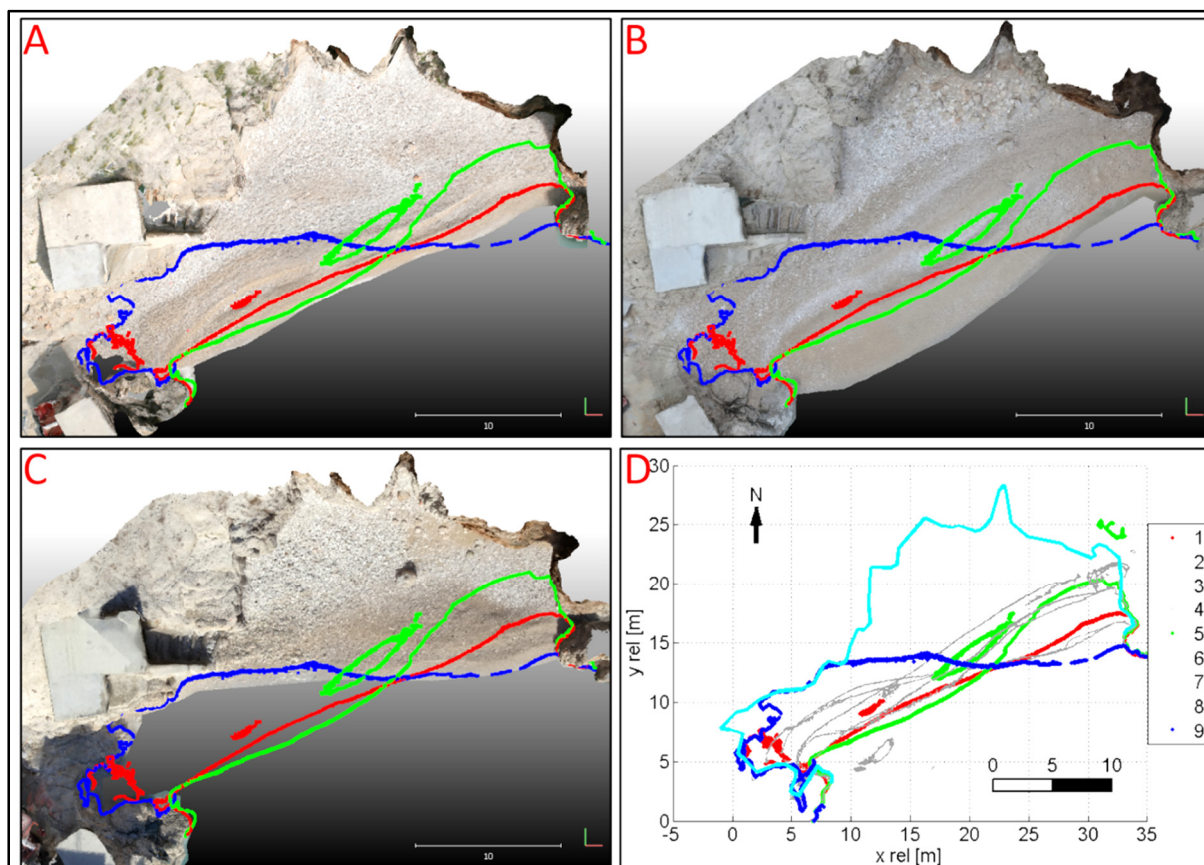


Slika 6.5. Srednje dnevne motrene jačine vjetra (u Boforima) od 1.10.2013. do 31.12.2013., meteorološke postaje Kukuljanovo (zeleno) i Crikvenica (crveno), s prikazanim provedenim mjerenjima žala Klančac (ljubičasto).

Najjači zabilježeni vjetrovi puhali su između mjerenja broj 3(6.11.) i 5(18.11.), kada su motrene jačine Ne vjetrova 7 do 8 bofora (prilog 1). Djelovanje valova detaljno je opisano za svaki pojedini istražen slučaj zabilježenih morfoloških promjena.

6.3.2. Amplitude zabilježenih morfoloških promjena žala

Migracije sedimenta minijaturnog šljunčanog žala Klančac su intenzivne i brze. Na žalu nastaju značajne morfološke promjene, pa i ekstremne u odnosu na ograničenu veličinu žala. Promjene obalne linije žala prikazane su na slici 5.6.



Slika 6.6. Promjene obalne linije i rotacija žala Klančac (Brseč) prikazane na foto-realističnom oblaku točaka žala i slojnicom žala visine 0.40 m n.m.

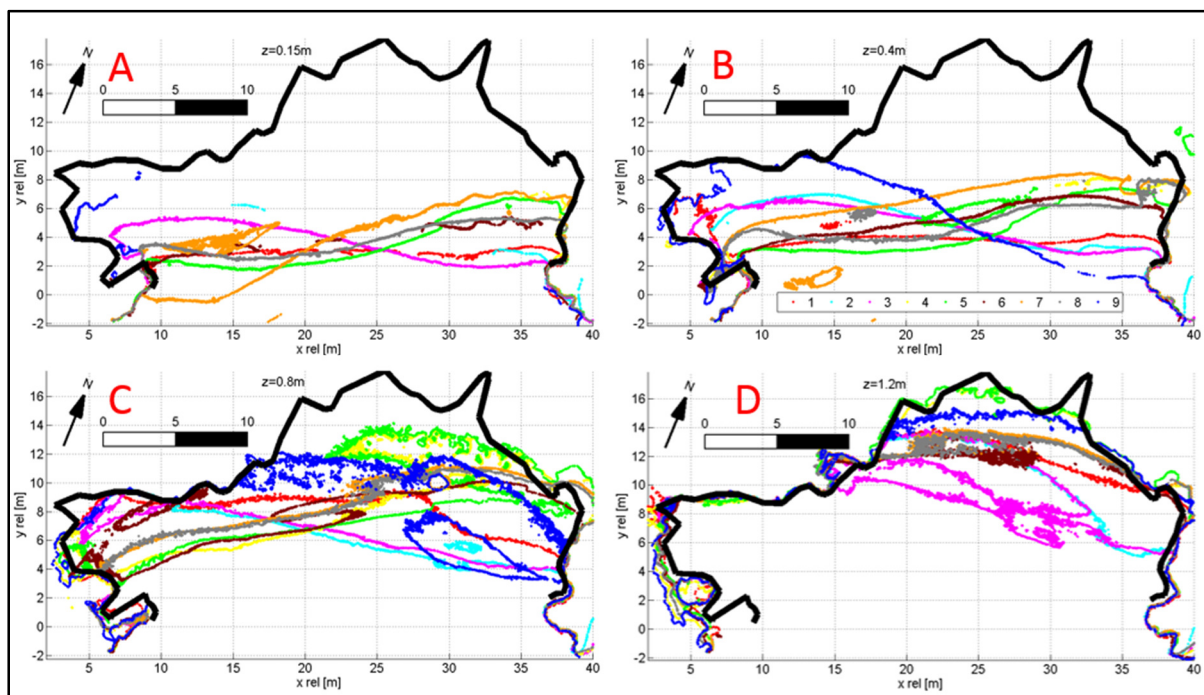
A – Prosječno stanje žala, mjerenje br. 1 (crvena);

B – Stanje žala nakon NE vjetra (bure), mjerenje br. 5 (zelena);

C – Stanje žala nakon SE vjetra (juga), mjerenje br. 9 (plava);

D – Prikaz slojnice 0.40 reprezentativnih (mjerenje: 1, 5, 9) i ostalih izmjerenih stanja žala (siva; mjerenje: 2, 3, 4, 6, 7, 8) sa granicom istraživanog žala (svjetlo plava)

Slika 6.6. prikazuje obalnu liniju žala nakon jakog NE (bure) i SE (juga) vjetra, te srednje stanje obalne linije. Zabilježena krajnja stanja obalne linije (slojnice 0,40) na istočnom dijelu žala variraju oko 7,5 m, na zapadnom i preko 8 m (slike 6.2. i 6.3.). Rotacija obalne linije žala između mjerenja broj 5 i 9 je 32°. Promjene obalne linije i slojnica žala prikazane su na rotiranim oblacima točaka žala (slika 6.7.).

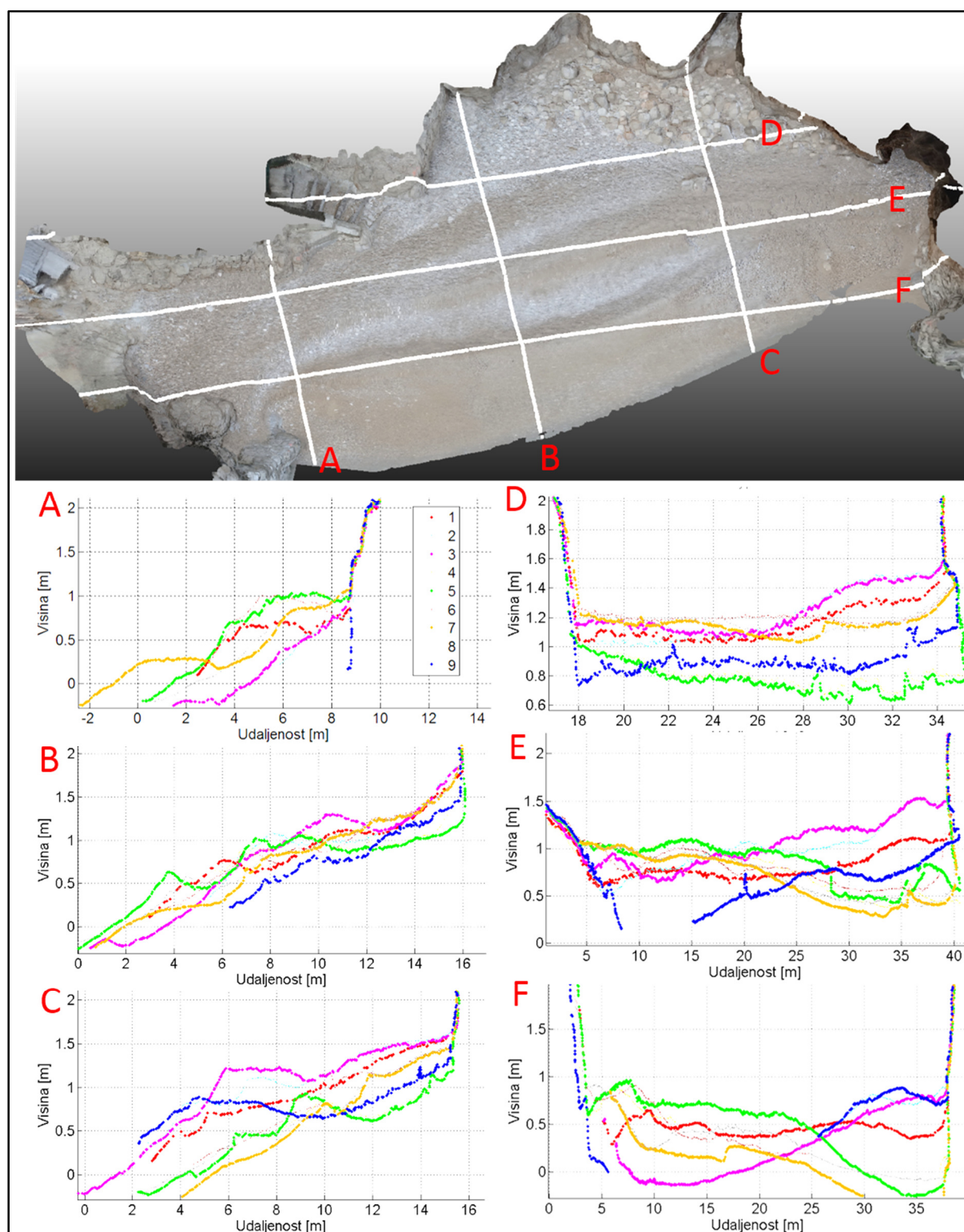


Slika 6.7. Slojnice žala derivirane iz oblaka točaka prikazane u relativnom rotiranom koordinatnom sustavu žala. Prikazane su slojnice visine 0,15 m n.m. (A), 0,40 m n.m. (B), 0,80 m n.m. (C), 1,20 m n.m. (D). Slojnice pojedinog mjerenja prikazane su različitim bojama (legenda, tablica 6.1.)

Obalna linija, odnosno slojnica žala visine srednje morske razine 0,15 m n.m. izmjerena na šest od devet 3D oblaka točaka žala (slika 6.7.A.), zbog razine mora i uzdizanja valova tijekom snimanja. Slojnica visine 0.40 m n.m. snimljena je u svim mjerenjima osim mjerenja broj 4 (12.11.) (slika 6.5.B.), kada je tijekom snimanja puhao NE vjetar (slika 6.5.). Zbog toga je slojnica 0.40 m n.m. najčešće pretpostavljena kao mjerodavna obalna linija.

Širina zapadnog dijela žala varira od 8,5 m tijekom mjerenja broj 7 (4.12.), do potpuno erodiranog stanja tijekom mjerenja broj 9 (27.12.) (slika 6.7.). Širina istočnog dijela žala u profilu 35 varira od 10 m (mjerenje br. 9 (27.12)) do 3 m (mjerenje br. 7 (4.12)). Širina središnjeg dijela žala najmanje varira, slika 6.7. sugerira da je središte rotacije žala između profila 20 i 25. Zabilježene su značajne tlocrtne promjene viših slojnica žala (slika 6.7. C i D), što sugerira da se intenzivne morfološke promjene odvijaju i na višim kotama žala.

Na slici 6.8. prikazane su promjene žala Klančac u tri poprečna presjeka (A, B i C), i tri uzdužna presjeka (D, E i F).



Slika 6.8. Zabilježene promjene poprečnih (A-C) i uzdužnih (D-F) presjeka žala.

Visinske razlike poprečnog presjeka 10 (slika 6.8.A.) su veće od 1 m, žalo je potpuno erodirano za vrijeme mjerenja broj 9 (27.12.) (nakon SE vjetra), dok je najviše tijekom mjerenja broj 5 (18.11.). Najveća širine žala u tom profilu je 8 m tijekom mjerenja broj

7 (4.12.). Najmanje promjene visina (do 0,60 m) zabilježene su u profilu 20 (B – slika 6.8.). Širina profila varira od 10 m – mjerenje br. 9 (27.12.) do 15 m – mjerenje br. 3 (6.11.). Širina profila 30 (C – slika 6.8.) varira od 10 do 14 m. Zabilježena je razlika visina od 1.20 m između mjerenja br. 3 (6.11.) i 5 (18.11.).

Uzdužni presjek 12 (D – slika 6.8.) nalazi se na suženom dijelu žala, većina profila je približno horizontalna. Zabilježene su razlike visina profila do 0,80 m. Zabilježene su značajne varijacije visina uzdužnog profila 8 (E – slika 6.8.), i to na zapadnom (oko 0,90 m) i istočnom (oko 1,0 m) rubu žala kao posljedica uzduž-obalnog transporta sedimenta. Razlike visina između suprotnih krajeva najizraženije su u najnižem uzdužnom profilu 4 (F – slika 6.8.), zbog čega se može zaključiti da su tu procesi najintenzivniji.

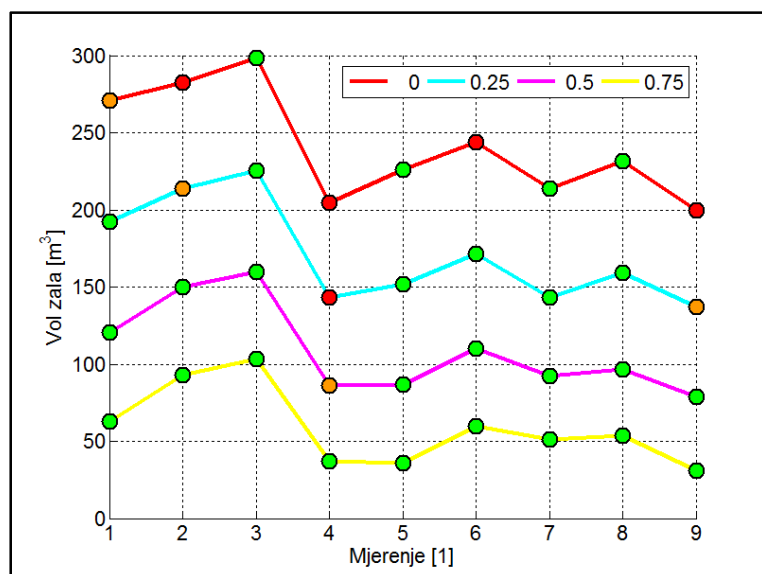
6.3.3. Integracija volumena žala

Volumeni žala integrirani su od visina 0 m n.m., 0.25 m n.m., 0.50 m n.m., i 0,75 m n.m., do definirane granice žala, što je detaljno opisano u poglavlju 5. Integracije volumena od različitih visina provedene su zbog različito snimljenog donjeg dijela žala (slika 6.7.). U tablici 6.2. prikazani su integrirani volumeni žala provedenih mjerenja od pojedine mjerodavne visine. Najveći volumen žala zabilježen je tijekom mjerenja br. 3 (6.11.), najmanji tijekom mjerenja br. 9 (27.12.).

Tablica 6.2. Integrirani volumeni žala (m³), različitih visina integracije (0,00, 0,25, 0,50 i 0,75 m n.m.). Zelenim su označene integracije od određene visine u slučajevima kada je ta visina izmjerena, narančasto djelomično izmjerena i crveno kada nije izmjerena (slika 6.2. i 6.3.).

mj. br.	visina (m nm)			
	0.00	0.25	0.50	0.75
1	271	192	120	63
2	283	214	150	93
3	299	225	160	103
4	205	143	86	37
5	226	152	87	36
6	244	172	110	60
7	214	143	92	51
8	232	159	97	54
9	200	137	79	31

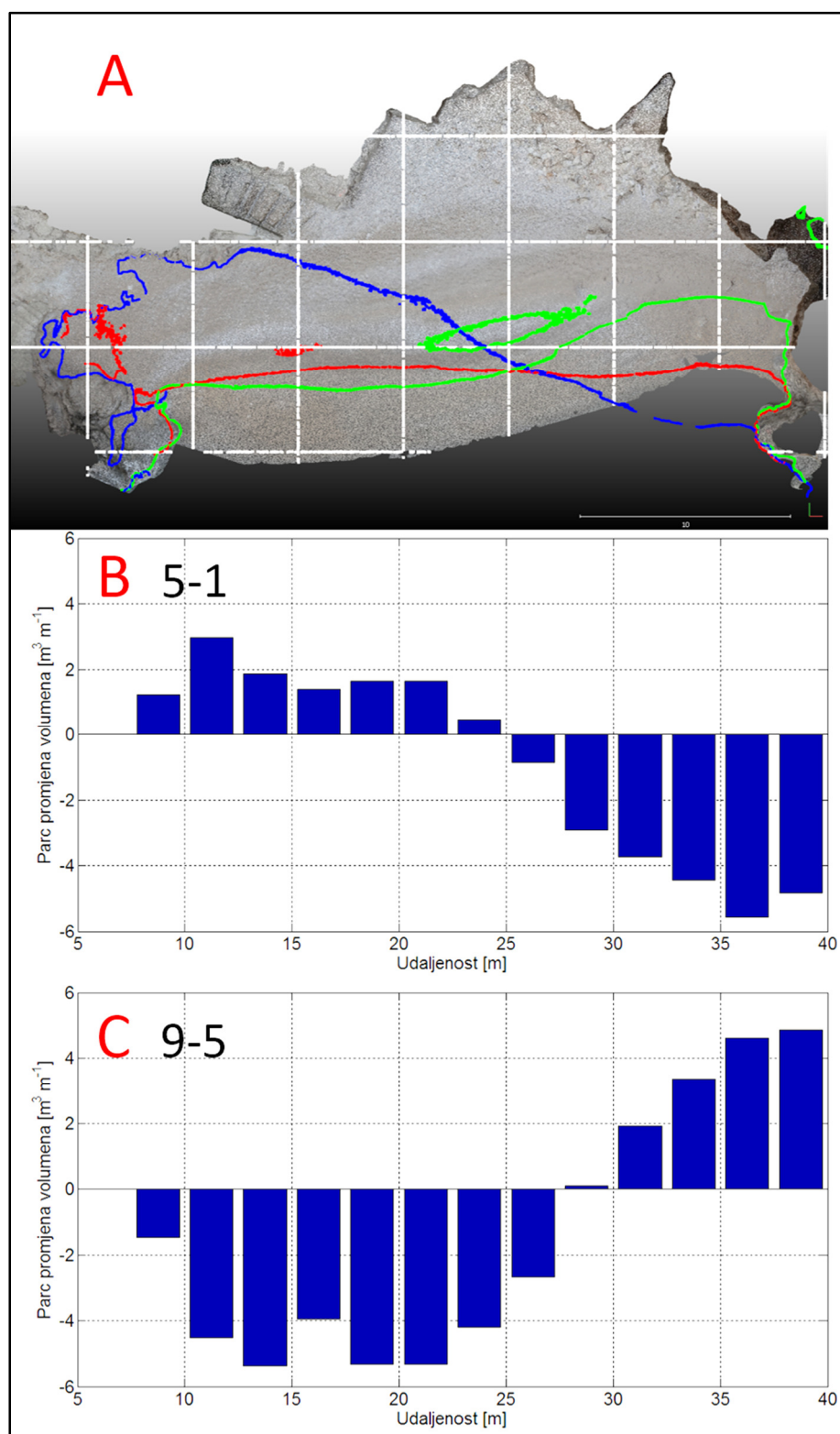
Na slici 6.9. dat je grafički prikaz integriranih volumena tijela žala iz tablice 6.2.



Slika 6.9. Integrirani volumeni žala od visine 0 m n.m. (crvena), 0,25 m n.m. (svijetloplava), 0,50 m n.m. (ljubičasta), 0,75 m n.m. (žuta). Zelenom točkom su prikazane integracije od određene visine u slučajevima kada je ta visina izmjerena na oblaku točaka, narančasto djelomično izmjerena i crveno kada nije izmjerena (slika 6.2 i 6.3).

Integrirani volumeni tijela žala ukazuju da najveća erozija žala nastaje nakon najvećih nevremena. Volumeni žala su nakon umjerenog juga najveći (mjerenje br. 3 (6.11.)), a nakon orkanskog juga najmanji (mjerenje br. 9 (27.12.)).

Parcijalna integracija volumena žala prikazuju promjene volumena uzduž žala (po dužnom metru žala). Slika 6.10. prikazuje razlike između karakterističnih stanja žala mjerenja 1 (4.10.), 5 (18.11.) i 9 (27.12.). Parcijalne promjene volumena uzduž žala derivirane su iz DEM žala (slika 6.1.). Integrirane su od visine 0,25 m n.m., koja je snimljena u svim mjerenjima osim mjerenja br. 4 (12.11.), koje je izuzeto iz detaljne analize (slike 6.2. i 6.9., tablica 6.2.). Parcijalne integracije provedene su za površine žala iznad morske razine, što znači da su iz njih izuzete promjene žala ispod morske razine.



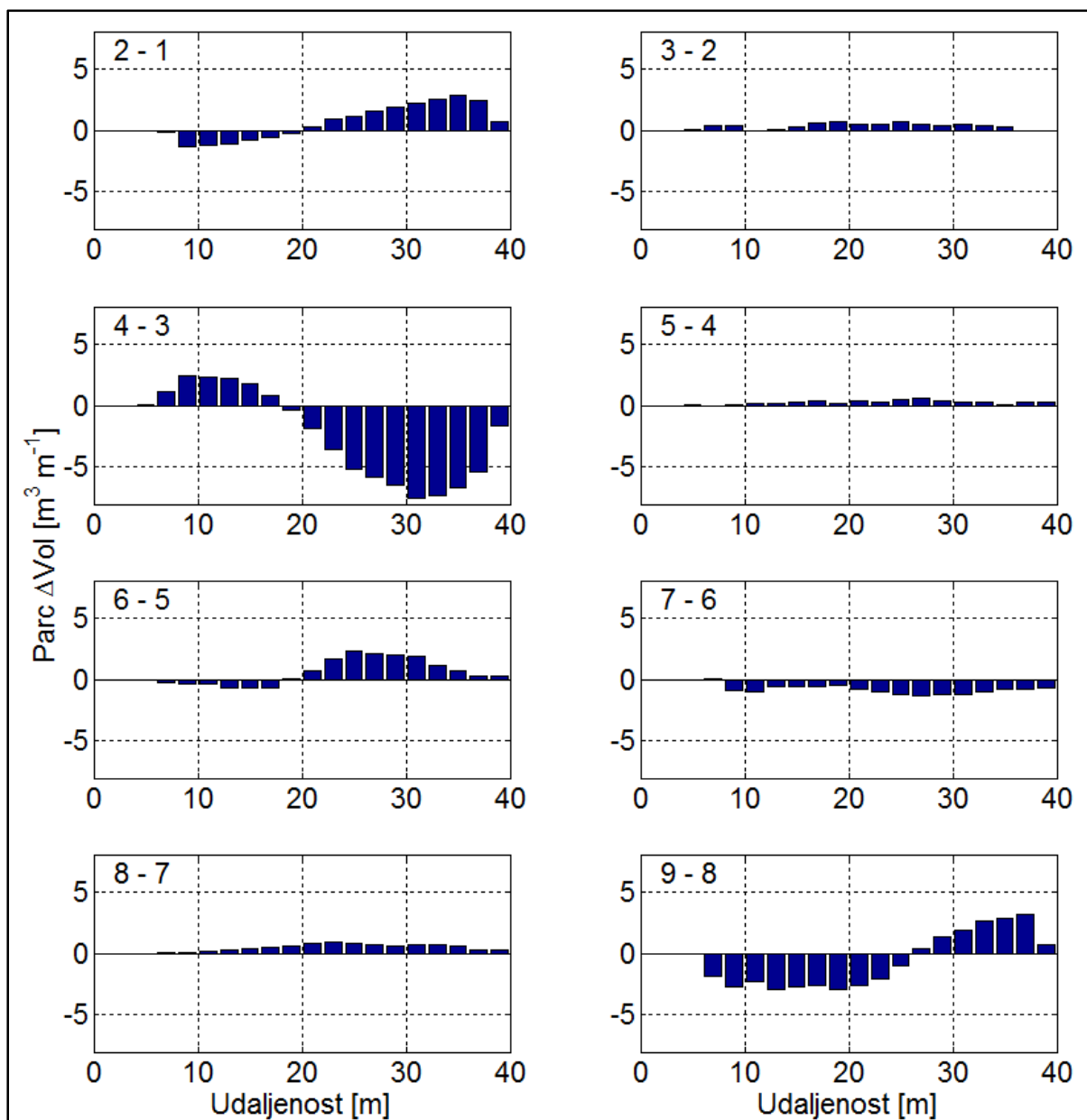
Slika 6.10. Parcijalne promjene volumena uzduž žala Klančac.

A – oblak točkica žala, obalna linija (slojnica 0,40 m n.m) mjerena 1 (4.10.) (crvena), 5 (18.11) (zelena) i 9 (27.12.) (plava):

B- Parcijalne promjene volumena žala između mjerena br. 1 (4.10.) i 5 (18.11.);

C- Parcijalne promjene volumena žala između mjerena br. 5 (18.11.) i 9 (27.12.),

Parcijalne promjene volumena tijela žala između mjerenja broj 1 (4.10.) i 5 (18.11.) najizraženije su na istočnom dijelu žala (slika 6.10.A.), najveća erozija nastala je oko poprečnog profila 37 m. Ukupna akumulacija sedimenta na zapadnom dijelu žala manja je od erozije na istočnom dijelu. Između mjerenja broj 5 (18.11.) i 9 (27.12.) došlo je do značajne erozije zapadnog dijela žala i umjerene akumulacije sedimenta na istočnom dijelu žala (slika 6.10.C.). Parcijalne promjene volumena tijela žala između uzastopnih mjerenja prikazane su na slici 6.11.



Slika 6.11. Parcijalne promjene volumena uzduž žala Klančac između uzastopnih mjerenja.

Ukupne parcijalne promjene (sume apsolutnih vrijednosti svih parcijalnih promjena) volumena žala između pojedinih mjerenja prikazane su u tablici 6.4.

Tablica 6.3. Ukupne parcijalne promjene volumena žala između sukcesivnih mjerenja

mj	$\Sigma \Delta V_i$
1	m^3
2-1	25.9
3-2	8.1
4-3	72.2
5-4	10.6
6-5	17.7
7-6	15.1
8-7	11.2
9-8	49.7

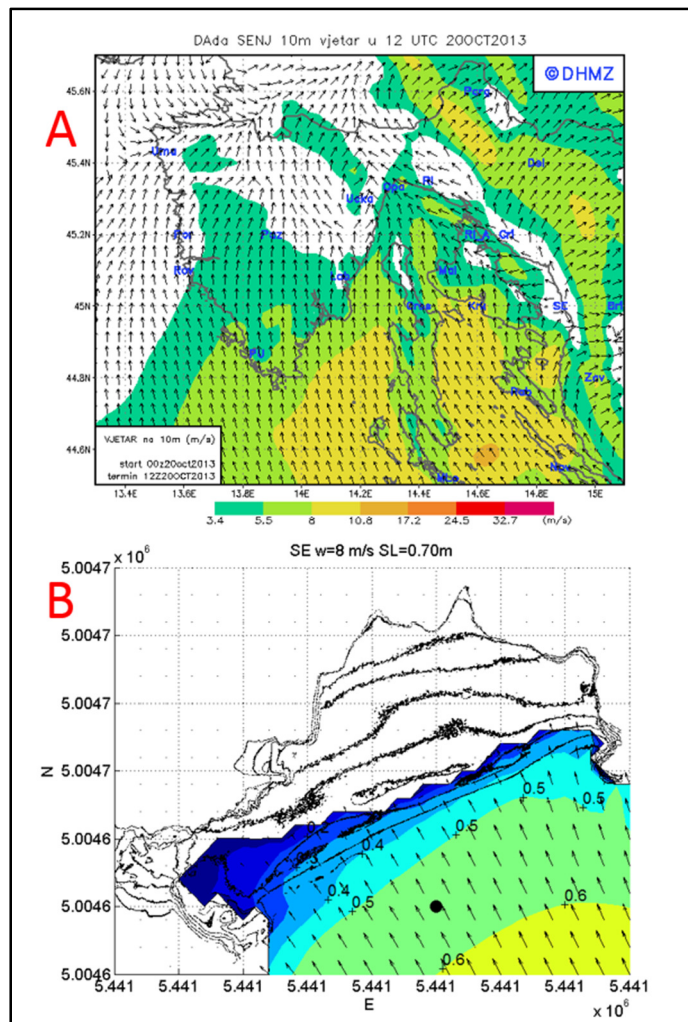
Najveće ukupne parcijalne promjene volumena žala zabilježene su u između mjerenja 3 (6.11.) i 4 (12.11.), 8 (24.12.) i 9 (27.12.), te 1 (4.10) i 2 (30.10.). Te promjene obilježene su značajnim duž-obalnim migracijama sedimenta, što je detaljno opisano u drugom dijelu ovog poglavlja. Najveće promjene parcijalnih volumena žala zabilježene su između mjerenja broj 3 (6.11.) i 4 (12.11.), (slika 6.11.), kada je nastala erozija žala veća je od $8 m^3/m^1$ oko profila 35. Oko profila 9 zabilježena je akumulacija sedimenta $4 m^3/m^1$.

6.3.4. Detaljan opis morfoloških promjena žala između uzastopnih mjerenja

Morfološke promjene žala Klančac analizirane su na način da je najprije prikazano prognozirano polje vjetra modela ALADIN i rezultati numeričkih simulacija valova ispred žala, a nakon toga i zabilježene morfološke promjene samog žala. Promjene morfologije žala prikazane su promjenama visina žala, parcijalnim promjenama volumena uzduž žala i karakterističnim profilima između dva uzastopna mjerenja. Visine valova numeričkih simulacija uspoređene su u referentnoj točki koja je prikazana na rezultatima detaljnog numeričkog modela. Simulacija detaljnog modela provedena je na batimetriji početnog stanja (prvog od dva uspoređena mjerenja) deriviranoj iz generiranog trodimenzionalnog oblaka točaka, čije su slojnice (svakih 0,25 m) prikazane na rezultatima numeričkih simulacija.

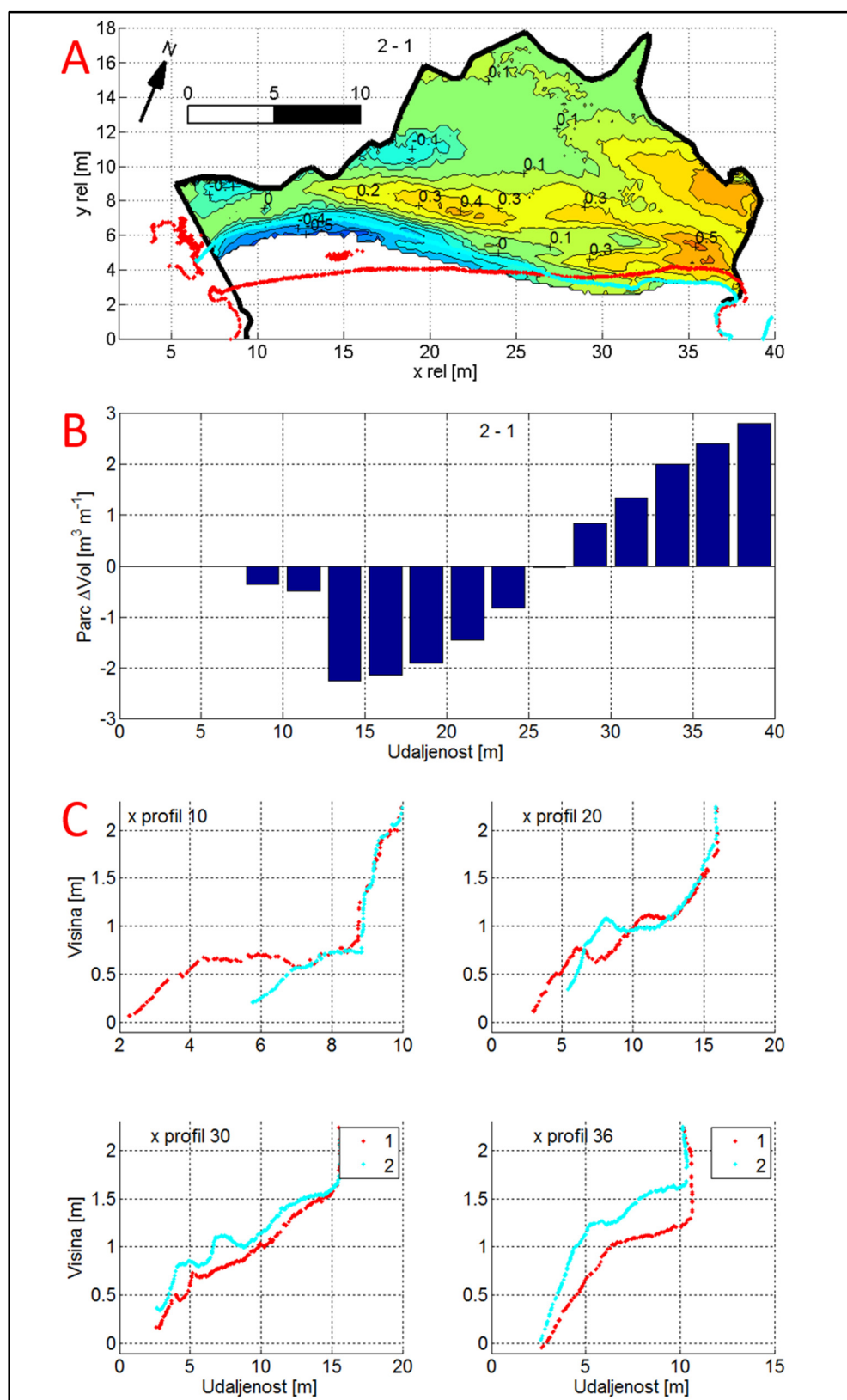
6.3.4.1. Morfološke promjene žala između mjerenja broj 1 (4.10.) i 2 (30.10.)

Dana 20.10.2013. puhao je vjetar iz SE smjera, na Kvarneru prosječne jačine oko 10 m/s (slika 6.12.A.).



Slika 6.12. A – Prognozirano polje vjetra (ALADIN) 20.11.2012. B - Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 1.

Simulirana značajna visina vala u referentnoj točki (crna točka, slika 6.12.B.) je 0,55 m, dok na samo žalo dolaze valovi visine oko 0,40 m. Volumen žala iznad visine 0,50 m povećao se sa 192 m³ na 214 m³ (tablica 6.2.). Na slici 6.13. prikazane su zabilježene morfološke promjene žala Klančac između mjerenja broj 1 (4.10.) i 2 (30.10.).

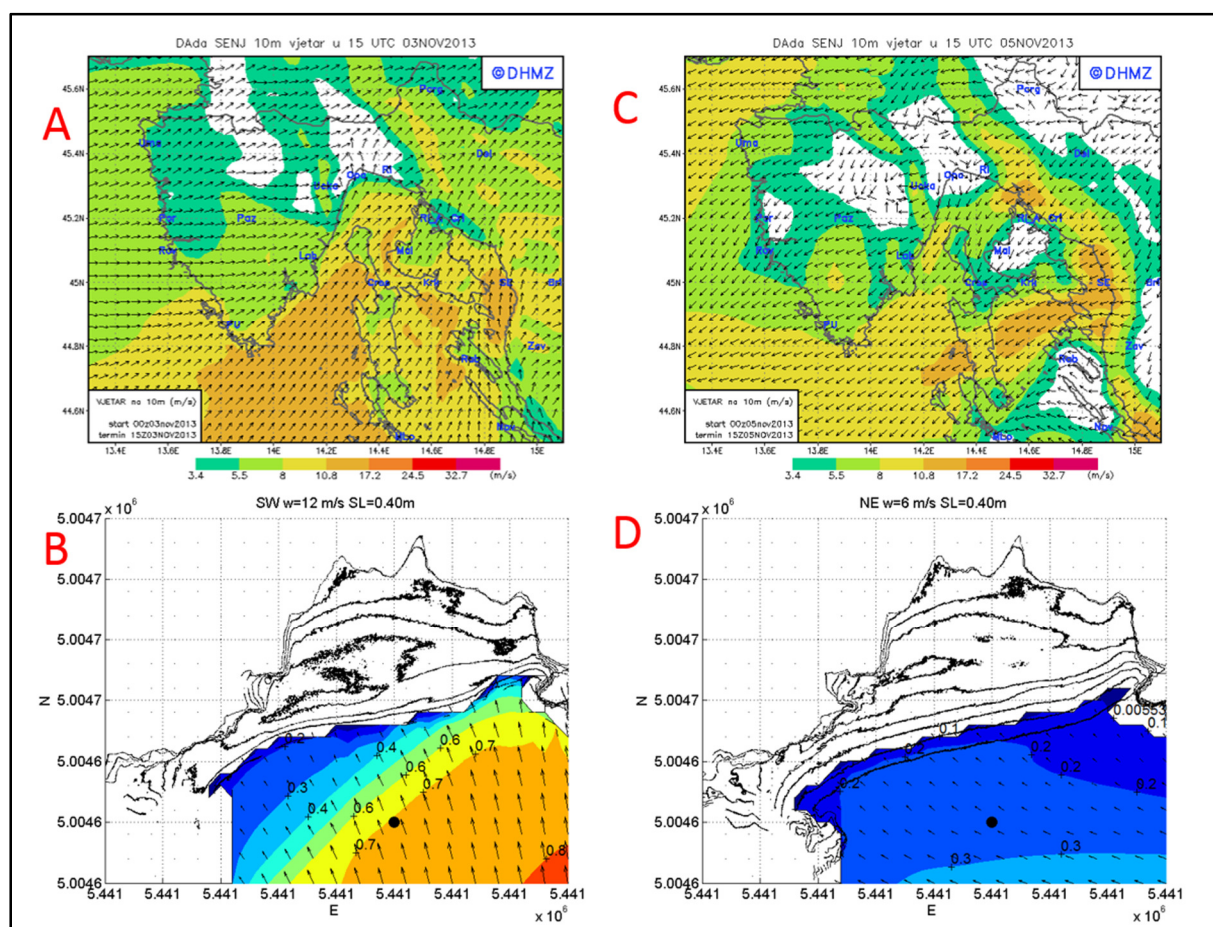


Slika 6.13. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 1 (4.10.) i 2 (30.10.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

Ukupne parcijalne promjene volumena žala su 29 m^3 , to je treća zabilježene vrijednost tijekom provedenih mjerenja (tablica 6.3). Vizualne promjene žala uočljive su na foto-realističnom oblaku točaka (slika 6.2. 1 i 2), površina žala se smanjila, uočljiva je erozija zapadnog dijela tijela žala. Žalo tijekom mjerenja broj 1 je u neutralnoj orijentaciji, dok je nakon SE vjetrova žalo rotirano za 10° . Najveća erozija sedimenta zabilježena je na zapadnom dijelu žala, oko profila 10 ($2,20 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$) gdje je erodirana berma visine $0,65 \text{ m}$ (slika 6.13.A.). Na tom dijelu zabilježen je pomak obalne linije žala (slojnica $0,40 \text{ m n.m.}$) oko $2,5 \text{ m}$ prema obali. Na zapadnom dijelu žala valovi juga tijekom povišenih morskih razina dolaze do vertikalne stijene (slika 6.12.B.), na kojoj dolazi do loma valova i induciranja obalnih procesa. Akumulacija sedimenta povećava se prema istočnoj strani žala (Slika 6.13.B.). Na srednjem dijelu žala, od profila 15 do 25 m prijelaz je iz erozije u akumulaciju sedimenta. Između profila žala $6 \text{ i } 8 \text{ m}$ erodiran je donji dio tijela žala, dok su se sedimenti akumulirali na srednjem dijelu profila (slika 6.13.C.). Najveća akumulacija sedimenta $3,25 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ zabilježena je u profilu 35 (slika 6.13.B.).

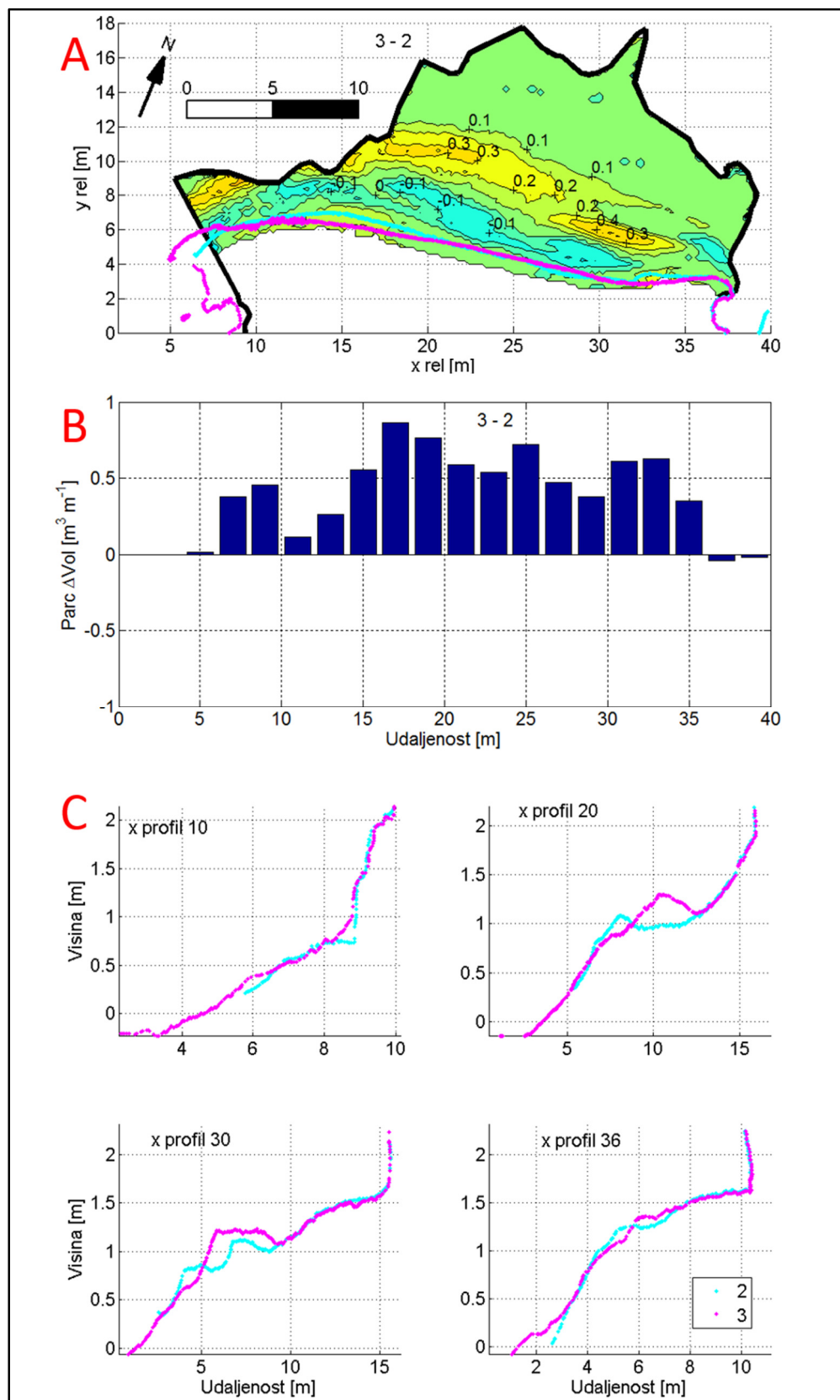
6.3.4.2. Morfološke promjene žala između mjerenja br. 2 (30.10.) i 3 (6.11.)

Između mjerenja 2 (30.10.) i 3 (6.11.), puhali su umjereni NE i SW vjetrovi (prilog 1), pretpostavlja se da je morfološke promjene žala izazvao SW vjetar koji je puhao 3.11. (prilog 1). Simulirana značajna visina valova vjetrova iz SW vjetrova je $0,70 \text{ m}$ u referentnoj točki (slika 6.14.). Umjereni vjetar iz NE smjera puhao je na kraju istraživanog perioda 6.11., prosječne jačine 6 m/s u Riječkom zaljevu, simulirana značajna visine vala je $0,28 \text{ m}$ u referentnoj točki (slika 6.14.). Vjetar iz NE smjera mogao je utjecati na morfološke promjene donjeg dijela žala.



Slika 6.14. Prognozirano polje vjetra (ALADIN) (A - 3.11., C - 5.11.). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 2 i 3.

Žalo Klančac izloženo je vjetrovima iz II kvadranta. Valovi SW smjera uslijed oplićavanja i difrakcije poprimaju smjer propagacije ispred žala od 162° , taj smjer je približno okomit na obalnu liniju žala (slika 6.14.B.). Između mjerenja 2 (30.10.) i 3 (6.11.) došlo je do porasta volumena žala iznad visine 0,25 m n.m. sa 214 m^3 na 225 m^3 , to je i najveći zabilježeni volumen žala tijekom providnih mjerenja (tablica 6.2.). Ukupne parcijalne promjene volumena žala su 8.1 m^3 , to su najmanje zabilježene parcijalne promjene (tablica 6.3.). Vizualne promjene žala nisu uočljive su na foto-realističnim oblacima točaka (slika 6.2.).



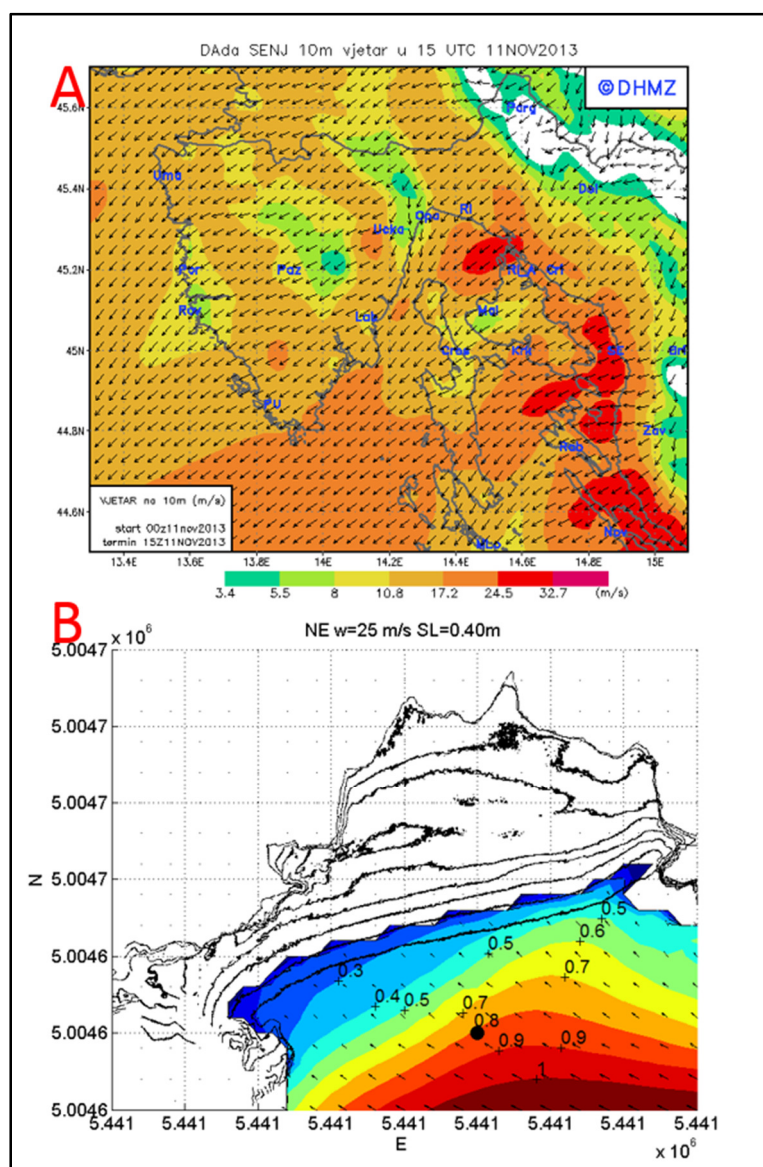
Slika 6.15. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 2 (30.10.) i 3 (6.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - promjene poprečnih presjeka žala

Između mjerenja br. 2 (30.10.) i 3 (6.11.). duž čitavog žala došlo je pomicanja sedimenta prema obali, dominantne su migracije sedimenta okomito no obalu (*cross-shore*) (slika 6.15.). Akumulacija sedimenta zabilježena je duž čitavog žala, najveća akumulacija je u profilu 17 ($0,82 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$). Promjene profila 10 nisu zabilježene, dok je u profilima 20, 30 i 36 zabilježena akumulacija sedimenta žala iznad visine 0,80 m (slika 6.15.C.). Orijentacija i obalna linija žala nisu se promijenili između mjerenja broj 2(30.10.) i 3 (6.11.), pretpostavlja se zbog istog smjera nailaska valova SE i SW smjera.

6.3.4.3. Morfološke promjene žala između mjerenja broj 3 (6.11.) i 5 (18.11.)

Mjerenje br. 4 (12.11.) izostavljeno iz je analiza morfoloških promjena žala jer donji dio žala nije snimljen zbog uzdizanja (*runup*) valova tijekom puhanja vjetra iz NE smjera (slika 6.2.). Promjene žala između mjerenja 4 (12.11.) i 5 (18.11) nisu značajne, što se vidi usporedbom slojnica (slika 6.2.), uzastopnih parcijalnih promjena volumena žala (slika 6.11.) i poprečnih presjeka (slika 6.18.). Između mjerenja 3 (6.11.) i 4 (12.11) puhao je vjetara NE smjera jačine 8 bofora, dok je između mjerenja 4 (12.11) i 5 (18.11) njegova jačina pala na 4-5 bofora (prilog 1). Volumen žala između mjerenja br. 3 (6.11.) i 5 (18.11) smanjio se s 299 m^3 na 226 m^3 iznad visine 0 m n.m., odnosno s 225 m^3 na 152 m^3 iznad 0,25 m n.m., (tablica 6.2.). To je najveća zabilježena erozija žala tijekom provedenih istraživanja.

Na slici 6.16. prikazani su rezultati numeričkih simulacija vjetra iz NE smjera za dan 11.11.2013.



Slika 6.16. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A – 11.11.), Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 3.

Značajna visina valova bure u referentnoj točki je 0,80 m, smjer 120°. Na slici 6.16. prikazano je djelovanje valova NE vjetra (bure) na žalo koje je orijentirano po SE vjetru (jugu), istočna strana žala izložena je djelovanju većih valova ($H_s=0,55$ m). Kut nailaska vala u referentnoj točki u odnosu na normalu pružanja žala je 16°, nakon koje počinju intenzivne promjene valnih parametara zbog utjecaja dna.

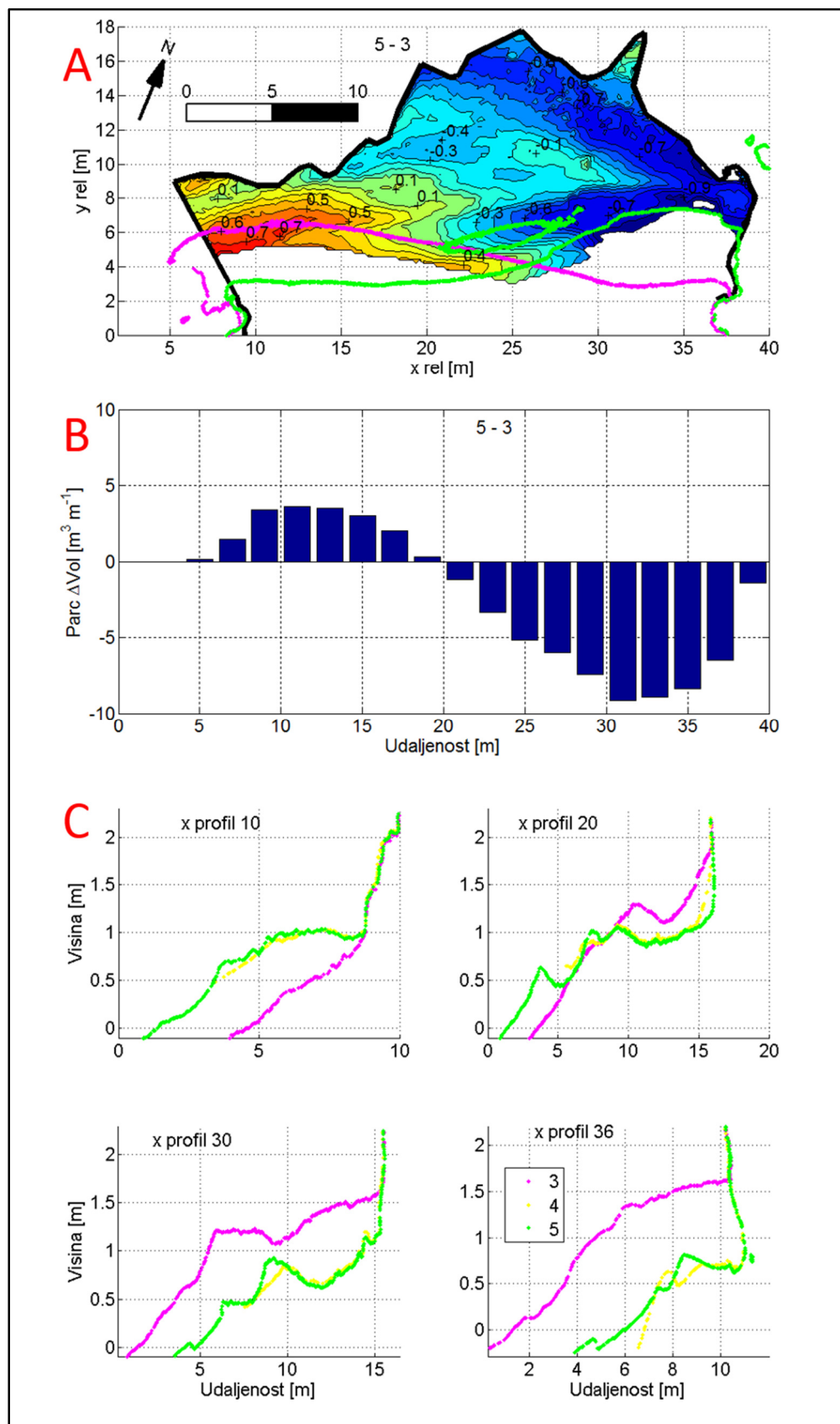
Značajne vizualne promjene čitavog žala, a pogotovo erozija sjeveroistočnog dijela žala, ispod klifa, vidljiva je na foto-realističnim oblacima točaka (slika 6.2.). Erozijom

sjeveroistočnog dijela žala na površinu su izašli krupniji sedimenti veličine valutica i blokova (slika 6.17.).



Slika 6.17. Fotografija žala tijekom mjerenja broj 4 (12.11), blokovi vidljivi na površini žala nakon erozije sjeveroistočnog dijela žala

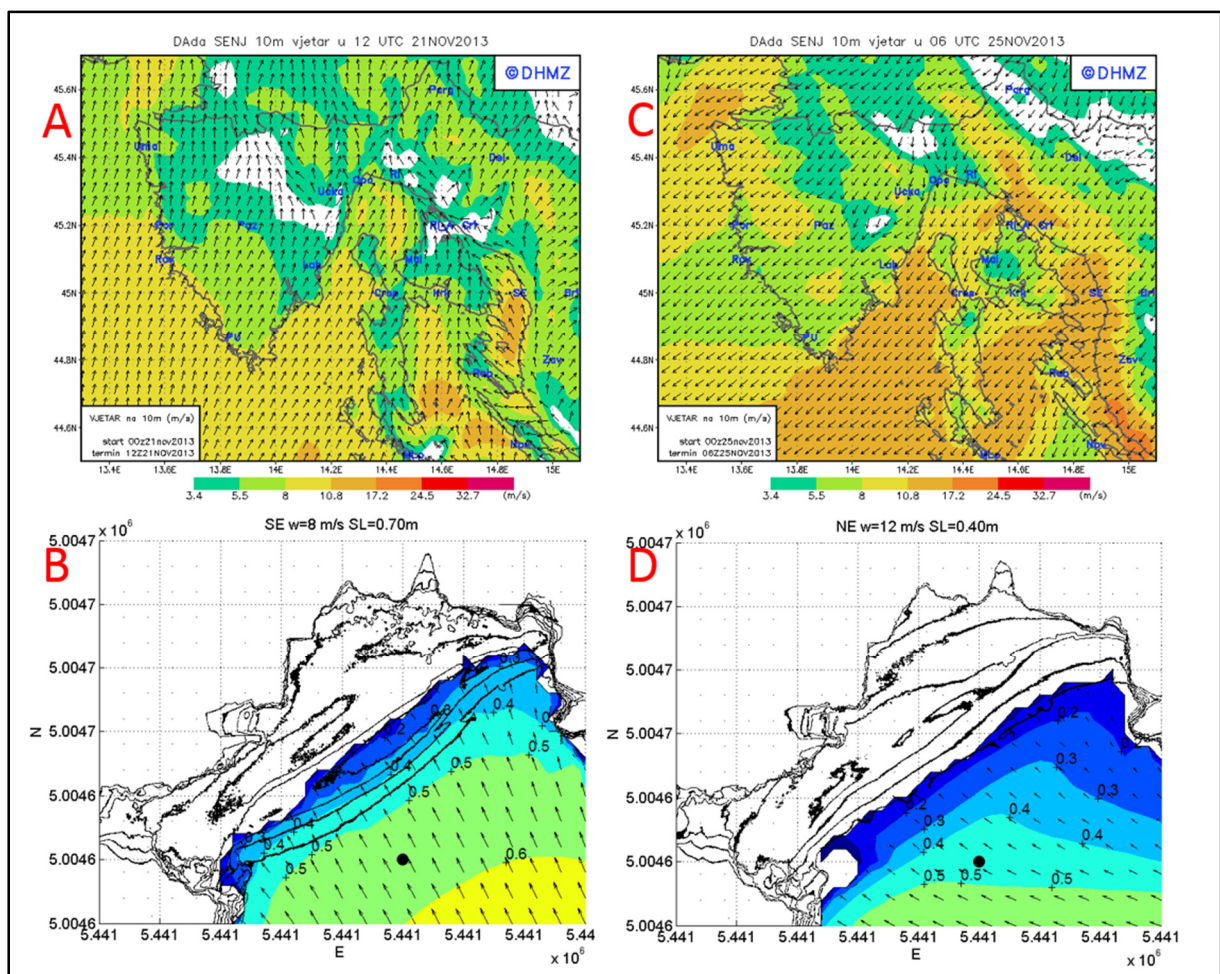
Nakon orkanske bure obalna linija žala se rotirala za 17° , sve slojnice žala su značajno promijenile orijentaciju, slojnice 1,25 n.n.m. i 1.50 m n.m. su praktički nestale (slika 6.2.). Ukupne parcijalna promjena volumena žala između mjerenja broj 3 (6.11.) i 5 (18.11.) su $72 \text{ m}^3/\text{m}^1$. Najveća erozija sedimenta nastala je između profila 8 i 16, dok je akumulacija sedimenta nastala između profila 20 i 40 (slika 6.18.B.). Najveća akumulacija sedimenta zabilježena je oko profila 10 (slika 6.18.C.). U profilu 20 prelazak je iz akumulacije u eroziju, gornji dijelovi profila su erodirani, dok je na donjem dijelu zabilježena akumulacija sedimenta i formiranje berme visine 0,60 m (slika 6.18.). Najizraženija erozija je u profilu 36 (slika 6.18.C.), gdje se visina žala smanjila između 0,75 m i 1,30 m. Najveća parcijalna erozija žala zabilježena je u profilu 31 ($8.72 \text{ m}^3/\text{m}^1$). Nastale promjene sugeriraju da je visina dosega valova veća od visine žala i na najširem i najvišem dijelu žala. Nakon djelovanja orkanskog vjetra iz NE smjera i erozija istočnog dijela žala na kraju spilje pokazao se tunel dužine oko 2 m koji spaja žalo s manjim žalom na drugoj strani. Taj tunel bi mogao imati značajan utjecaj na hidrodinamiku žala, što je diskutirano kasnije u ovom poglavlju.



Slika 6.18. Promjene žala Klančac između mjerenja 3 (6.11.), 4 (12.11.) i 5 (18.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

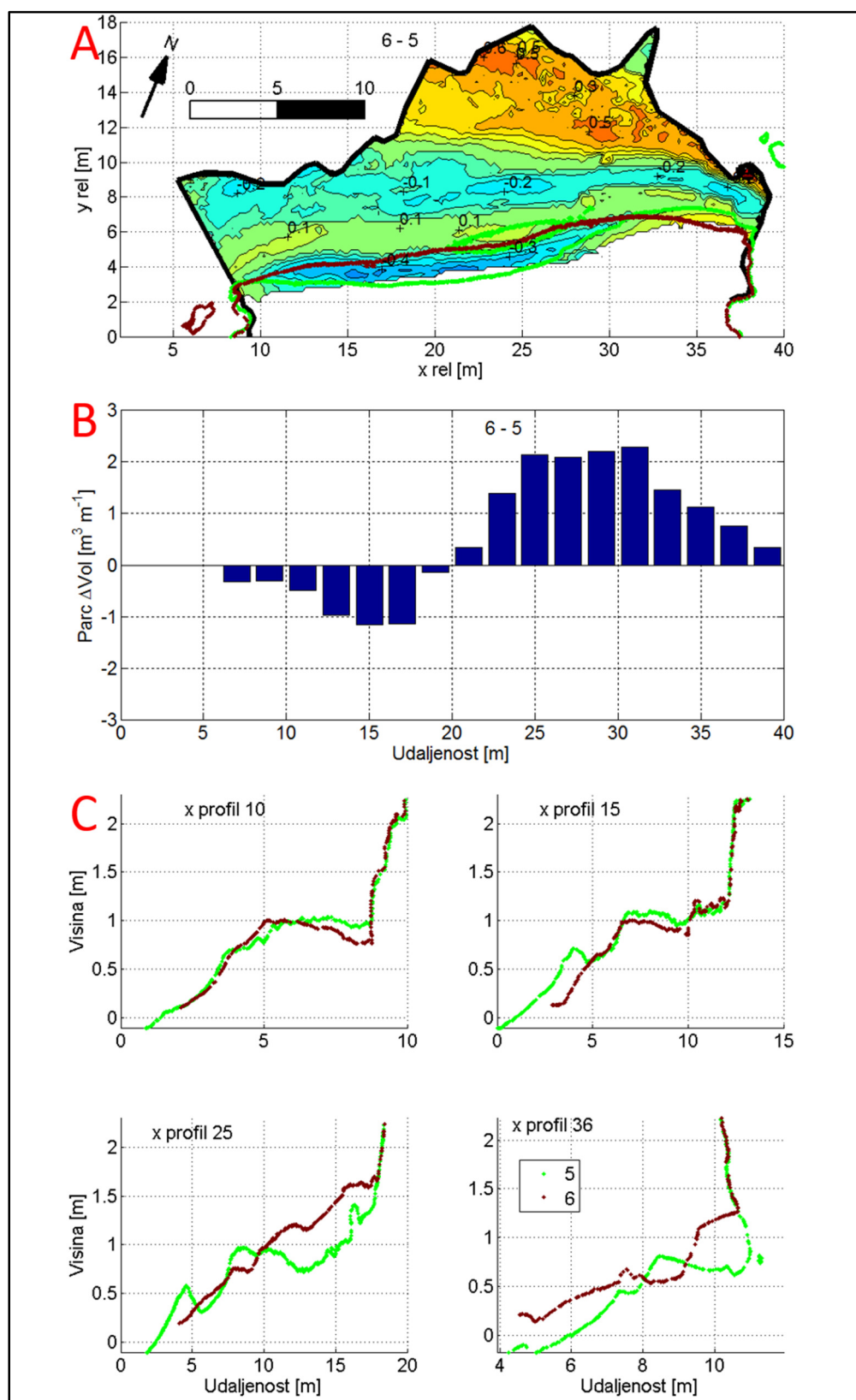
6.3.4.4. Morfološke promjene žala između mjerenja br. 5 (18.11.) i 6 (28.11.).

Dana 21.11.2013. na Kvarneru puhao je vjetra iz SE smjera prosječne jačine 8 m/s, koji je generirao značajne visine vala u referentnoj točki 0,55 m, smjera 150° (slika 6.19.). Detaljni model juga simuliran je na dubinama dna generiranim iz oblaka točaka mjerenja br. 5 (18.11). Nakon vjetra iz SE smjera, 28.11. uslijedio je vjetar iz NE smjera (slika 6.19.), koji je generirao valove značajne visine 0,47 m, smjera 120° u referentnoj točki (SWAN). Detaljni model bure simuliran je na batimetriji oblaka točaka mjerenja br. 6 (28.11.)



Slika 6.19. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 21.11, C - 28.11). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama.

Na slici 6.20. prikazane su morfološke promjene žala Klančac između mjerenja br. 5 (18.11.) i 6 (28.11.).



Slika 6.20. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 5 (18.11.) i 6 (28.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

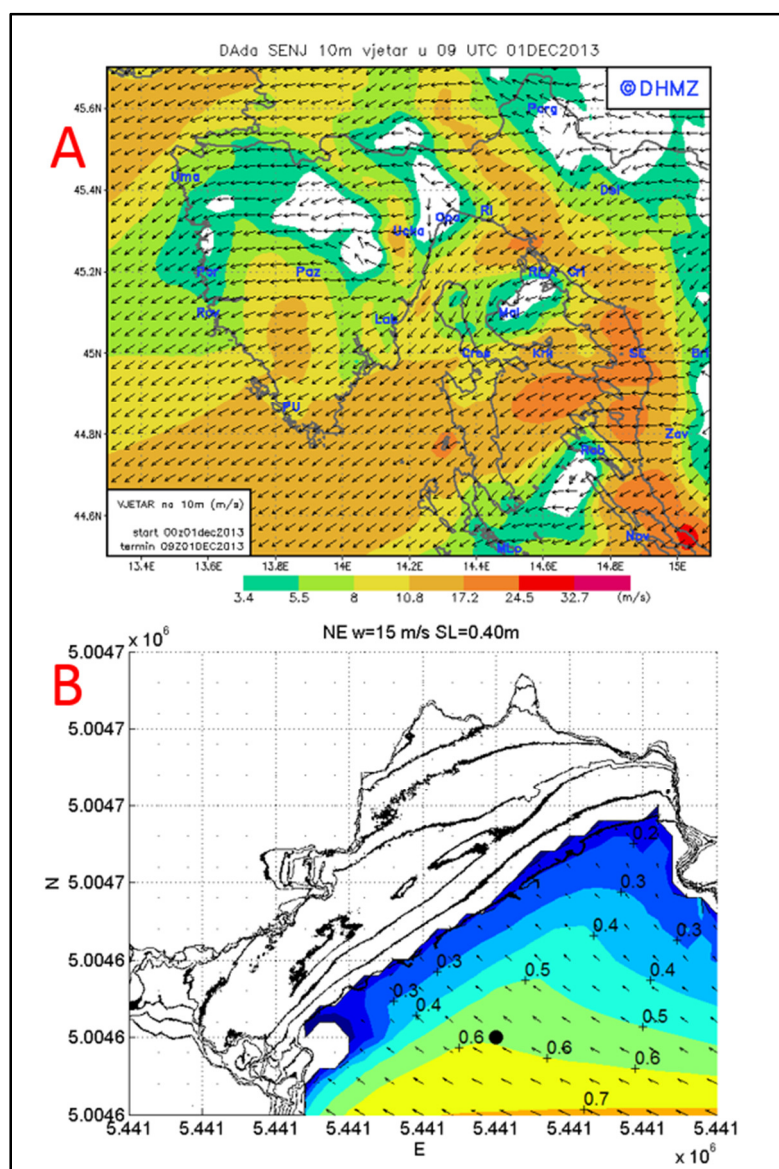
Volumen žala iznad visine 0,25 m n.m. porastao je sa 152 m³ na 174 m³ (tablica 6.3.). Najveći prirast volumena žala, s 36 m³ na 60 m³, zabilježen je na gornjem dijelu žala, iznad visine 0,75 m. Usporedbom foto-realističnih oblaka točaka (slika 6.2. i 6.3.) uočljiva je akumulacija šljunka iznad krupnih sedimentima na sjeveroistočnom dijelu žala. Orijentacija obalne linije žala nije se značajno promijenila.

Ukupne parcijalne promjene volumena žala su 17 m³m⁻¹ (tablica 6.3.). Na zapadnom dijelu žala zabilježena je umjerena erozija, na istočnom akumulacija sedimenta (slika 6.20.). Oko profila 15 erodirana je donja berma i gornji dio žala oko visine 1 m n.m. Oko profila 25 erodirane su donje berme, dok su se sedimenti akumulirani na gornjem dijelu žala. U profilu 35 zabilježena je značajna akumulacija sedimenta, ograničeno je erodirana berma visine 0,60m (slika 6.20.). Migracije sedimenta žala odvijale su se sa srednjih (oko 0,7 m n.m.) prema višim kotama žala (iznad 1 m n.m.). Obalna crta žala pomakla se prema obali kao posljedica pomicanja materijala iz donjih bermi. Transport sedimenta uglavnom je usmjeren primarno prema obali, a tek djelomično prema sjeveroistočnom dijelu žala.

Rezultati sugeriraju da je vjetar iz SE smjera izazvao promjene gornjeg dijela žala. Pretpostavlja se da je donji dio žala formirao vjetar iz NE smjera. Da bi se točno analizirao utjecaj vjetra iz SE i NE smjera nedostaje mjerenje morfologije žala između mjerenja 5(18.11.) i 6(28.11.).

6.3.4.5. Morfološke promjene žala između mjerenja br. 6 (28.11.) i 7 (4.12.)

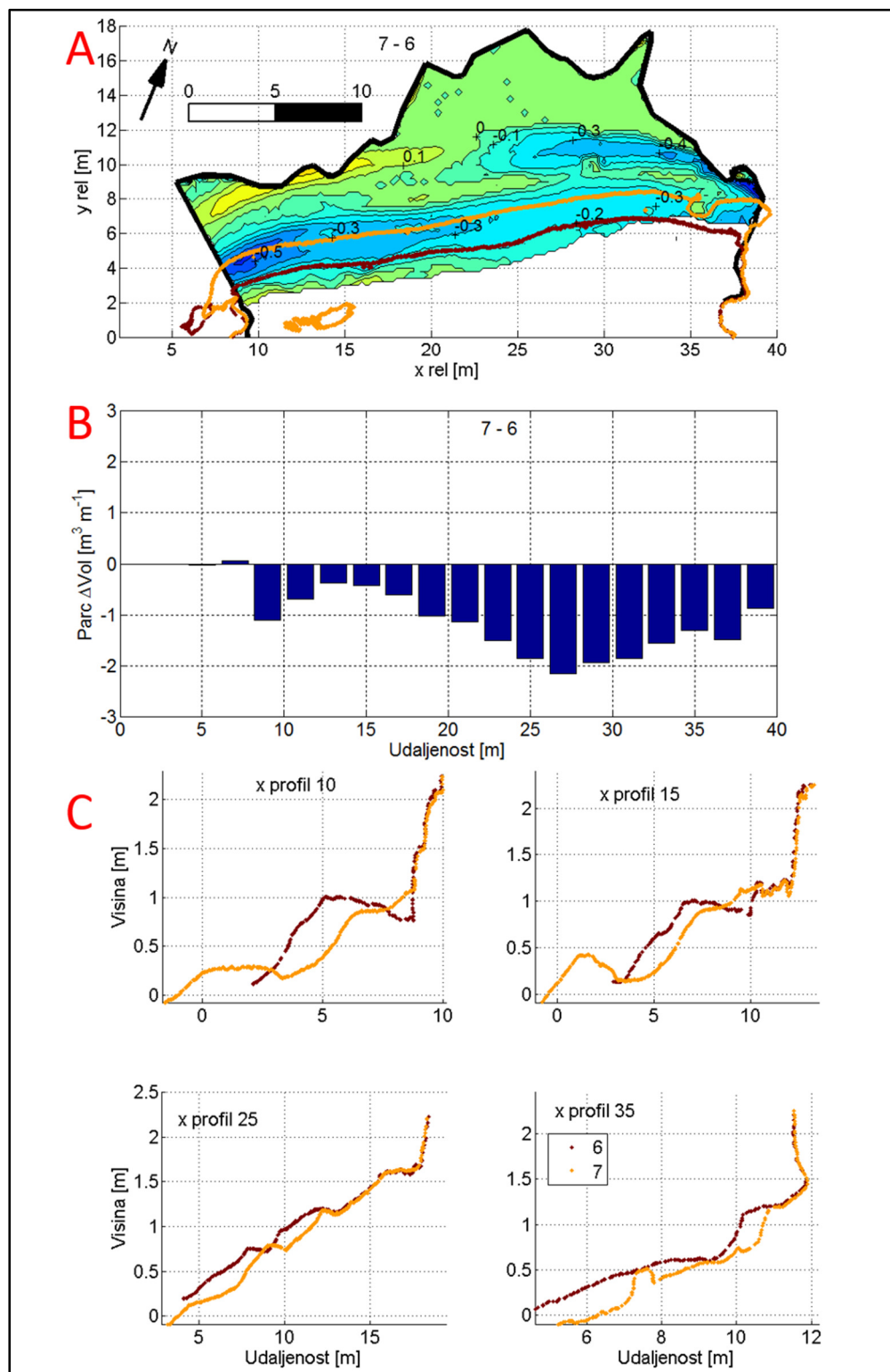
Dana, 1.12.2013. puhao je vjetar iz NE smjera, značajna visina vala u referentnoj točki (slika 6.21.) je 0,60 m, smjera 120°. Površina žala se vizualno značajno povećala (slika 6.3.), slojnica 0,25 m pomakla se prema moru za oko 3 m na zapadnom dijelu žala.



Slika 6.21. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 1.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 6 i 7 (raspored slojnica detaljno je prikazan na slici 3).

Najveća površina žala tijekom provedenih mjerenje zabilježena je u mjerenju broj 7, i to zbog formiranja donje berme (slike 6.3. i 6.22.C.). Motrenja vjetra ukazuju (slika 6.5.) da se jačina NE vjetra smanjivala od 2.12.2013. Pretpostavlja se da je djelovanje valova NE vjetra u padu prouzročilo formaciju donje, izrazito široke berme žala, no za točno odrediti procese, odnosno promjene donjeg dijela žala potrebno je uspostaviti permanentni video monitoring žala.

Na slici 6.22. prikazane su morfološke promjene žala Klančac između mjerenja br. 6 (28.11.) i 7 (4.12.)



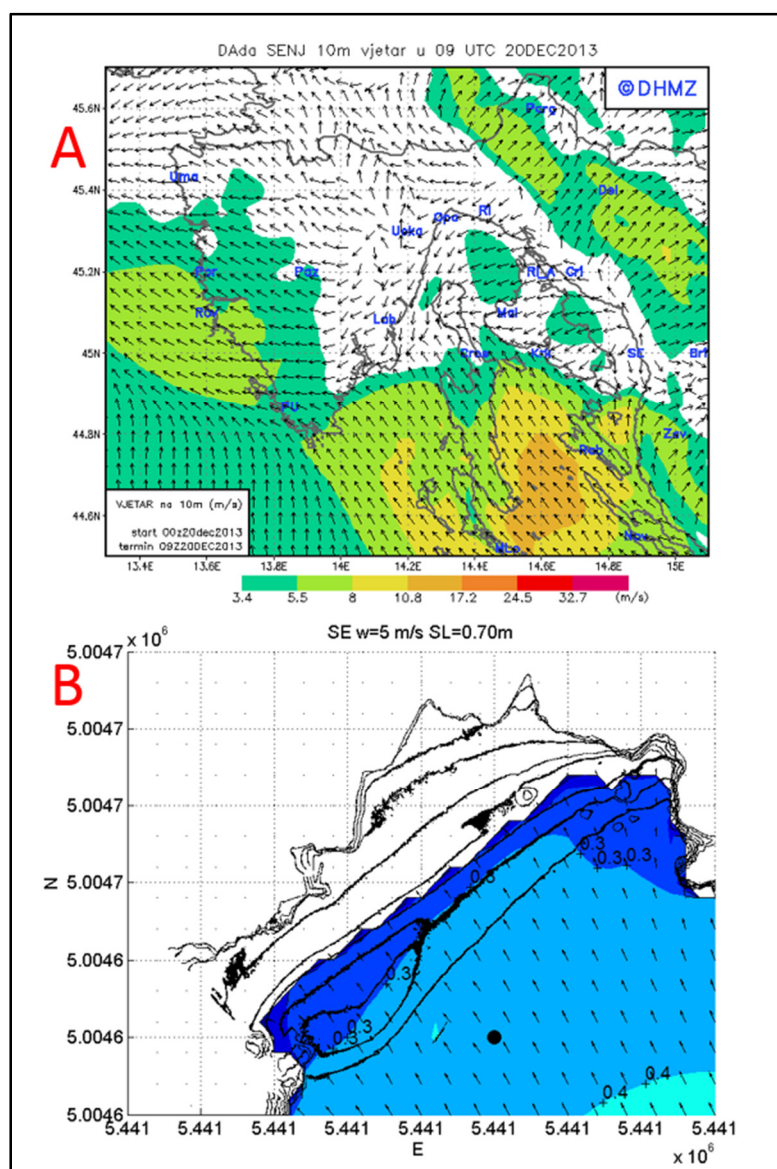
Slika 6.22. Promjene žala Klančac između mjerenja 6 (28.11) i 7 (4.12) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala izražene po metru dužnom žala; C - poprečni presjeci žala

Volumeni žala su se smanjili, iznad visine 0,25 m n.m., sa 172 m³ na 143 m³, erozija žala je manja na višim kotama (tablica 6.2). Ukupne parcijalne promjene volumena

žala su $11 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$. Žalo je erodirano po čitavoj dužini, najveća erozije žala zabilježena je oko profila 27 koji je erodiran do visine 1,25 m n.m. (slika 6.22.). Najmanja erozija je u profilu 15, na kome je gornji dio žala erodiran, na donjem dijelu formirana je berma visine 0,45 m (slika 6.22.C). Najveća erozija je na donjim kotama zapadnog dijela žala, dok je na istočnom dijelu erodiran dio žala do kote 1.20. m. n.m. Promjene visina nisu zabilježene na višim kotama (slika 6.22.).

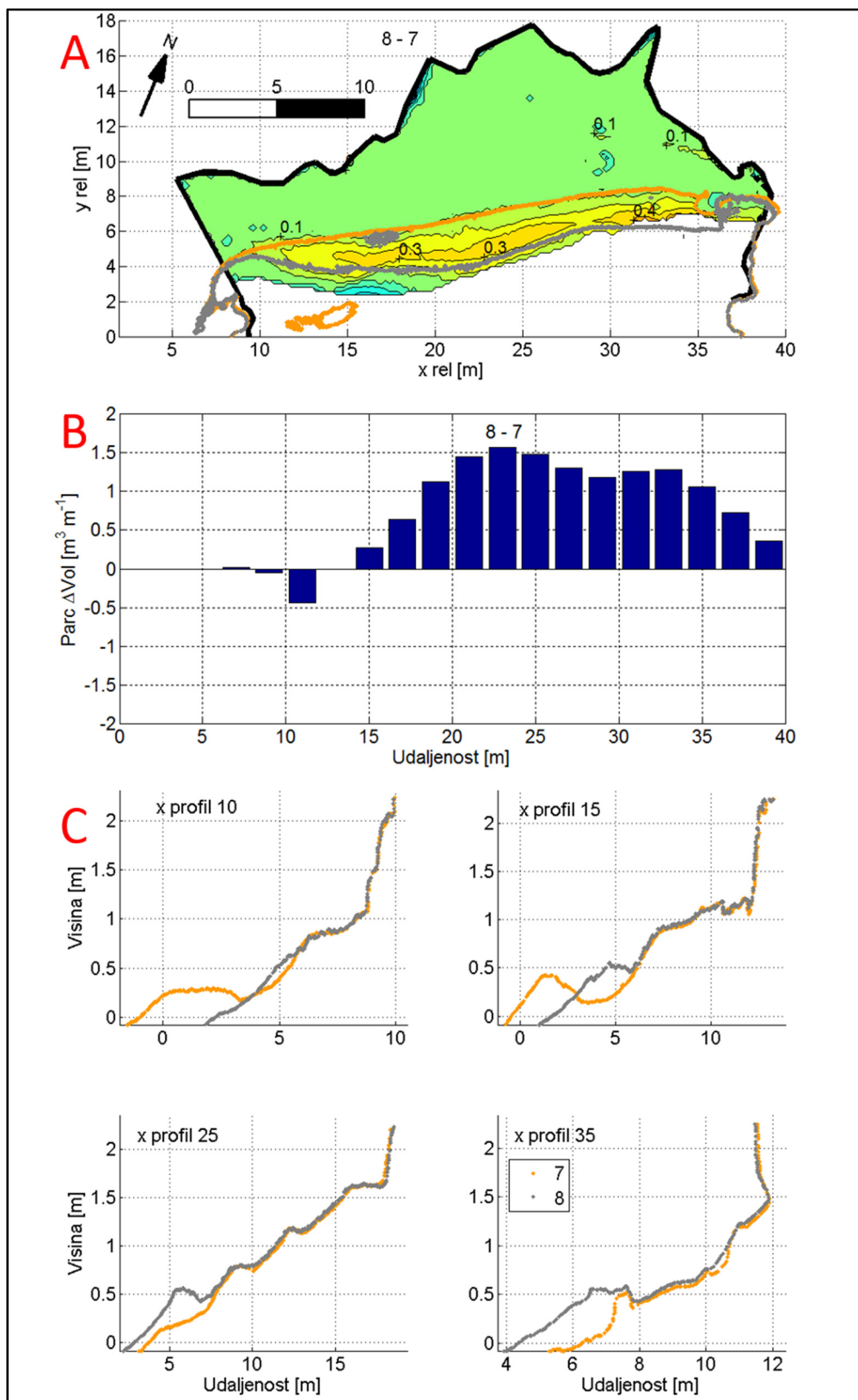
6.3.4.6. Morfološke promjene žala između mjerenja br. 7 (4.12.) i 8 (24.12.).

Između mjerenja br. 7 (4.12.) i 8 (24.12.) nije zabilježen vjetar jači od 3 bofora na motriteljskim postajama Kukuljanovo i Crikvenica (prilog 1). Pregledom prognoza modela Aladin pronašla se potencijalno zanimljiva situacija dana 20.12.2013. kada je na Kvarneru i Kvarneriću prognoziran vjetar iz smjera SE, a u Riječkom zaljevu zatišje. Simulirana značajna visina vala u referentnoj točki je 0,35 m, smjera 150° (slika 6.23.).



Slika 6.23. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 20.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 7 i 8

Detaljni model valovanja baziran je na batimetriji oblaka točkica mjerenja br. 7 (4.12.). Na jugozapadnoj strani žala je recentno formirana berma, koju valovi prvi zahvaćaju i lako erodiraju (slika 6.23.B.). Na slici 6.24. prikazane su morfološke promjene žala Klančac nastale između mjerenja br. 7 (4.12.) i 8 (24.12.).



Slika 6.24. Promjene žala Klančac između mjerenja 7 (4.12) i 8 (24.12) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala izražene po metru dužnom žala; C - poprečni presjeci žala

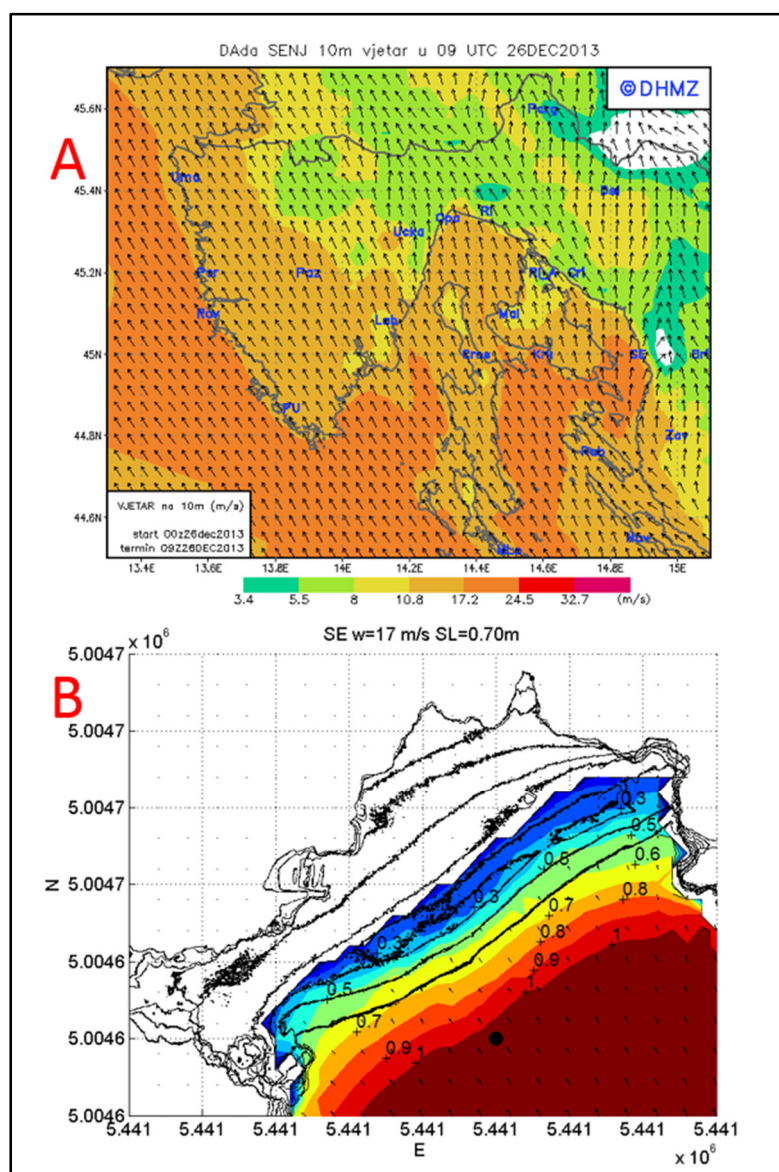
Zabilježene su promjene donjeg dijela žala, do visine 0,50 m n.m., gdje je došlo do akumulacije sedimenta (slike 6.3. i 6.24.). Volumena tijela žala povećao se sa 214 m³ na 232 m³ iznad visine 0 m n.m. (tablica 6.2). Ukupne parcijalne promjene žala su 11.2 m³ (tablica 6.3.). Dominantni smjer migracija sedimenta je prema obali, nema značajnog uzduž-obalnog transporta sedimenta (slika 6.24.). Lokalna erozija sedimenta zabilježena je oko profila 10 kao posljedica erozije berme. Akumulacija sedimenta nastala je između profila 17 i 36, najveće akumulacija sedimenta je oko profila 23 (slika 6.24.C.).

6.3.4.7. Morfološke promjene žala između mjerenja broj 8 (24.12) i 9 (27.12)

Dana 26.12.2013., puhao je SE vjetar prognozirane jačine oko 17 m/s. Simulirana značajna visina vala u referentnoj točki je 1,10 m, smjera 150° (slika 6.26.). Tog dana na terenu su snimljene fotografije udara vala na žalo (slika 6.25.).

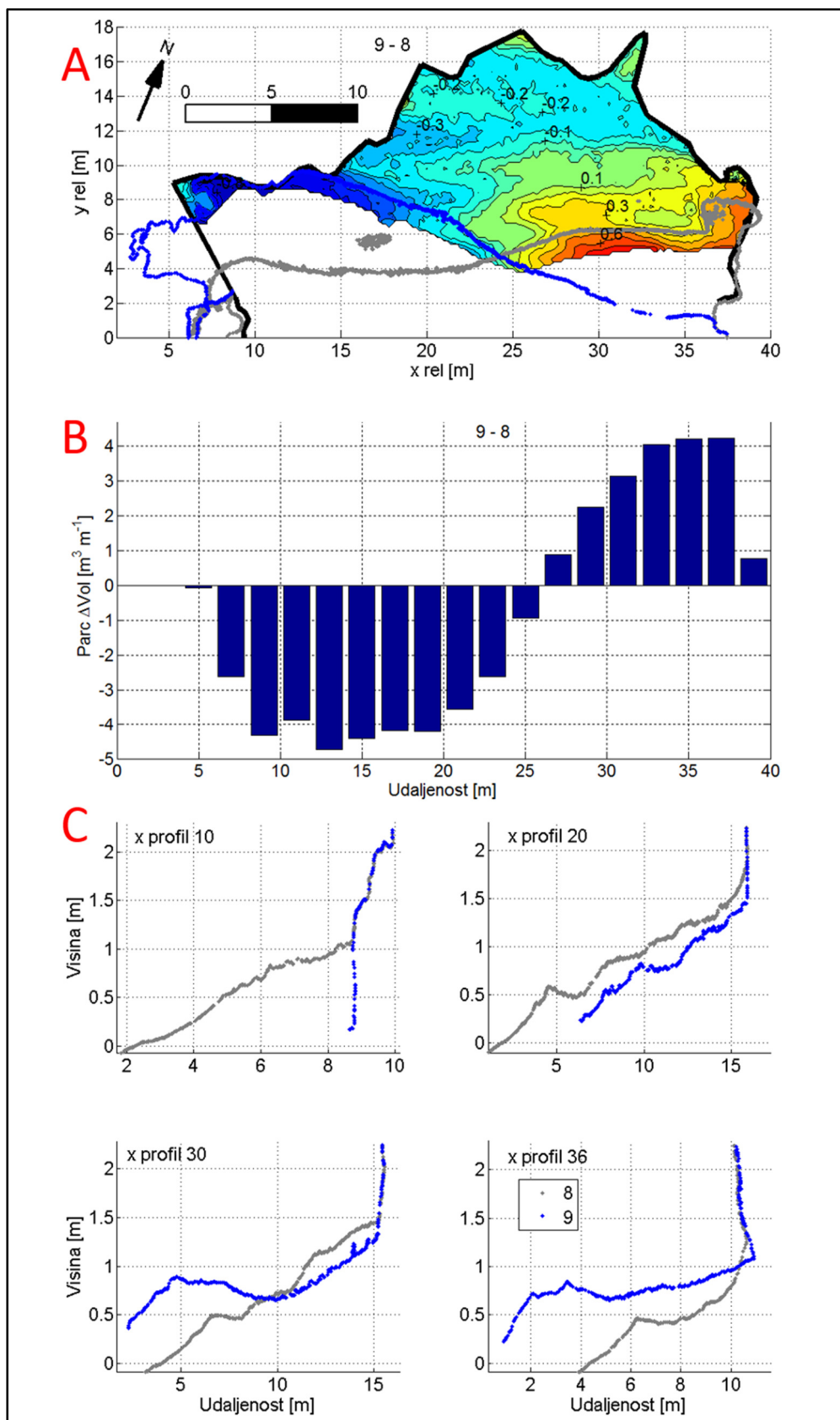


Slika 6.25. Djelovanje valova SE vjetra na žalo Klančac (26.12.2013.)



Slika 6.26 Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (26.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 8(24.12)

Između mjerenja broj 8 (24.12) i 9 (27.12) došlo je do značajnih promjena morfologije žala, koje su vizualno uočljive usporedbom foto-realističnih oblaka točaka (slika 6.3.). Žalo je značajno erodirano, volumena žala iznad visine 0,25 m smanjio se sa 159 m^3 na 137 m^3 (tablica 6.2.) odnosno sa 54 m^3 na 31 m^3 iznad 0,75 m. Na slici 6.27. prikazane su morfološke promjene žala Klančac nastale između mjerenja br. 8 (24.12.) i 9 (27.12.).



Slika 6.27. Promjene žala Klančac između mjerenja 8 (24.12.) i 9 (27.12.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

Ukupne parcijalne promjene volumena žala su $50 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ (tablica 6.3.). Najveća erozije žala zabilježena je između profila 8 i 20, intenzitet erozije je veći od $4 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$ (slika 6.27.). Između profila 26 i 30 sedimenti su akumulirani na nižim kotama, a između profila 30 i 38 duž čitavog žala (slika 6.27.).

6.3.5. Pregled morfoloških promjena žala

Istraživanja morfoloških promjena žala Klančac u razdoblju od 4.10.2013. do 27.12.2013. dala su uvid u prevladavajuće procese žala i njihove uzroke. Pregled ustanovljenih promjena volumena tijela žala i mjerodavnih vjetrova (valova) tijekom provedenih istraživanja dati su u tablici 6.4.

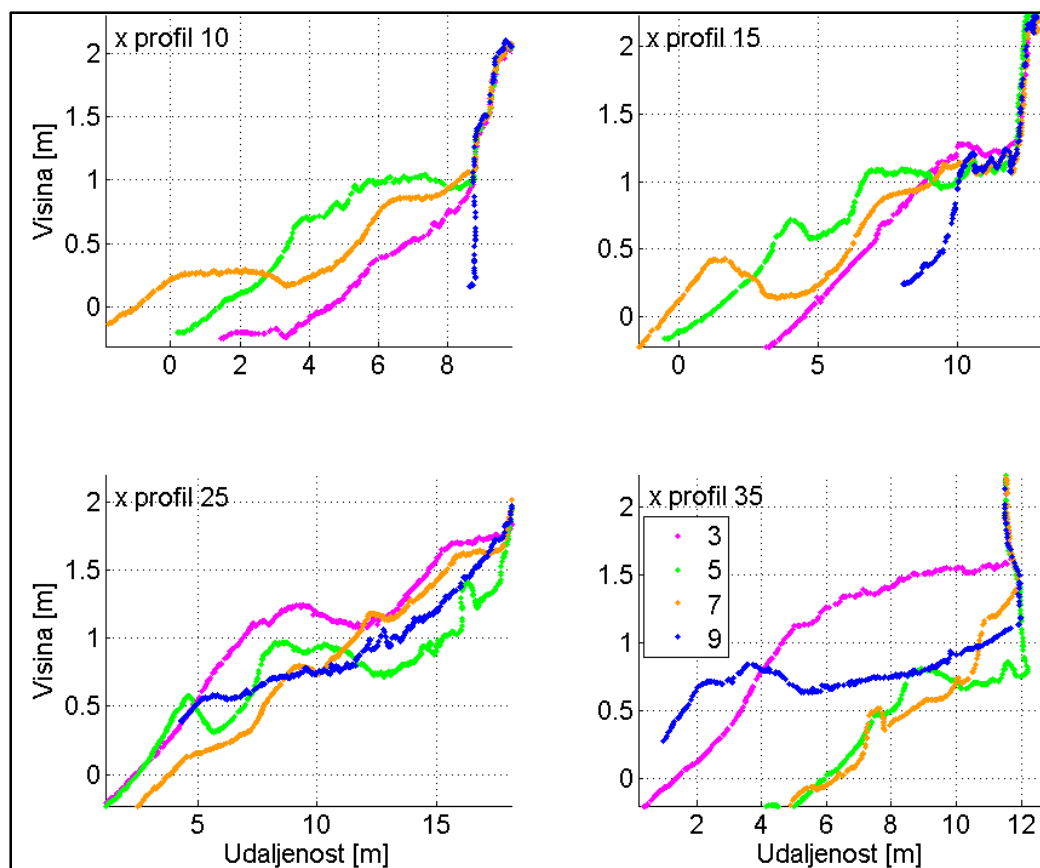
Tablica 6.4. Prognozirani parametri vjetra (ALADIN), simulirani parametri vala (SWAN) između provedenih mjerenja. Zabilježeni volumeni i orijentacije žala tijekom provedenih mjerenja i njihove razlike.

		Vjetar - Prognoza (ALADIN)		Rubni uvjeti det. mod. (SWAN)		Vjetar ref. točka (SWAN)		Vol. Tijela žala	Promj. vol. žala.	Orijent. žala	Rotacija žala
mj.br.	Datum	DIR	w	DIR	Hs	DIR	Hs	V_i	ΔV	DIR	ΔDIR
		°	m/s	°	m	°	m	m^3	m^3	°	°
1	04.10.							270.8		64.3	
		SE	8	160	0.90	153	0.55		11.9		7.8
2	30.10.							282.7		72.0	
		SW	12	195	1.15	162	0.6		16.0		0.9
3	06.11.							298.7		73.0	
		NE	25	60	2.80	120	0.8		-72.9		-14.2
5	12.11.							225.8		58.7	
		SE	8	160	0.90	150	0.55		17.8		-1.9
6	28.11.							243.7		56.8	
		NE	15	60	1.45	120	0.6		-29.8		-3.7
7	04.12.							213.9		53.2	
		SE	4	160	0.45	150	0.35		17.9		8.7
8	24.12.							231.8		61.9	
		SE	17	160	1.80	150	1.1		-31.9		20.0
9	27.12.							199.8		81.9	

Tablica 6.4. prikazuje prosječnu jačinu prognozirane jačine vjetra modela Aladin, rezultate numeričkih simulacija jačina i smjerova valova na rubnim uvjetima detaljnog modela, koji je i dubokovodni val, te u referentnoj točki ispred tijela žala. Prikazani su ukupni volumeni tijela sedimenta žala, razlike volumena između pojedinih mjerenja,

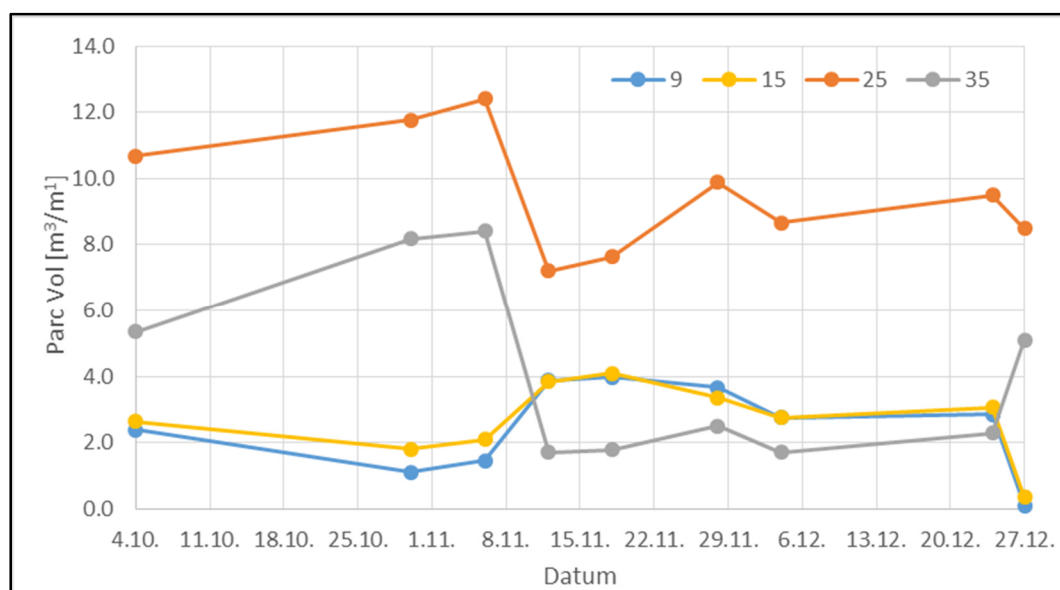
orijentaciju obalne linije žala tijekom pojedinog mjerenja i nastalu rotaciju obalne linije žala između dva mjerenja.

Najveći gubici sedimenta žala zabilježeni su između mjerenja br. 3 (6.11.) i 5 (18.11.) - 73 m^3 , 8 (24.12.) i 9 (27.12) - 32 m^3 , 6 (28.11.) i 7 (4.12.) - 30 m^3 , to koincidira s najvećim zabilježenim vjetrovima (valovima) iz SE i NE smjera. Neovisno o smjeru vjetra najveći gubici sedimenta žala javljaju se nakon najjačih zabilježenih vjetrova. Najveći prirast volumena žala zabilježen je između mjerenja broj 7 (4.12.) i 8 (24.12.) - 18 m^3 , 5 (12.11) i 6 (12.11) - 18 m^3 , 2 (30.10) i 3 (11.) - 16 m^3 , te 1 (4.10.) i 2 (30.10.) - 12 m^3 , sve su puhali vjetrovi iz južnog (S) kvadranta prognozirane jačine 4 do 12 m/s. Na slici 6.28. prikazane su promjene profila 10, 15, 25 i 35 od mjerenja broj 3 (6.11.) do 9 (27.12.)



Slika 6.28. Promjene poprečnih presjeka profila 10, 15, 25 i 35 od mjerenja br. 3 (6.11.) do 9 (27.12.)

Na slici 6.29 prikazane su površine žala u profilima 9, 15, 25 i 35 tijekom provedenih istraživanja.

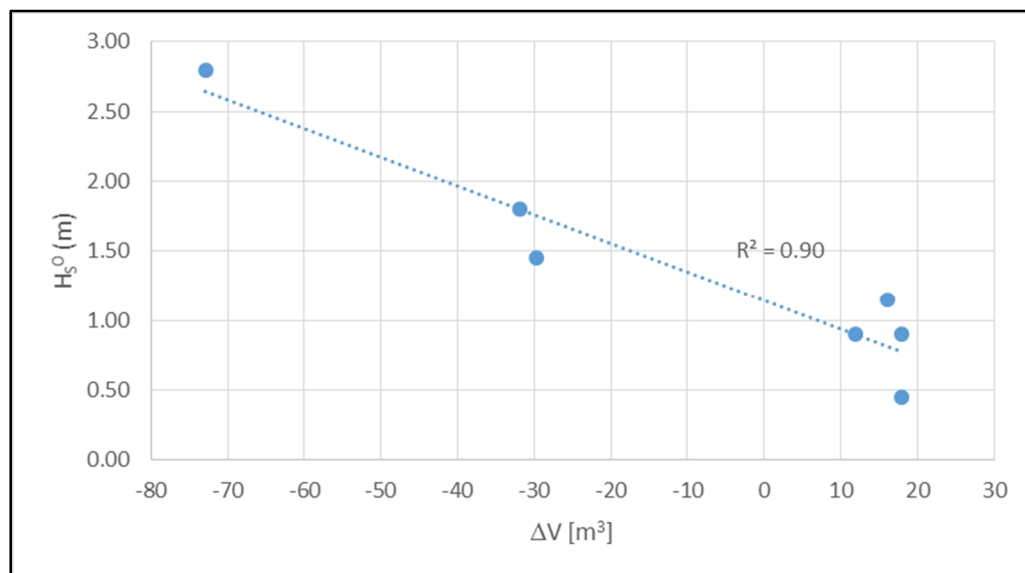


Slika 6.29. Površine žala u profilima 9, 15, 25 i 35.

Profili 25 i 35 značajno su erodirani nakon orkansog vjetra iz NE smjera, između mjerenja br. 3 (6.11.) i 4 (12.11.) (slike 6.28 i 6.29). Djelomični oporavak profila 35 zabilježen je u mjerenju 9 (27.12) nakon olujnog vjetra iz SE smjera, kada je profil 25 dodatno erodiran na nižim kotama. Na zapadnom dijelu žala erozija i akumulacija sedimenta manja je zbog ograničene širine žala (slika 6.1.).

6.4. Diskusija

Na slici 6.60. prikazana je korelacija simuliranih značajnih visina dubokovodnog vala (H_s^0) i promjena volumena žala Klančac kod Brseča.

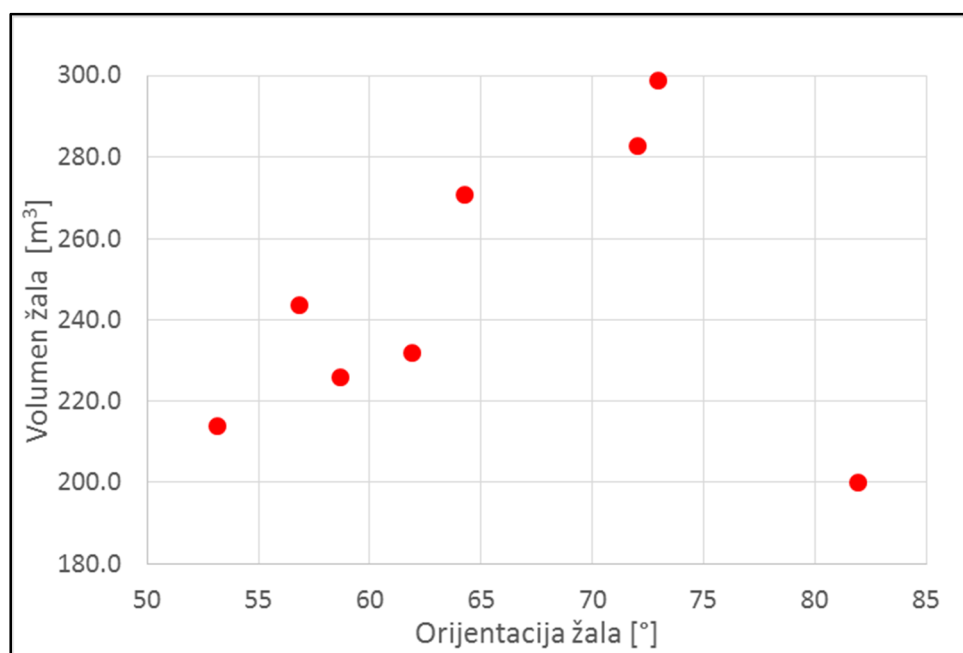


Slika 6.30. Korelacija simuliranih značajnih visina dubokovodnog vala (H_s^0) ispred žala Klančac i promjena volumena žala.

Korelacijska veza između simuliranih značajnih visina dubokovodnog vala i promjena volumena žala Klančac je čvrsta, sa koeficijentom regresije $R^2=0,90$. Erozija žala nastaje djelovanjem olujnih valova, dok se oporavak žala odvija tijekom djelovanja umjerenih valova na žalo iz smjera SE (tablica 6.4). Takvo ponašanje zabilježeno je nizom publiciranih istraživanja za šljunčana žala (Lewis, 1931; Caldwell i Williams, 1985; Hart i Plint, 1989; Sherman, 1991; Ivamy i Kenc, 2006; Ruiz de Alegria-Arzaburu i Masselink, 2010) i minijaturna pjeskovita žala (Dail i dr., 2000; Dehouck i dr., 2009).

Erozija žala nastaje brzo, tijekom jednog olujnog događaja. U ovom radu zabilježene su erozije u rasponu od 30 m³ do 75 m³, dok je akumulacija u rasponu od 10 m³ do 20 m³ između pojedinih mjerenja. Identične promjene zabilježene su na pjeskovitom minijaturnom žalu, gdje je erozija dvostruko brža od akumulacije sedimenta (Dail i dr., 2000).

Veza volumena i orijentacije obalne linije žala prikazana je na slici 6.31.



Slika 6.31. Odnos orijentacije i volumena žala Klančac kod Brseča od mjerenja br. 1 (4.10.) do 9 (27.12.).

Najmanji volumen tijela žala koincidira s krajnjim orijentacijama žala zabilježenim u mjerenjima 5 (12.11.) i 9 (27.12.), nakon najjačih vjetrova iz NE i SE smjera. Tijekom olujnih nevremena čitavo žalo je zahvaćeno erozijskim djelovanjem valova, procesi su intenzivni. Zabilježene su promjene čitavog žala, neovisno o njegovom prijašnjem stanju, koncept memorije žala (Turki i dr. 2013) nema utjecaj na oblik žala nakon najvećih valova. Mizutani i dr. (2003) pokazali su da šljunčano žalo puno brže postiže stanje ekvilibrijuma od pješčanog, za određene vremenske uvijete. Inicijalno stanje žala ima utjecaj kod oporavka žala, koje je puno sporiji proces i nastaje tijekom umjerenih valovanja iz smjerova SE i SW.

Uzduž-obalni (*long-shore*) transport sedimenta uzrokuje rotaciju žala, što se podudara s rezultatima istraživanjima (Short i Masselink, 1999; Short, 2000; Klein i dr., 2002, Ranasinghe i dr. 2004). No tijekom rotacija žala Klančac dolazi i do značajnih oscilacija volumena žala i promjena poprečnih presjeka. To se poklapa s tvrdnjama Ranasinghe i dr. (2004) da rotacija žala ovisi i o transportu sedimenta okomito na obalu (*cross-shore*). Najvećem zabilježenom volumenu tijela žala prethodile su najmanje ukupne parcijalne promjene žala između mjerenja 2 (30.10.) i 3 (6.11.) (tablica 6.2.), kada nisu zabilježene uzduž-obalne (*long-shore*) migracije sedimenta, već samo okomito na obalu (slika 6.11.). U tom slučaju osnovni oblik žala je bio formiran, umjereni vjetar iz

S kvadranta uzrokovao je samo migracije sedimenta prema višim kotama. U takvim slučajevima prijašnje stanje žala ima važan utjecaj na morfološke promjene.

Tijekom mjerenja br. 5 (18.11.), kada je zabilježena značajna erozija istočnog dijela žala, pokazalo se da je spilja na sjeveroistočnom kraju žala tunel koji ima izlaz iza stijene, gdje je formirano malo minijaturno žalo dužine svega nekoliko metara. Taj tunel je većinu vremena ispunjen sedimentima šljunka koji omogućuju relativno brzu izmjenu fluida između čestica šljunka. Pretpostavlja se da se u tunelu induciraju tokovi koji imaju utjecaj na povećanu eroziju tijekom valova iz NE smjera, odnosno akumulaciju tijekom valova iz SE smjera. U budućim istraživanjima utjecaju tog tunela potrebno je detaljno sagledati i istražiti.

Erozija žala Klančac određena je položajem gotovo vertikalnih stjenovitih litica oko tijela žala. Doseg valova do tih stijena varira zbog različitih širina žala. Valovi često dosežu do vertikalnih stijena, čak i u najširem profilu 25 čija je krajnja visina sedimenta 1.60 m n.m. a visina uzdizanja valova (runup) oko 2.8 m (Stockdon i dr., 2006) za simulirane parametre dubokovodnog vala: $H_s^0 = 1.8$ m; $T_s^0 = 3.8$ s (SE vjetar, 26.12.2013.). Nailaskom valova na vertikalnu nepropusnu prepreku (npr. zid ili stijena), na žalu dolazi do povećanog povratnog toka u fazi povlačenja valova. Propagacija fluida slična je kao kod nasutih lukobrana s parapetnim zidom (Burcharth, 1993) kada dolazi do najvećih opterećenja blokova lukobrana. Te povratne struje izazivaju eroziju žala.

Laboratorijska istraživanja u hidrauličkom žlijebu (Van der Werf i Van Gent, 2010) pokazala su da ne dolazi do erozije šljunčanog žala ispred obalnog zida. U ovom radu zabilježena je značajna erozija šljunčanog žala ispred strmih stjenovitih litica čija je hidrodinamički utjecaj analogan utjecaju vertikalnog obalnog zida. Mjerenja u ovom radu su pokazala da kombinacija kuta nailaska i visine valova, morske razine, oblika žala i stijena, te veličine sedimenta može izazvati značajne dužobalne i okomito na obalu migracije sedimenta, zbog čega se ovaj oblik minijaturnog žala mora sagledati kao cjelina. Profili žala na različitim dijelovima žala ponašaju se veoma različito (slika 6.28. i 6.29.), zbog čega istraživanja zasnovana na ponašanju jednog profila mogu dati izrazito krive zaključke o ponašanju minijaturnog žala.

U svim mjerenjima topografije žala jasno su zabilježene donje novoformirane berme, čak i nakon ekstremnih erozija određenih profila. Pretpostavlja se da na žalu Klančac

kod Brseča tijekom djelovanja većih valova dolazi do stalnog pomicanja većih količina sedimenta koje se ponašaju poput „pomičućeg tepiha“ (Bruun, 1968). Taj veliki udio sedimenta u pokretu oblikuje bermu na nižim kotama kada nastaju povoljni hidrodinamički uvjeti za akumulaciju sedimenta.

U ovom radu prikazana je primjena trodimenzionalnih oblaka točaka kao podloga numeričkim simulacijama valovanja, što je omogućilo provođenje simulacija sa realnim utjecajem tijela žala na deformaciju valovanja. Primjena prikazane tehnologije omogućuje razvoj tzv. 'process-response' simulacija, odnosno parametri vala na žalu se mijenjaju ovisno o promjeni morfologije žala. To otvara mogućnost razvoja trodimenzionalnih modela stvarnog ponašanja žala. Dosadašnje numeričke simulacije ponašanja šljunčanog žala ograničene su na ponašanje jednog profila (Pedrozo-Acuña i dr., 2007) ispitanog u hidrauličkom žlijebu.

6.5. Zaključak i buduća istraživanja žala klančac

Tijekom provedenih istraživanja zabilježena je značajna mobilnost sedimenta minijaturnog žala Klančac kod Brseča koja se očituje brzim promjenama oblika, profila, nagiba, orijentacije i volumena žala. Oblaci točaka generirani iz niza fotografija pomoću SfM fotogrametrije idealni su za praćenje takvih promjena minijaturnog šljunčanog žala. Značajna prednost primjene SfM fotogrametrije je brzina snimanja topografije žala, za koju je potrebno 15ak minuta nakon što su postavljene stalne kontrolne točke (GCP) za georeferenciranje modela. Brzina i jednostavnost snimanja omogućuje provođenje češćih snimanja topografije. U tom slučaju se promjene žala mogu bolje povezati s valnom energijom i smjerom valova.

Zabilježene su značajne oscilacije volumena žala, iako su istraživanja provedena u kratkom razdoblju, tijekom zadnjeg kvartala 2013. godine. Promjene volumena tijela žala iznad visine 0,25 m n.m. variraju od 137 do 225 m³.

Erozija minijaturnog žala nastala je brzo, tijekom jednog olujnog nevremena iz NE i SE smjera, dok se oporavak žala odvija postepeno tijekom umjerenih vjetrova iz SE smjera prognozirane prosječne jačine u privjetrištu od 4 do 12 m/s. Erozija žala koincidira s značajnim uzduž-obalnim transportima sedimenta, odnosno parcijalnim promjenama volumena uzduž obale žala i rotacijama obalne linije žala. Volumeni žala manji od 220 m³ iznad visine 0 m n.m. koincidiraju s orijentacijama žala većim od 15°

u odnosu na srednje stanje žala. Dokazana je čvrsta korelacijska veza između simulirane značajne visine dubokovodnog vala i oscilacija volumena žala.

U ovom radu pokazalo se da su obalni procesi žala Klančac pokraj Brseča izrazito aktivni, te da često dolazi do migracija velikog udjela sedimenta žala. Ta aktivnost uzrokuje trošenja sedimenta abrazijom. Abrazija sedimenta može uzrokovati trajnu eroziju žala ukoliko nema donosa novih sedimenta. Zbog toga je potrebno uspostaviti stalni monitoring žala Klančac kod Brseča, koji bi se sastojao od praćenja topografije žala metodologijom prikazanom u ovom radu, te praćenja veličine i prostorne distribucije sedimenta. Taj monitoring bi bio osnova budućim istraživanjima žala Klančac koja bi trebala sadržavati mjerenja valova, morskih struja i razina, praćenja migracija sedimenta žala u podmorju i praćenja donosa sedimenta.

U ovom radu su volumeni žala iznad kote 0.25 m n.m. varirali od 137 m³ do 225 m³, što sugerira da je velika izmjena sedimenta između žala iznad i ispod morske razine. Zbog toga se postavlja potreba proširenja istraživanja na dio žala ispod morske razine i primjene novih tehnologija trodimenzionalnog snimanja podmorja.

7. KRATKOTRAJNE MORFOLOŠKE PROMJENE ŽALA IZAZVANE DJELOVANJEM OTJECANJA SLATKIH VODA I VALOVA, ŽALO UBOKA JUGOZAPADNO OD MOŠĆENIČKE DRAGE

Analize morfoloških promjena žala Uboka temelje su na 3D oblacima točaka i DEMa deriviranim iz niza fotografija SfM fotogrametrijom. Visinska preciznost trodimenzionalnih modela je $\pm 5\text{cm}$, identična kao u prethodnom poglavlju. Istraživanja su provedena od 2.1.2012. do 12.4.2012., tijekom izrazito sušnog perioda, kada su se krški izvori na samom žalu pojavili nakon oborina 3.1.2012. i 12.4.2012. Za vrijeme provedenih istraživanja nije došlo do aktiviranja bujičnog vodotoka, pa tako ni potencijalnog donosa sedimenta.

7.1. Uvod

Rijetka su detaljna istraživanja morfoloških promjena minijturnih šljunčanih žala (Dehouck i dr., 2009, Pranzini i dr., 2013) unatoč velikoj zastupljenosti diljem svijeta. Manji broj znanstvenih publikacija istražuje utjecaj povremenih prodora slatkih voda na minijturna žala (Pranzini i Rosas, 2009; 2013; Pranzini i dr., 2013, Faivre i dr., 2011). Veći broj istraživanja tematski vezan uz morfodinamiku laguna (npr. Weir i dr., 2006; Hart, 2009).

U uvali Uboka žalo je formirano na ušću istoimenog bujičnog vodotoka, akumulacijom bujičnih sedimenta. Površina bujičnog sliva je oko 4.3 km^2 , sliv je izrazito strm (do 100%), vremena koncentracije sliva su kratka. Sliv bujice Uboka je krški sliv, karakterizira ga visoka upojnost. Godišnje količine oborina kreću se u rasponu od 1500 do 2000 mm. Tijekom mjerenja i obilazaka lokacije rijetko je zabilježeno otjecanje bujičnih voda. Izviranje podzemnih voda na samom žalu je često, javlja se nakon kiša, recesija otjecanja ovisi o količinama oborina i ispunjenosti podzemnog krškog vodonosnika. U ovom radu nisu se sagledali hidrološki aspekti otjecanja, niti potencijalni donos sedimenta bujičnim otjecanjem.

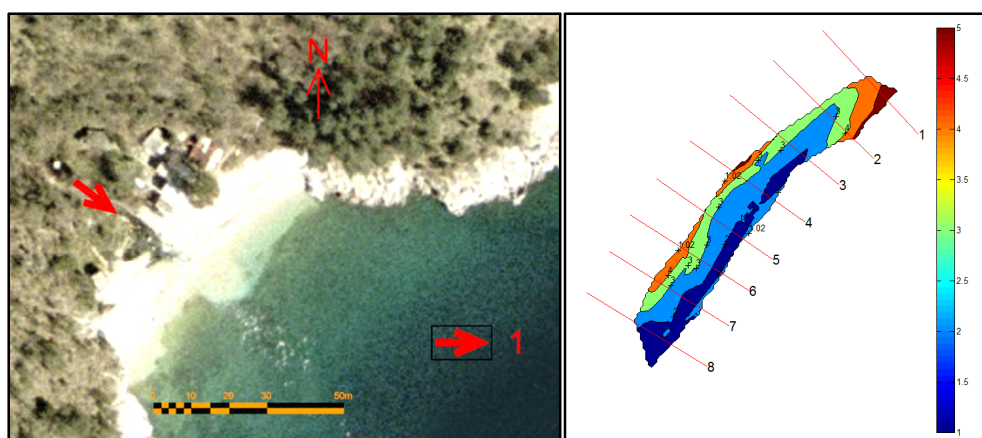
Bujični kanal nalazi se na jugozapadnoj trećini žala, u njega se ulijeva većina podzemnih voda koja izvire uzvodno od žala (slika 1.4.). Dio podzemnih voda izvire i

na samom žalu jugozapadno i sjeveroistočno od bujičnog kanala, ovisno o hidrološkim uvjetima. Kanal na žalu formira se tokom slatkih voda, može znatno varirati ovisno o protocima istjecanja, plimi i oseci, te valovima koji djeluju na žalo (slika 7.1.).



Slika 7.1. Zabilježena stanja žala Uboka tijekom jeseni 2013.

Žalo Uboka smješteno je u uvali dubokoj 106 m, širokoj 38 m što je čini slabo zaklonjenom (*low-intended*) po klasifikaciji minijturnih žala (Bowman i dr., 2009; Hsu i dr., 1989 a i b). Veličina sedimenta žala na površini varira od 0,5 do 5 cm, na slici 7.2, prikazana je zonacija površinskih sedimenta snimljena 19.2.2012. godine.



Slika 7.2. Žalo Uboka, orto-foto i zonacija sedimenta žala (19.2.2014)

Na bokovima uvale nalaze se strme vertikalne karbonatne stijene koje omogućuju povoljno snimanje niza fotografija SfM fotogrametrija (slika 7.2.). Žalo je orijentirano sjeveroistok - jugozapad (NE-SW). Rotacija minijaturnog žala ovisi o dominantnim vjetrovima iz SE (jugo) i NE (bura) smjera, te utjecaju koncentriranog istjecanja podzemnih voda.

7.2. Metodologija

Od 2.1.2012. do 12.4.2012. godine provedeno je 11 uzastopnih mjerenja topografije žala u uvali Uboka (tablica 7.1.).

Tablica 7.1. Redni brojevi, datumi i integrirani volumeni žala od 2.1.2012. do 11.4.2012.

R.Br. Mjerenja	Datum	Volumen žala
[1]		m ³
1	2.1.12.	767
2	5.1.12.	712
3	20.1.12.	708
4	24.1.12.	725
5	5.2.12.	782
6	9.2.12.	769
7	14.2.12.	818
8	17.2.12.	816
9	11.3.12.	812
10	11.4.12.	809
11	12.4.12.	785

Mjerenja topografije žala provedena su korištenjem SfM fotogrametrije. Verifikacija i georeferenciranje trodimenzionalnih oblaka točaka napravljena je identičnim postupkom opisanim u poglavlju 5. Oblak točaka mjerenja br. 8 (17.2.) je referentni oblak točaka, kada su provedena mjerenja SfM fotogrametrijom i RTK-GPS uređajem. Točke izmjerene GPS uređajem korištene su za georeferenciranje i verifikaciju oblaka točaka. Oblaci točaka georeferencirani su uz pomoću 9 kontrolnih točaka (GCP), od kojih su 5 fiksnih točaka označenih markerom, dok su preostale 4 točke kocke dimenzija 65x65x65 mm. Verifikacija modela zasnovana je na visinskoj razlici 25 verifikacijskih točaka mjerenih GPS uređajem i SfM fotogrametrijom, od kojih je 17 unutar definirane površine žala, dok su ostale točke na stijenama izvan površine žala. Korijen srednjeg kvadratnog odstupanje (RMSE) vertikalnog odstupanja visina svih

točaka je 4,1 cm, točaka unutar žala 3,7 cm, najveće zabilježeno odstupanje verifikacijske točke je 9 cm. Vertikalna preciznost modela definirana je odstupanjem od ± 5 cm, što je unutar definirane preciznosti RTK-GPS uređaja. Automatsko referenciranje modela, kojim se povećala preciznost uzastopno mjerenih 3D oblaka točaka žala Klančac kod Brseča, nije provedena zbog neujednačenog snimanja fiksnih dijelova scene. Preciznost modela od ± 5 cm sagledana je u grafičkim prikazima i obradama podataka, zabilježene promjene visina žala višestruko su veće od nominalne preciznosti modela.

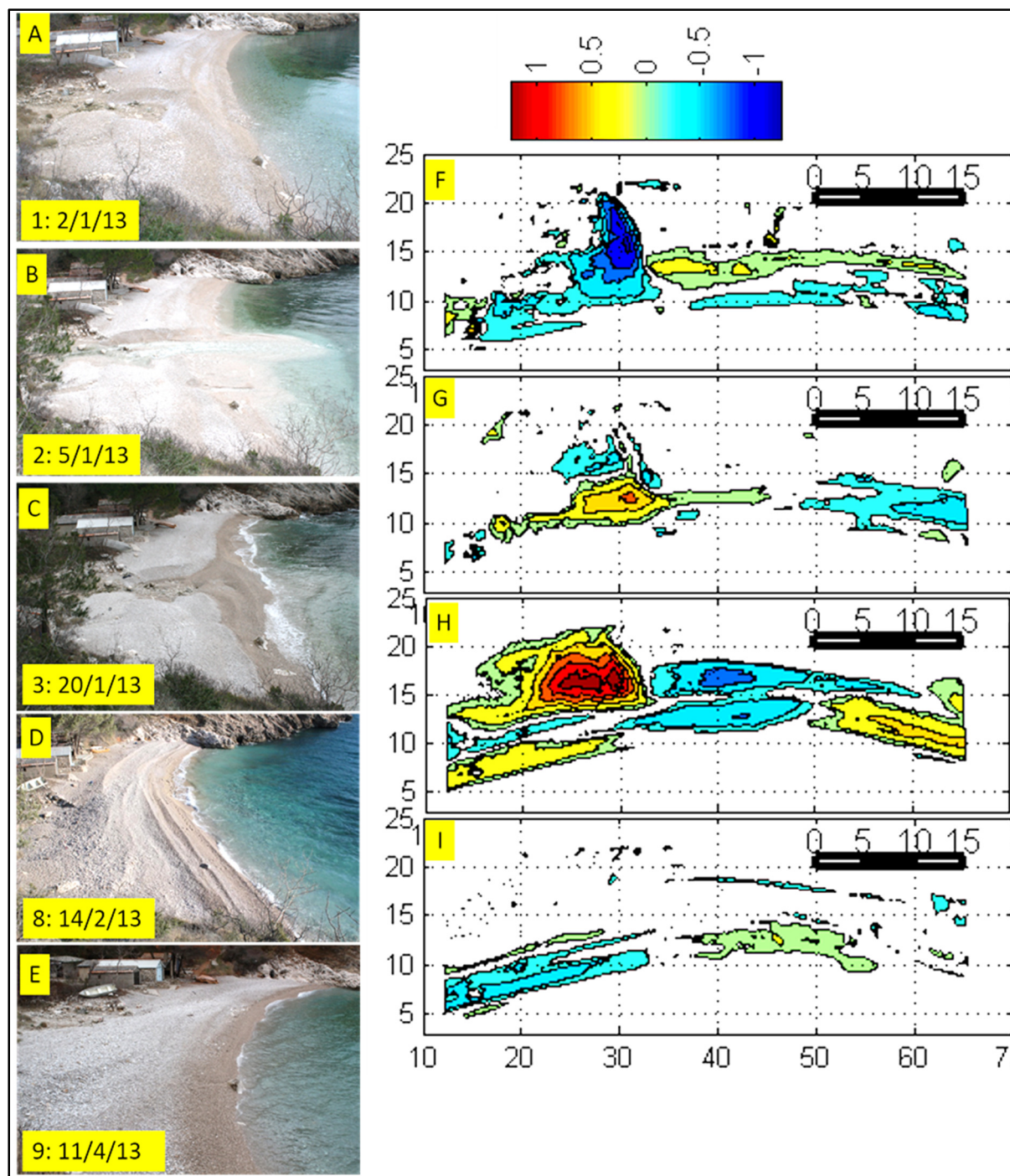
Morfološke promjene žala analizirane su korištenjem meteoroloških podataka s lokalne meteorološke postaje Mošćenice, koja je udaljena 5 km od lokacije, te službenih meteoroloških motriteljskih postaja Kukuljanovo i Crikvenica (DHMZ).

7.3. Rezultati

Tumačenje rezultata podijeljeno je na karakteristične morfološke promjene minijaturnog žala koje su definirane na osnovi provedenih terenskih mjerenja, pregleda i obrade prikupljenih podataka, te analize meteoroloških podataka. Karakteristične morfološki promjene minijaturnog žala Uboka su: otvaranje žala, oporavak žala i faza bez značajnih promjena. Nakon prodora koncentriranog toka voda dolazi do otvaranja žala (*beach opening*) na mjestu toka voda i lepezaste akumulacije sedimenta u podmorju neposredno ispred ušća kanala (*sediment lobe*). Do otvaranja žala došlo je između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.2.) (slika 7.3.), te mjerenja br. 10 (11.4.) i 11 (12.4.). Oporavak žala (*beach recovery*) karakterizira transport lepezasto akumuliranih sedimenta iz podmorja prema žalu. Brzina oporavka žala ovisi o otjecanju slatkih voda i djelovanju valova. Oporavak žala se odvijao između mjerenja br. 2 (5.2.) i 7 (14.2.) (slika 7.3.). Razdoblje kada na žalu nema značajnih promjena ili su promjene ograničene samo na donji dio žala definiran je kao stadij žala bez značajnih promjena. Između mjerenja br. 7 (14.2) i 11 (11.4) nije došlo do značajnih promjena žala (slika 7.3.).

7.3.1. Promjene visina žala

Promjene visina žala između karakterističnih morfoloških promjena žala prikazane su na slici 7.3.



Slika 7.3. Fotografije žala snimljene tijekom karakterističnih mjerenja i promjene visina žala (m)

F - otvaranje žala između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1)

G - spori oporavak žala između mjerenja br. 2 (5.1.) i 4 (24.1.)

H - brzi oporavak žala između mjerenja br. 4 (24.1.) i 8 (14.2.)

I - bez značajnih promjena između mjerenja br. 8 (14.2.) i 9 (11.4.)

Najveća erozija žala (1,2 m) nastala je otvaranjem tijela žala između mjerenje br. 1 (2.1.) i 2 (5.1). Najveća akumulacija sedimenta i kao najveće promjene duž čitavog žala zabilježene su za vrijeme puhanja orkanskog vjetera iz NE smjera (bure), kada je došlo do akumulacije sedimenta u kanalu (1,40 m), sjeveroistočnom (0.50 m) i jugoistočnom (0.30 m) dijelu žala, dok je središnji dio žala erodiran (0,50m) (slika 7.3.).

Tablica 2. prikazuje trajanje prosječne 10-minutne i maksimalne brzine vjetrova iz NE (bure) i SE (juga) smjera prema meteorološkoj stanici Mošćenice, ukupne promjene volumena i intenzitet promjene volumena žala tijekom pojedinog karakterističnog morfološkog stadija žala. Intenzitet promjene volumena žala definiran je kao promjena volumena tijela žala u danima (Dail i dr., 2009).

Tablica 7.2. Trajanje (u satima i postocima), maksimalne i prosječne srednje satne brzine vjetrova iz NE i SE kvadranta. Ukupne promjene volumena i intenzitet

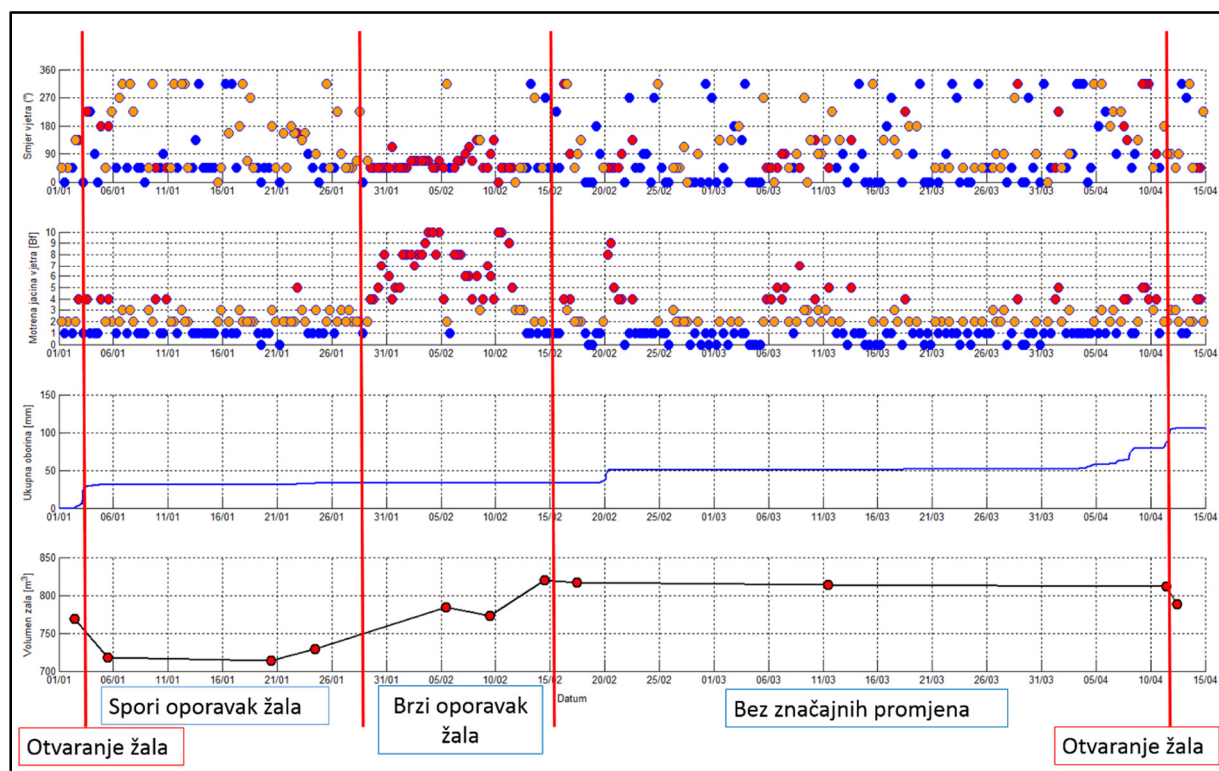
MS Mošćenice - vjetar			srednji satni vjetar - NE > 2 m/s				srednji satni vjetar - SE > 2 m/s				Promj. Vol. Žala	
srednja satna jačina (m/s)			trajanje		brzina (m/s)		trajanje		brzina (m/s)		ukup.	int.
Od	Do	Morf. stadij žala	N hr	N hr (%)	srednja	max	N hr	N hr (%)	srednja	max	ΔV	m^3/day
2.1.	5.1.	Otvaranje	2	3%	4.4	5.1	4	6%	2.9	3.7	-54.9	0.763
5.1.	24.1.	Spori oporavak	10	2%	3.3	5.9	12	3%	4.3	10.5	12.7	0.028
24.1.	14.2.	Brzi oporavak	206	41%	7.0	12.9	49	10%	5.5	9.4	92.7	0.184
14.2.	11.4.	Bez znač. promj.	57	4%	4.5	11.0	72	5%	3.4	10.2	-8.9	0.007

7.3.2. Promjene volumena žala

Promjene volumena žala određene su iz DEMa žala deriviranih iz 3D oblaka točaka. Volumeni žala su integrirani unutar definirane površine žala od visine 0,25 m n.m. do gornje granice tijela žala. Metodologija integracije volumena jednaka je metodologiji primijenjenoj na žalu Klančac kod Brseča (poglavlja 5 i 6).

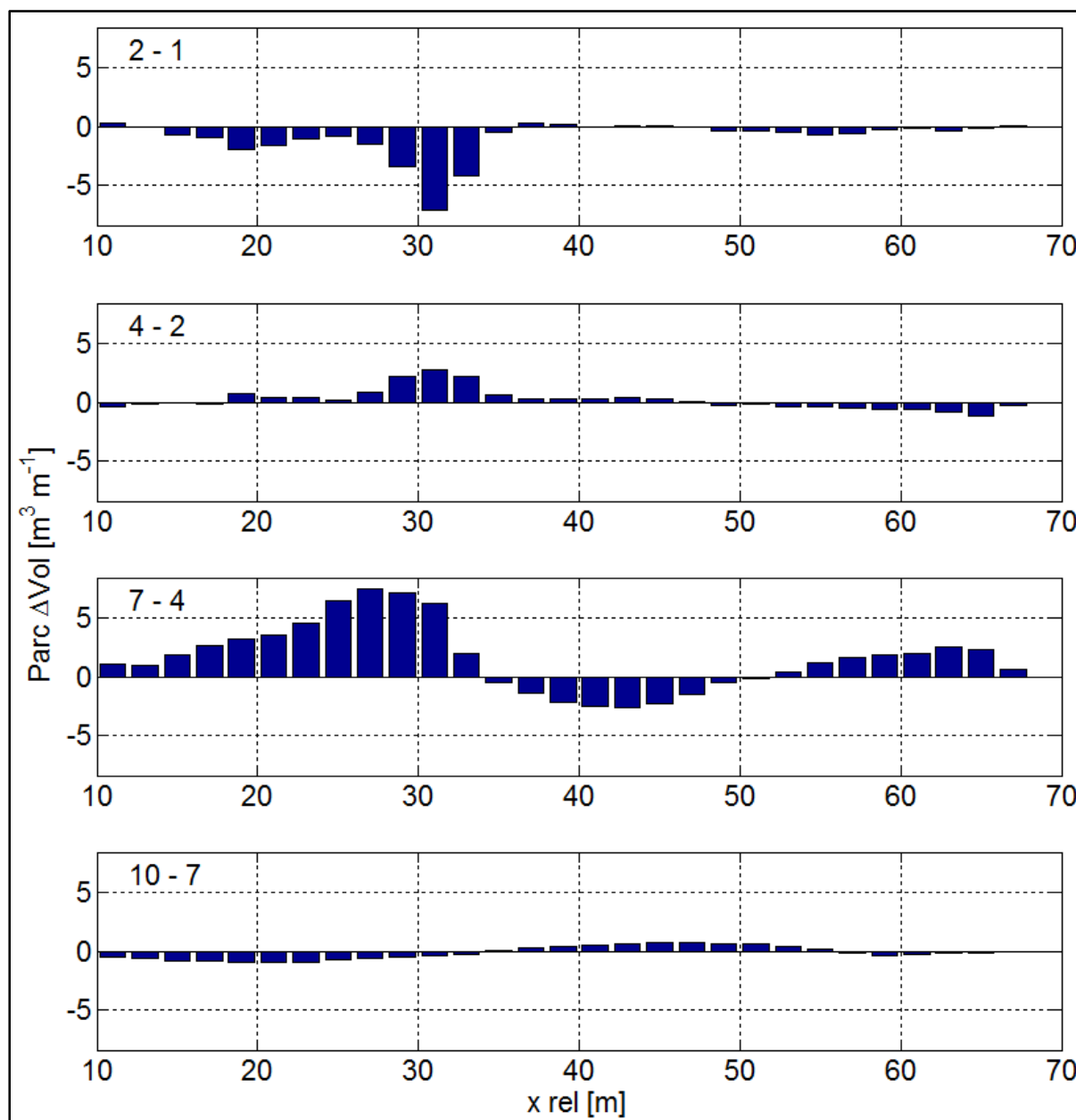
Značajne promjene volumena žala nastale su između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1), 4 (24.1.) i 5 (5.2.), 10 (11.4) i 11 (11.4). Slika 7.4. prikazuje integrirane volumene žala pojedinog mjerenja, satne jačine i smjerove vjetera (MS Mošćenice), te prethodno definirane karakteristične morfološke stadije žala od 1.1.2012. do 11.4.2012. godine.

KRATKOTRAJNE MORFOLOŠKE PROMJENE ŽALA IZAZVANE DJELOVANJEM OTJECANJA SLATKIH VODA I VALOVA, ŽALO UBOKA JUGOZAPADNO OD MOŠČENIČKE DRAGE



Slika 7.4. Specifični morfološki stadiji žala. Srednje satne brzine (A) i direkcije (B) vjetra; C-kumulativna godišnja oborina (mm); D-Integrirani volumen žala (m³)

Na slici 7.5. prikazane su uzdužne parcijalne promjene volumena žala između karakterističnih morfoloških stadija žala.



Slika 7.5. Parcijalne promjene volumena uzduž žala [m^3m^{-1}]. A - otvaranje žala: 1 (2.1.) – 2 (5.1.), B - spori oporavak žala: 2 (5.1.) – 4 (24.1.), C - brzi oporavak žala: 4 (20.1.) – 7 (14.2.), D - bez značajnih promjena 7 (14.2.) – 10 (11.4.)

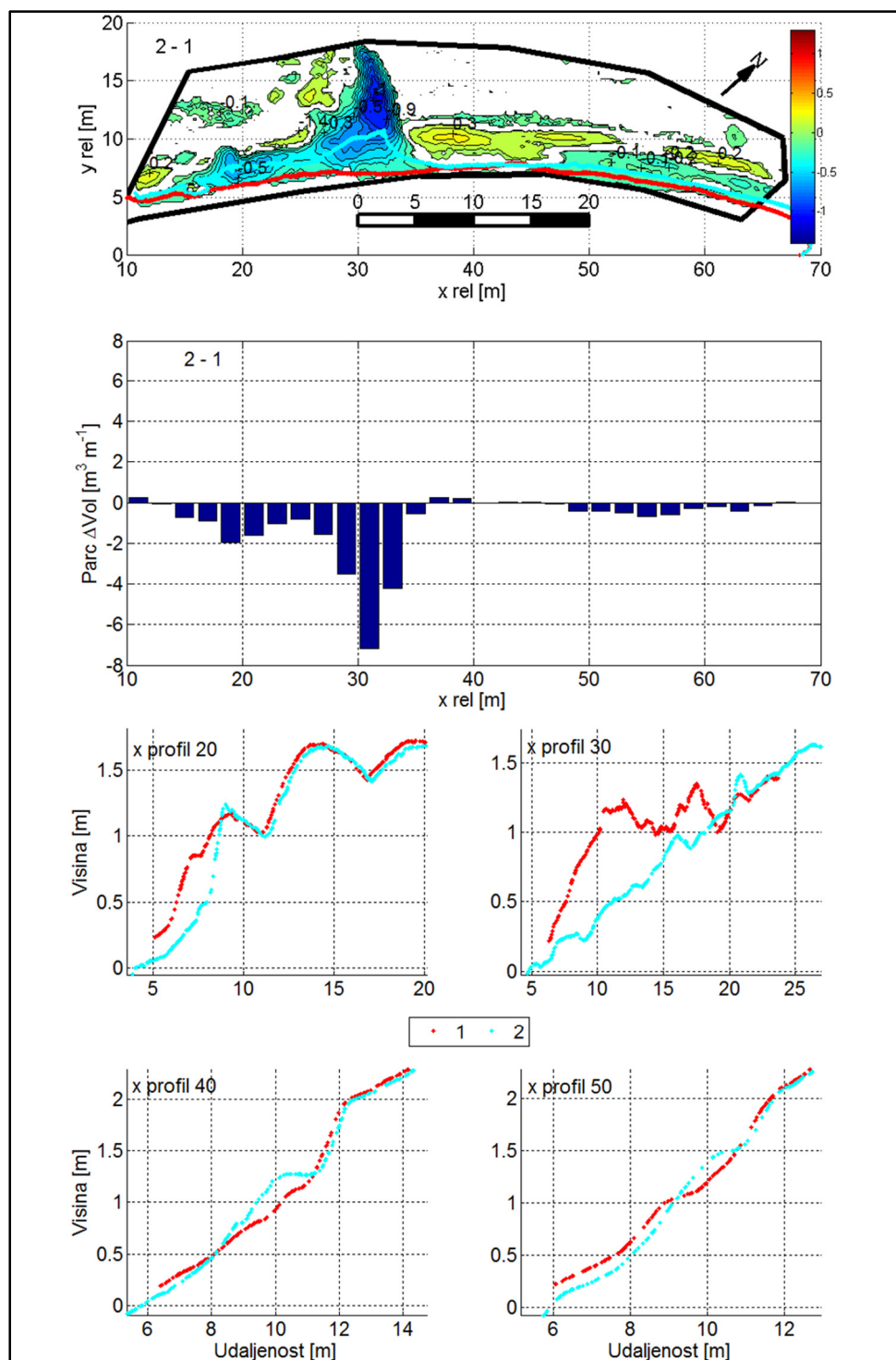
Najveća parcijalna erozija žala ($7,2 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$) nastala je između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1.), otvaranjem žala i formiranjem kanala oko profila 31. Najveća parcijalna akumulacija sedimenta ($7,6 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$) zabilježena je tijekom brzog oporavka žala između mjerenja 4 (24.1.) i 7 (14.2.) oko profila 27 (slika 7.5.). Parcijalne promjene volumena tijela žala tijekom perioda bez značajnih promjena i sporog oporavka opravka žala

višestruko su manje od promjena zabilježenih tijekom otvaranja i brzog oporavka žala (slika 7.5.).

7.3.3. Detaljan opis karakterističnih morfoloških promjene žala

7.3.3.1. Otvaranje žala

Na slici 7.6. prikazane su promjene visina, uzdužne parcijalne promjene volumena i profili žala između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1.).



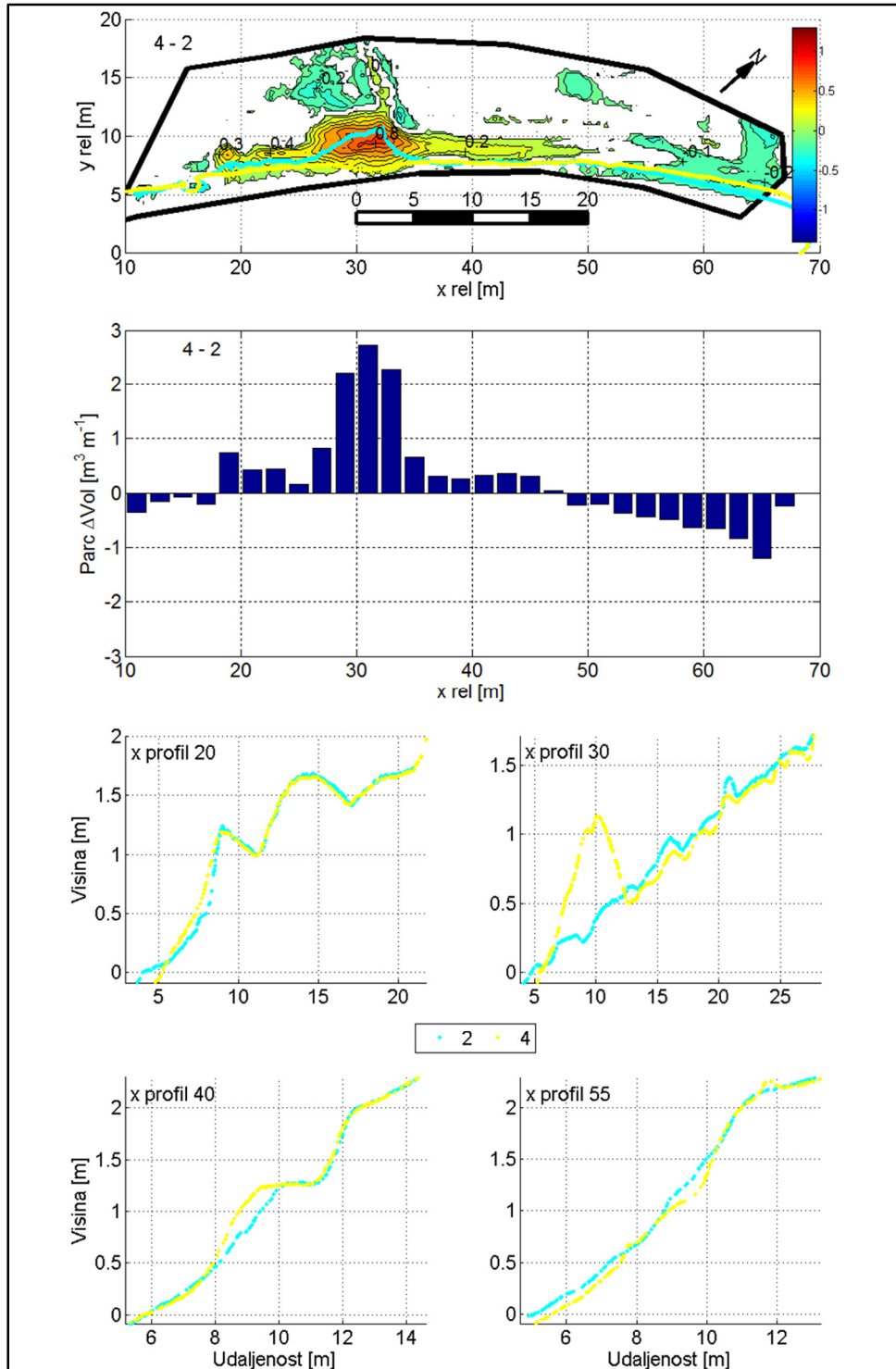
Slika 7.6. Promjene žala Uboka između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1.) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

Krški izvor uzvodno od žala aktiviran je 3.1.2012. nakon 29 mm oborina (MS Mošćenice). Koncentrirano istjecanje slatkih voda uzrokovalo je eroziju žala (55 m^3), intenzitet promjena (smanjenja) volumena žala je $0,763 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$ (tablica 7.2.). Najveća

erozija (1,20 m) nastala uslijed lateralnog širenja postojećeg kanala djelovanjem toka vode na obalu kanala oko profila 31 (slike 7.3. i 7.6.). Šljunčana barijera na ušću kanala erodirana je, sedimenti su odneseni prema moru. Manja erozija nastala je oko profila 19, gdje se javlja sekundarni izvor podzemnih voda (slika 7.2.). Između mjerenja 1 (2.1.) i 2 (5.1.) došlo je do formiranja nove berme visine 1,25 m n.m. (slika 7.3.) istočno od kanala (profil 35 – 65). Pretpostavlja se da je ta berma nastala migracijom lepezasto akumuliranih sedimenta žala ispred ušća kanala prema obali, te migracijom sedimenta sa nižih na više kote žala. U promatranom periodu dominantne su migracije sedimenta okomito na obalu (*cross-shore*), uzduž-obalne (*long-shore*) migracije sedimenta su zanemarive.

7.3.3.2. SPORI OPORAVAK ŽALA

Na slici 7.7. prikazane su promjene visina, uzdužne parcijalne promjene volumena i profili žala između mjerenja br. 2 (5.1.) i 4 (24.1.).

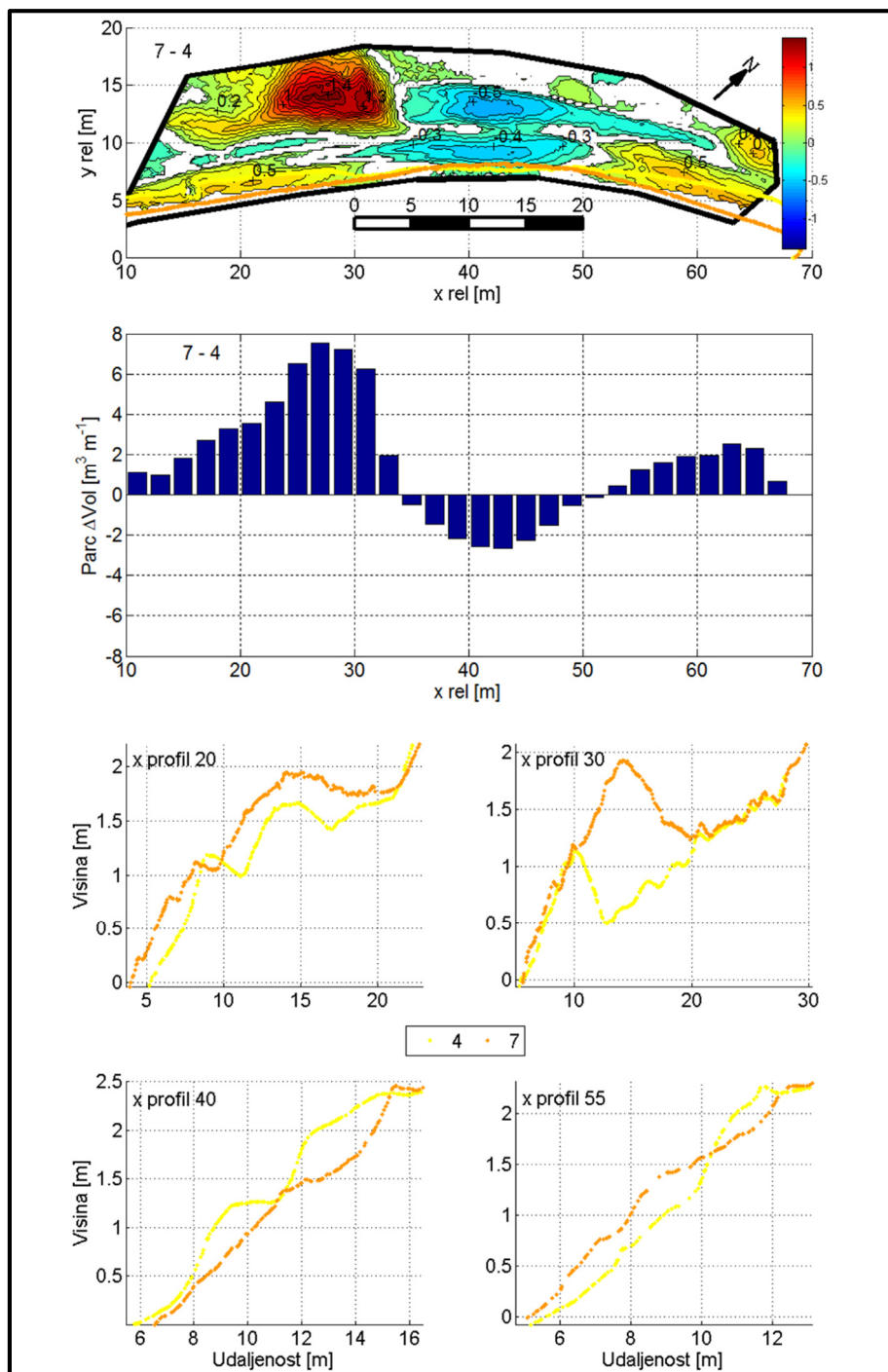


Slika 7.7. Promjene žala Uboka između mjerenja 2 (5.1.) i 4 (24.1.); A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena; C - poprečni presjeci žala

Između mjerenja 2 (5.1.) i 4 (24.1.) zabilježen je porast volumena žala od 12,7 m³, brzina promjena je 0,03 m³dan⁻¹ (tablica 7.2.). Nakon što su se smanjila otjecanja podzemnih voda (između 5.1. i 20.1.) došlo je do akumulacije sedimenta u tada neaktivnom kanalu, gdje je formirana berma visine 1,10 m između profila 25 i 35 (slika 7.3.), gdje je zabilježen i najveći uzdužni parcijalni prirasti volumena žala (2,73 m³/m¹). Istočna strana žala je erodirana. Recentno formirana berma nastala tijekom prve faze oporavka žala prikazana je na slici 7.3.C.) koja prikazuje nedavno formiranu bermu.

7.3.3.3. BRZI OPORAVAK ŽALA

Na slici 7.8. prikazane su promjene visina, parcijalne promjene volumena i profili žala između mjerenja broj 4 (20.1.) i 7 (14.2.).



Slika 7.8. Promjene žala Uboka između mjerenja 4 (24.1.) i 7 (14.2.); A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala

Između mjerenja br. 4 (20.1.) i 7 (14.2.) zabilježene su najveće morfološke promjene žala u uvali Uboka tijekom provedenih istraživanja (slika 7.3.). Volumen žala povećan je za oko 93 m³. Intenzitet povećanja volumena je 0,18 m³dan⁻¹. Taj period je definiran kao brzi oporavak žala. Tada su zabilježeni orkanski vjetrovi iz NE (bura) smjera. Prosječna satna brzina vjetra veća od 2 m/s trajala je 41% (206 sati) vremena na MS Mošćenice (tablica 7.2.).

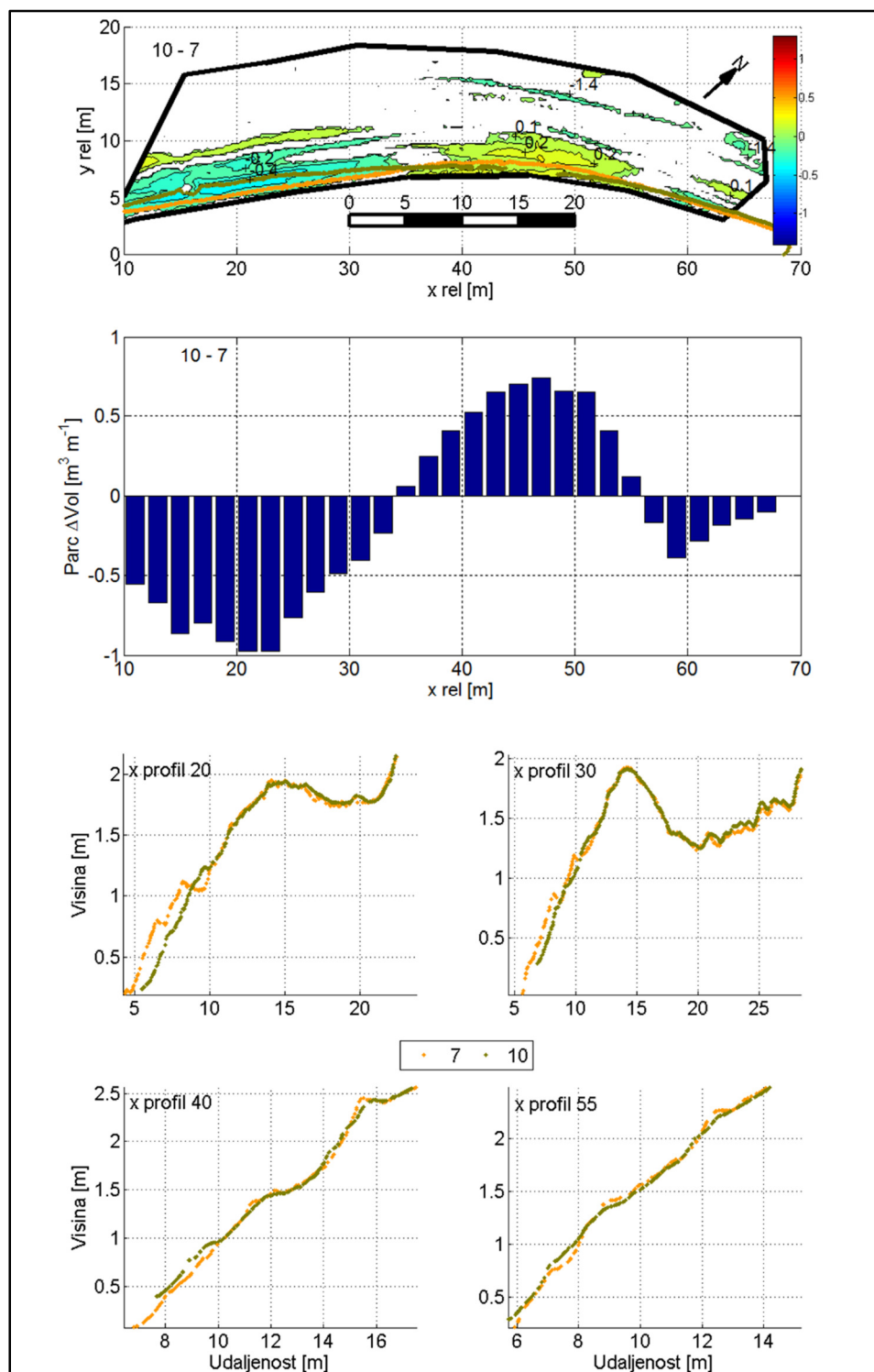
Erozija je nastala na središnjem dijelu žala (do 0,6 m), dok su sedimenti akumulirani u tri zone: na gornjem dijelu kanala (do 1,4 m), na istočnom dijelu žala (do 0,5 m) i na zapadnom dijelu žala (do 0,3 m). Rezultati prikazuju trodimenzionalni karakter nastalih promjena žala kao posljedica migracija sedimenta uzduž (*long-shore*) i okomito (*cross-shore*) na obalu žala. Sedimenti žala su akumulirani između profila 10 i 34, sa najvećim vrijednostima oko profila 27 (7,54 m³/m¹).

Oko profila 20 sedimenti su akumulirani duž čitavog profila. Oko profila 30 sedimenti su akumulirani u kanalu, gdje je došlo do formiranja nove berme visine 1,95 m n.m. (slika 7.8.). Od profila 34 do 50 nastala je erozija duž čitavog žala do visine 2,15 m n.m. Od profila 50 do 60 erodiran je samo gornji dio žala, dok je na donjem dijelu zabilježena akumulacija sedimenta. Na istočnom rubu žala (profil 60-70) sedimenti su se akumulirali duž čitavog profila.

Lepezasto akumulirani sedimenti u pličini ispred ušća kanala potpuno su odneseni prema obali do 14.2., tragovi kanala na žalu više nisu vidljivi (slika 7.3.).

7.3.3.4. BEZ ZNAČAJNIH PROMJENA

Na slici 7.9. prikazane su promjene visina, parcijalne promjene volumena i profili žala između mjerenja broj 7 (14.2.) i 10 (11.4.)

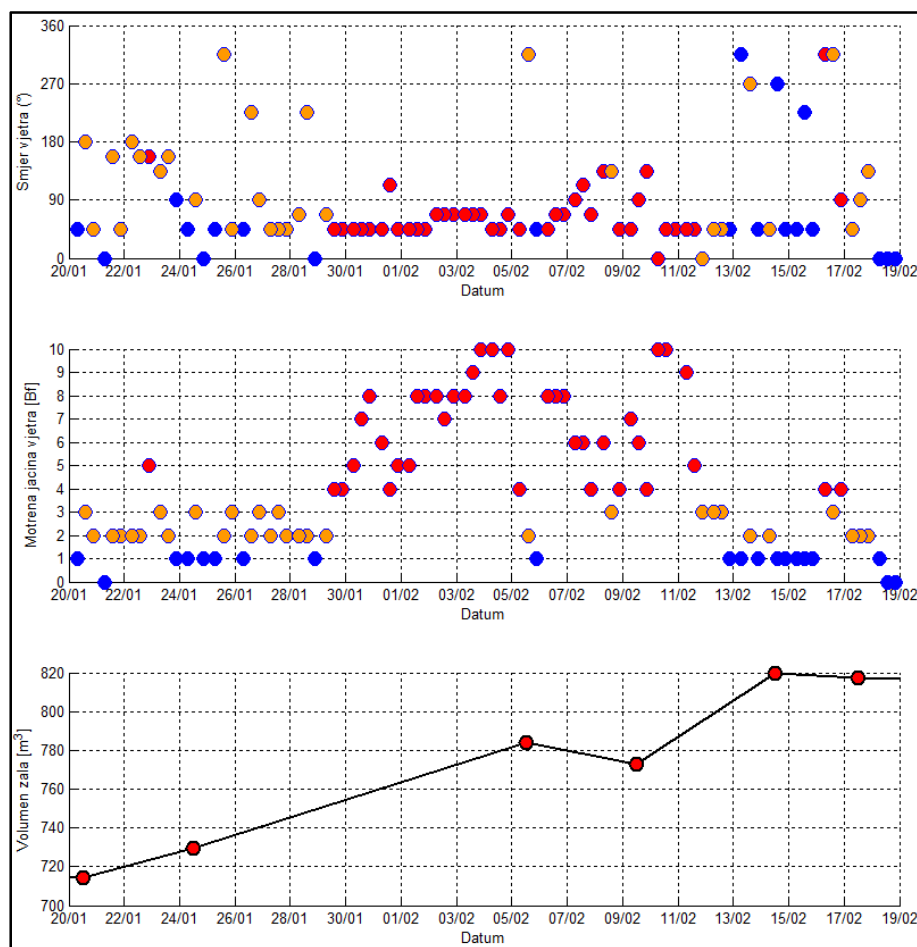


Slika 7.9. Promjene žala Uboka između mjerenja 7 (14.2.) i 10 (11.4.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala.

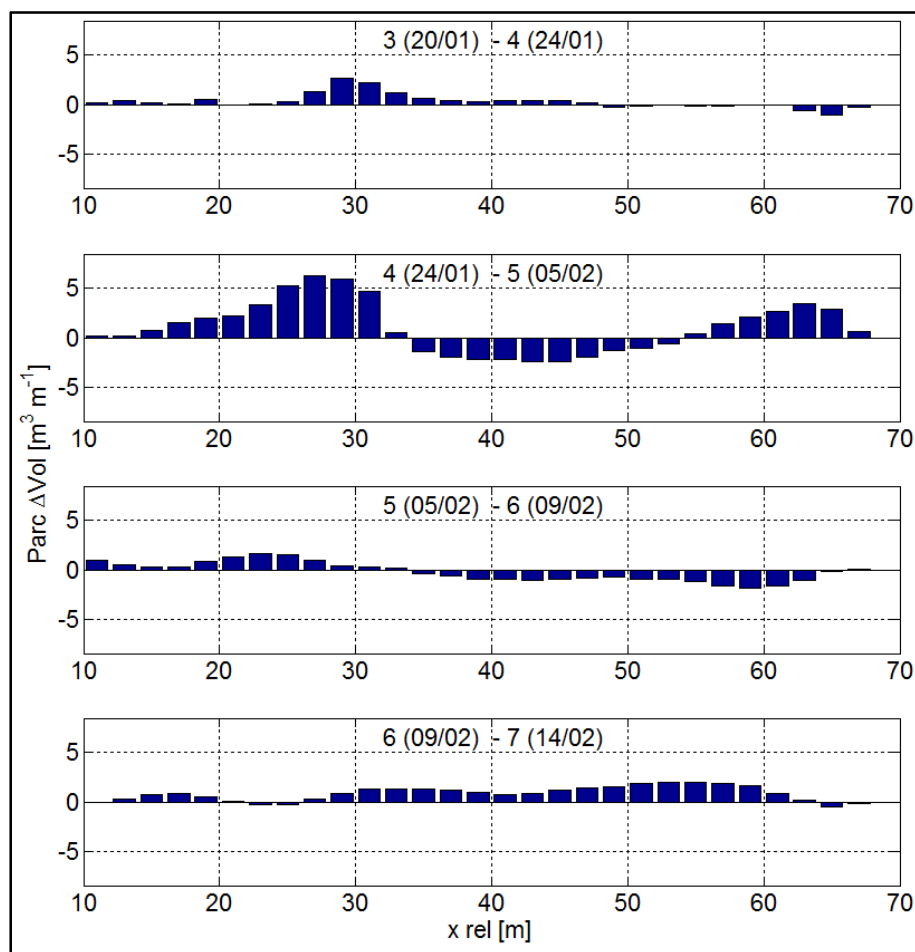
U tom razdoblju nisu zabilježene značajne promjene topografije žala. Volumen žala smanjio se za oko 9 m^3 , kao posljedica umjerene erozije donjeg zapadnog dijela žala. Parcijalne promjene volumena žala višestruko su manje u odnosu na druga analizirana razdoblja (slika 7.5.). Najveća parcijalna erozija ($0,97 \text{ m}^3/\text{m}^1$) nastala je oko profila 21, najveća akumulacija ($0,74 \text{ m}^3/\text{m}^1$) oko profila 47. Zabilježen je uzduž-obalni transport sedimenta od jugozapada prema sjeveroistoku žala.

7.3.4. Oporavak žala – detaljan opis

Najveće morfološke promjene žala zabilježe su tijekom oporavka žala, između mjerenja broj 3 (20.1.) i 7 (14.2.), zbog čega su te promjene detaljno opisane između svakog od provedenih mjerenja. Motreni smjerovi i jačine vjetra (motriteljska postaja Crikvenica, DHMZ) i integrirani volumeni žala prikazani su na slici 7.10. Motrene jačine vjetra označene su, ovisno o njihovoj motrenoj jačini crveno ($\geq 4 \text{ Bf}$), narančasto ($2 - 3 \text{ Bf}$) i plavo ($\leq 1 \text{ Bf}$).



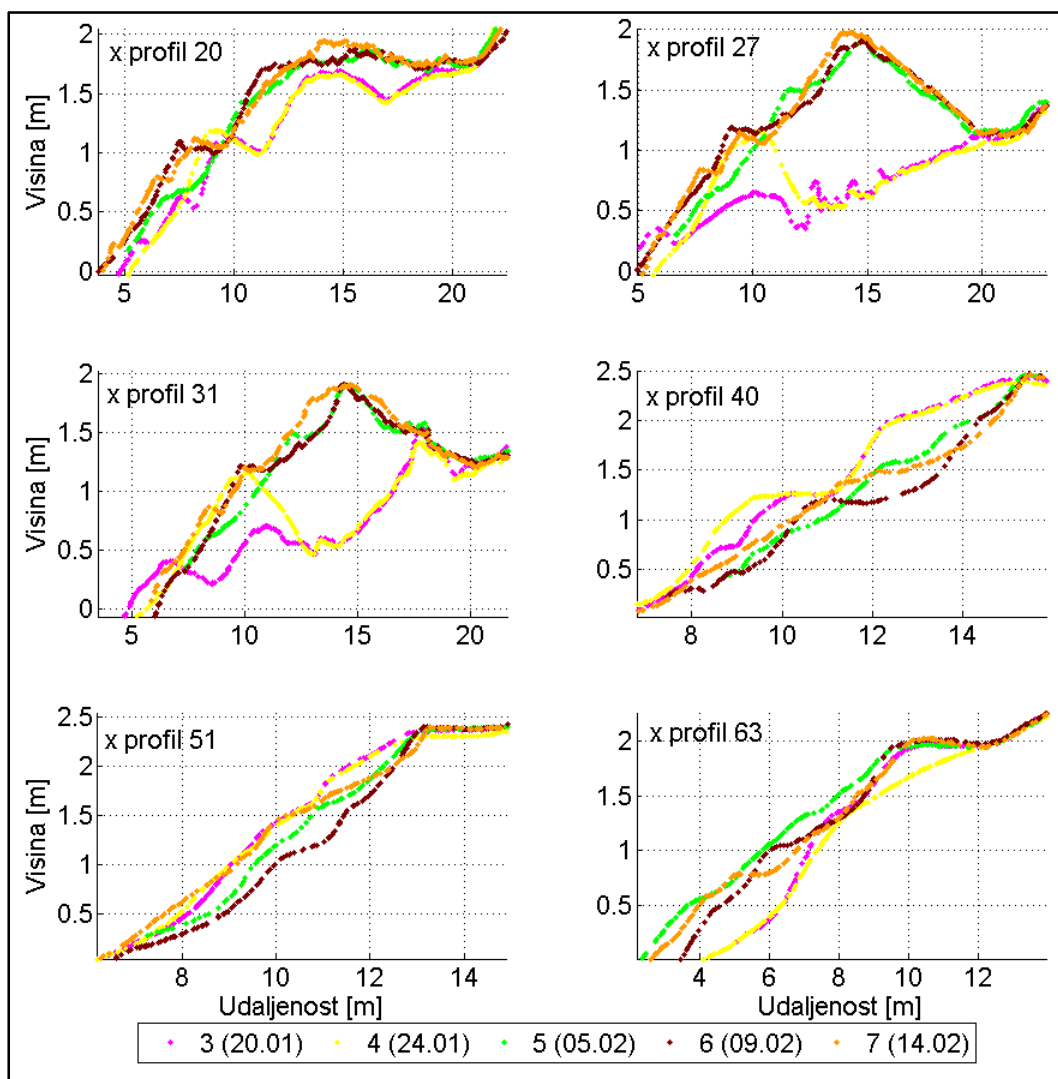
Slika 7.10. Motreni podaci o vjetru (Meteorološka postaja Crikvenica (DHMZ)): smjer vjetra (°), jačina vjetra (crveno (≥ 4 Bf), narančasto (2 – 3 Bf), plavo (1 Bf)). Integrirani volumeni žala. Između 30.1.2014. i 12.2.2014. puhalo je orkanski vjetar iz NE smjera (bura). Taj vjetar je uzrokovao značajno povećanje volumena žala s 720 na 820 m³. Na slici 7.11. prikazane su parcijalne promjene volumena žala između mjerenja br. 3 (20.1.) i 7 (14.2.).



Slika 7.11. Parcijalne promjene volumena žala između uzastopnih mjerenja žala od 20.1.2012 do 14.2.2012.

Najveće parcijalne promjene volumena žala zabilježene su između mjerenje br. 4 (24.1) i 5 (5.2.), kada je počeo puhati orkanski vjetar iz NE smjera (slika 7.10.). Između mjerenja br. 5 (5.2.) i 6 (9.2.) dominantne su duž-obale migracije sedimenta prema južnom dijelu žala.

Na slici 7.12. prikazani su karakteristični profili žala između mjerenja br. 3(20.1.) i 7(14.2.).



Slika 7.12. Karakteristični poprečni presjeci žala od mjerenja br. 3(20.1.) do 7(14.2.)

Između mjerenja br. 3 (20.1.) i 4 (24.1.) najveće promjene nastale su oko ušća kanala, gdje su zabilježene značajne parcijalne akumulacije sedimenta ($2,75 \text{ m}^3\text{m}^{-1}$) i formirana berma visine 1,25 m n.m. (slika 7.11. i 7.12.). Na ostalim dijelovima žala značajne promjene nisu zabilježene. Nema tragova uzduž-obalnog (*long-shore*) transporta sedimenta, iako je na MS Crikvenica zabilježen SE vjetar (jugo) jačine 2-4 bofora (slika 7.10.).

Između mjerenja broj 4 (24.1.) i 5 (5.2.) zabilježene su najveće promjene, volumen žala porastao je 60 m^3 , sediment je akumuliran u kanalu, te istočnom i zapadnom dijelu žala, dok je na sredini žala zabilježena značajna erozija (slika 7.11. i 7.12.). Parcijalne promjene volumena žala višestruko su veće od nastalih promjena između mjerenja br.

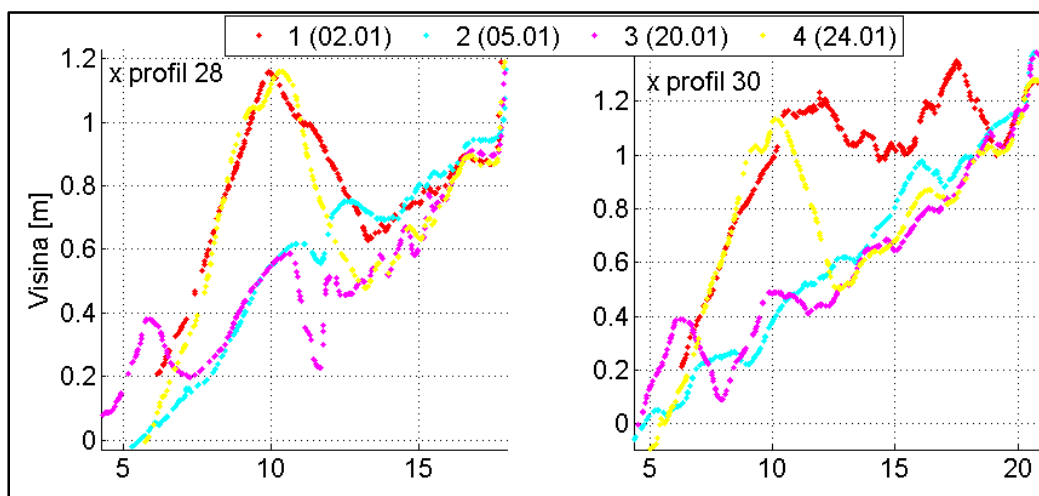
5 (5.2.) i 7 (14.2.), kada je i dalje puhao orkanski vjetar iz NE smjera. U razdoblju između mjerenja broj 4 (24.1.) i 5 (5.2.) kanal je zatvoren, formirana je berma visine 1.95 m. n.m. Prednje lice berme neznatno se promijenilo dok je visina berme ostala ista do mjerenja 7 (14.2.) (slika 7.12.).

Između mjerenja br. 5 (5.2.) i 6 (9.2.) zabilježeni su (redom) vjetrovi iz NE (bura), SE (jugo) i NE smjera (slika 7.10.). Volumen žala se smanjio (13 m^3), transport sedimenta odvijao se od sjeveroistočnog prema jugozapadnom dijelu žala, što je rezultat djelovanja vjetrova NE smjera. Iz dostupnih podataka ne može se zaključiti koji vjetar (NE ili SE) je uzrokovao eroziju žala, iako je razmak između provedenih mjerenja samo četiri dana. U tom periodu zabilježene su jačine vjetra do 8 bofora (slika 7.10.).

Između mjerenja br. 6 (9.2.) i 7 (14.2.) ponovo je zapuhao orkanski vjetar iz NE smjera (jačine do 10 bofora, slika 7.10.), volumen žala se povećao oko 50 m^3 , dominantni transport sedimenta je prema obali („cross-shore“), uzduž-obalni transport sedimenta je minoran (slika 7.11.). Profili žala neznatno su se promijenili unatoč relativno velikom povećanju volumena žala.

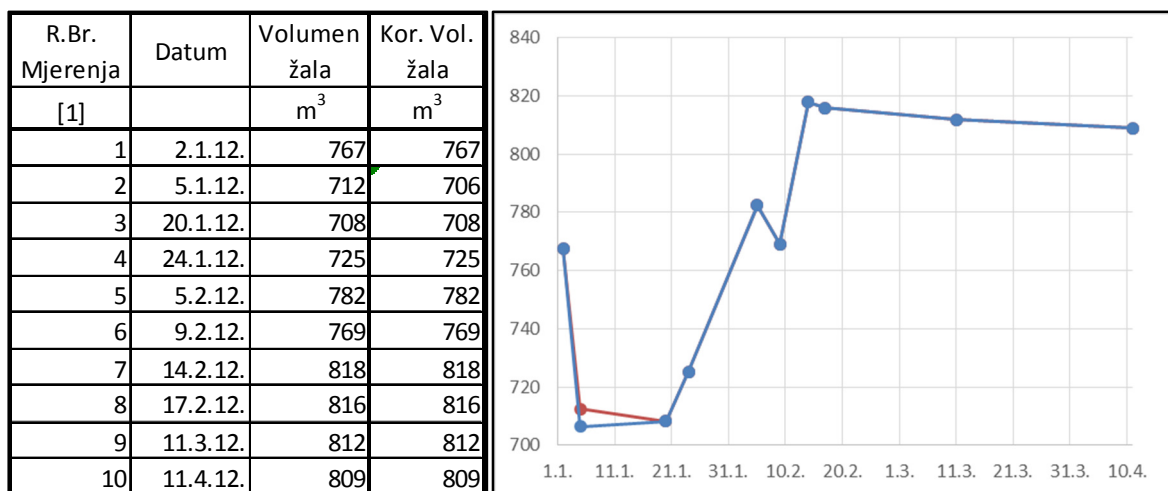
7.4. Diskusija

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 relativno nepristupačno, te povezano s prometnicom strmim pješačkim putem. Nemogućnost snimanja visina ispod razine vode je ograničenje korištene metodologije. Mjerenje broj 2 (2.1.) provedeno je tijekom otjecanja slatkih voda (slika 7.3.). SfM fotogrametrija ne može snimiti oblik kanala ispod vode za razliku od LIDAR tehnologije (Brodu i Lague, 2012). Zbog toga su uklonjeni dijelovi oblaka točaka koji sadrže vodene površine. Dubina kanala u provedenim analizama nije uzeta u obzir, već je na mjestu toka vode visina interpolirana s najnižom snimljenom točkom kanala, koja je približno jednaka razini vode u kanalu. To je generiralo određene visinske greške 3D oblaka točaka, koje koincidiraju s dubinom vode. Na slici 7.13. prikazani su profili žala u kanalu između mjerenja br. 1 (2.1.) i 4 (24.1.).



Slika 7.13. Primjer snimljenog profila žala u slučaju kada je kanal ispunjen vodom mjerenje br. 2 (5.1.) i kada je kanal suh mjerenja br. 1 (2.1), 3 (20.1) i 4 (24.1)

Razlika visina u kanalu između mjerenja br. 2(2.1.) i 3(20.1) kreće se u rasponu od 0 do 40 cm, što je visina vodenog stupca. Površina pod vodom koja se uklonila iz oblaka točaka je oko 40 m². Procijenjena razlika između stvarnog i mjerenog volumena žala mjerenja 2 (2.1.) je oko 6 m³, ako se pretpostavi prosječna visina vodenog stupca od 15 cm. Na slici 7.14. prikazan je odnos integriranih volumena žala bez i sa primjenom navedene korekcije volumena žala.



Slika 7.14. Integrirani volumena žala bez (crvena) i sa (plava) primjenom korekcije visina površina pod vodom.

Korekcija integriranih volumena žala u odnosu na apsolutne vrijednosti zabilježenih promjena nije značajna (slika 7.14.). Za buduće i preciznije analize predlaže se upotreba hibridne metode mjerenja. Površine pod vodom (dubine do 2 m) mogu se

mjeriti GPS uređajem. Postoji mogućnost mjerenja ADCP uređajem ili sonarnom za dubine veće od 0,50 m, no tada mjerenja postaju dosta zahtjevnija u vidu ljudskih i materijalnih resursa. Najveće poboljšanje mjerenja topografije minijaturnih žala primjenom GPS uređaja postiglo bi se mjerenjem tijela žala ispod površine vode i mora do dubine 1,00 m. U tom slučaju bi se značajno povećao analizirani dio žala Uboka. Ta mjerenja omogućila bi dragocjene podatke o migracijama sedimenta ispod razine vode do dubine 2 m, te o ponašanju lepezasto akumuliranih sedimenta ispred ušća kanala.

U ovom radu zabilježeno je brzo zatvaranje kanala na žalu nakon smanjenja dotoka slatkih voda. Brzina zatvaranja kanala i visina berme ovisi o djelovanju valova na žalo, između mjerenja br. 3 (20.1.) i 4 (24.1.) nisu zabilježeni jači vjetrovi, no formirana je berma visine 1,20 m n.m. (slika 7.10. i 7.12.). Između mjerenja br. 4 (24.1.) i 5 (5.2.) berma na ušću dostigla je visinu od 1,95 m n.m., koja je ostala jednake visine i oblika do kraja provedenih istraživanja (slika 7.12.), iako su nakon mjerenja br. 5 (5.2.) zabilježeni vjetrovi jačine do 10 bofora na meteorološkoj stanici Crikvenica (slika 7.10.). To se podudara rezultatima s istraživanjima Weir i dr. (2006) gdje dolazi do brzog zatvaranja lagune transportom sedimenta prema obali, visina berme je na mjestu zatvaranja lagune stalna, što oni pripisuju velikoj površini žala iza berme. Na žalu Uboka također je velika površina žala iza berme, pomaci sedimenta prema obali nisu prostorno ograničeni. U ovom radu zabilježeno je zatvaranja ušća kanala uzduž-obalnim (*long-shore*) i okomitim na obalu (*cross-shore*) transportom sedimenta (slike 7.3., 7.8. i 7.11.). Weir i dr. (2006) navode transport sedimenta prema obali (*cross-shore*) kao glavni čimbenik formiranja berme, dok Hine (1979) prirast berme pripisuje i transportu sedimenta uzduž (*long-shore*) obale. U prvoj fazi oporavka žala Uboka, između mjerenja br. 2 (5.1.) i 4 (20.1.), prirast berme je rezultat transporta sedimenta žala prema obali (*cross-shore*), uzduž-obalne (*long-shore*) migracije sedimenta su zanemarive (slika 7.11.), što se poklapa sa rezultatima istraživanja koje su proveli Weir i dr. (2006). Berma žala se u potpunosti formirala između mjerenja br. 4 (24.1.) i 5 (5.2.), kada su zabilježeni i značajni uzduž-obalni (*long-shore*) transporti sedimenta (slike 7.3., 7.11. i 7.12.), što je sukladno rezultatima Hinea (1979).

Poate i dr. (2013) naglašavaju da je nedostatak mjerenja morfoloških parametara šljunčanih žala prije i nakon olujnog događaja često ograničavajuću

čimbenik provedenih istraživanja. Iako su u ovom radu provedena česta istraživanja morfologije žala prije i poslije olujnog događaja, primijenjeni su detaljni 3D oblaci točaka žala i dalje nedostaju podaci o morfološkim promjenama žala između dva mjerenja, da bi se razjasnili svi prevladavajući obalni procesi. Zbog toga se predlaže primjena kontinuiranog praćenja morfoloških promjena žala korištenjem video tehnike (Holman i Lippmann, 1987; Holman i Stanley, 2007, Ojeda i Guillén, 2008).

Dokazano je da prodor slatkih voda na minijaturno šljunčano žalo ne uzrokuje trajnu, već samo privremenu eroziju žala. Istraženo žalo Uboka u potpunosti se oporavilo prestankom otjecanja slatkih voda i djelovanjem valova vjetra iz NE smjera. To je prirodan ciklus, koji je poremećen na nekim žalima Kvarnera, izgradnjom betonskog ušća kanala bujičnog vodotoka. Uslijed ubrzane urbanizacije obalnog prostora, na nekim žalima Kvarnera, kao što su Baška, Lopar, Mošćenička Draga povećana su otjecanja postojećih vodotoka, te izazvana otjecanja novih vodotoka. To može uzrokovati eroziju žala u slučaju kada voda otječe na dijelovima žala ograničene širine.

7.5. Zaključak i buduća istraživanja u uvali uboka

Prodor slatkih voda na Žalo Uboka ne uzrokuje trajnu već samo privremenu eroziju žala. Nakon prestanka otjecanja slatkih voda žalo se relativno brzo oporavlja, ovisno o intenzitetu i trajanju valova koji uzrokuju oporavak žala. Žalo Uboka nije prostorno ograničeno na srednjem dijelu žala, što omogućuje slobodno zatvaranje kanala nastalog koncentriranim istjecanjem slatkih voda i formiranje berme žala. Slična je situacija na većini prirodnih žala Kvarnera, nastalih akumulacijom bujičnih sedimenta, na kojima prodor bujičnih voda ne stvara trajnu eroziju žala.

Najveće morfološke promjene žala Uboka zabilježene su oko kanala nastalog koncentriranim istjecanjem slatkih voda. Migracije sedimenta tijekom otvaranja žala prodorom slatkih voda i u fazi oporavka žala, determinirane su tim kanalom. U prvoj fazi oporavka žala sedimenti se akumuliraju na nižim kotama ušća kanala, nakon čega, povećanjem djelovanja valova, dolazi do akumulacije sedimenta na dijelovima kanala udaljenijim od obale. U fazi oporavka žala, koja je karakterizirana izraženim uzduž-obalnim transportom sedimenta, kanal ograničava uzduž-obalne (*long-shore*)

migracije sedimenta, djelujući kao „ponor“ sedimenta dok ne dođe do njegovog zatrpavanja. U kanalu najprije se akumuliraju sedimenti koji prvi počnu migrirati. Ti isti sedimenti pri slijedećem prodoru slatkih voda su erodirani i lepezasto akumulirani u podmorju ispred kanala. Prodor slatkih voda uzrokuje i determinira opisane cikličke izmjene sedimenta. Tu tezu potrebno je dodatno ispitati u budućim istraživanjima. Materijal akumuliran u podmorju ispred ušća kanala lako migrira jer nije zbijen, te značajno utječe na deformacije valova. U ovom primjeru taj materijal se brzo i u potpunosti vratio na žalo.

Rezultati istraživanja morfoloških promjena mogu se poboljšati korištenjem hibridne metode snimanja SfM fotogrametrijom u kombinaciji s korištenjem diferencijalnog GPS uređaja za dijelove žala ispod razine vode do dubine 1 m. Takva hibridna metoda povećala bi udio snimljenog dijela žala.

Buduća istraživanjima u uvali Uboka potrebno je temeljiti na stalnom monitoringu žala korištenjem video sustava zbog intenzivnih i veoma složenih obalnih procesa koji nastaju u kombinaciji djelovanja valova i otjecanja slatkih voda na samom tijelu žala. U ovom radu se pokazala potreba za detaljnim istraživanjem hidroloških parametara otjecanja slatkih voda, odnosno njihov utjecaj na obalne procese. U uvali Uboka dotjecanja podzemnih voda su značajna. Razina podzemnih voda ima važan utjecaj na morfološke promjene žala u kombinaciji s djelovanjem valova. Zbog toga je potrebno u budućim istraživanjima sagledati i utjecaj podzemnih voda na hidrodinamiku i morfološke promjene žala.

8. EVOLUCIJA STJENOVITE OBALE NA LOKACIJI ŠKRILA KOD STARE BAŠKE

U ovom poglavlju prikazani su rezultati istraživanja stjenovite obale, pokraj Stare Baške na jugoistočnom dijelu otoka Krka, koju sačinjavaju klifovi i minijaturna žala. Istraženi dio obale do sada je bio pod zanemarivim antropogenim utjecajem i obalni procesi su se odvijali prirodnom dinamikom. Zabilježena su dva međusobno povezana procesa: povlačenje klifova i povećanje površine žala. Povlačenje klifova počelo ugrožavati imovinu zbog čega se razmatraju inženjerska rješenja za sprječavanje ili umanjenje tih procesa. Istraženi su uzroci promjene morfologije. Analizirana je stabilnost obalnih klifova, te utjecaj marinske erozije na eroziju obale. Erozijom klifova došlo je do značajnog povećanja površina žala.

8.1. Uvod

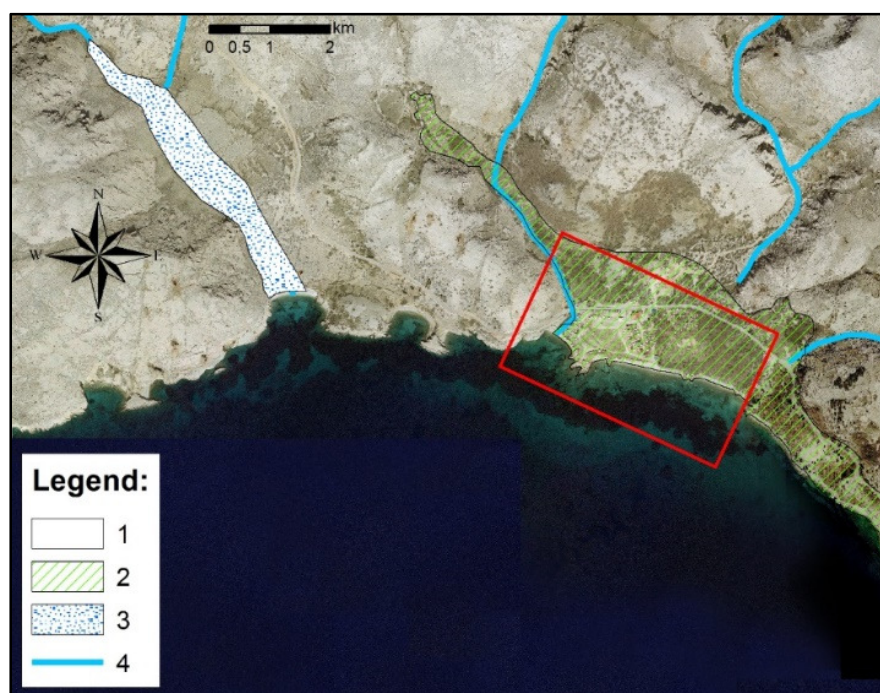
Brzina povlačenja klifova ovisi o odnosu čvrstoće klifa i sila koje djeluju na klif, i to gravitaciji i kinetičkoj energiji valova (Sunamura, 1992). Djelovanje valova i geološki parametri klifa dominantni su čimbenici procesa recesije klifova (Sunamura, 1992; Costa i dr., 2004). U zaštićenim zaljevima i ušćima padinski procesi mogu imati dominantni utjecaj na recesiju klifa u odnosu na djelovanje valova (Greenwood i Orford, 2007). Tijelo žala ispred klifa kontrolira disipaciju energije valovanja, zbog čega žalo često štiti klif i obalu od erozije (Sunamura, 1992; Komar i Shih, 1993; Amin, 2001; Sallenger i dr., 2002; Brunnsden i Lee, 2004; Walkden i Hall, 2005). Erozijska nožica klifa javlja se kada je visina uzdizanja valova viša od točke sjecišta žala i klifa (Ruggiero i dr., 2001). Površina profila žala iznad mjerodavne morske razine, do točke presjeka žala i klifa daje odnos disipacije energije valova uzduž žala (Lee, 2008). Veza između površine žala u profilu i brzine povlačenja klifa nije linearna (Malanson i dr., 1992; Phillips, 1994). Male promjene visine tijela žala mogu uzrokovati znatne promjene brzine recesije klifova (Lee, 2008). Poviđanjem morske razine doći će do povećanja djelovanja energije valova na nožicu klifa, zbog čega će doći do povećanja brzina povlačenja klifova (Clayton, 1989; Bray i Hooke, 1997). Erozijom klifova doći će do povećanja produkcije sedimenta, što će omogućiti formiranje novih ili povećanje tijela

postojećih žala, čime će biti anuliran ili umanjen utjecaj povećanja razine mora (Lee, 2008).

Uzvišenja oko naselja Stara Baška oblikovana su u karbonatnim stijenama. To su vapnenci, dolomitični vapnenci i dolomitične do vapnenačke breče iz razdoblja gornje krede i paleogena (Velić i Vlahović, 2009). Ove stijene su različitog litološkog sastava, strukture i teksture kao i različitog stupnja raspucanosti i okršenosti. Karbonatne stijene većinom su ogoljene, s vrlo oskudnom vegetacijom. Stoga taj dio terena ima karakteristični izgled krša (slika 8.1.).

Siliciklastične stijene iz paleogenskog razdoblja nalaze se u relativno uskom priobalnom pojasu, kao i u izoliranim zonama u zaleđu (slika 8.1.). Po litološkom sastavu to su pretežito lapori i siltiti s proslojcima pješčenjaka, a djelomično imaju značajke fliša. Izdanci tih stijena vidljivi su samo mjestimično uz obalni rub. Na zapadnom dijelu istraživanog područja, pokrivač na siliciklastičnim stijenama tvore dobro vezane siparne breče. Geološka starost breča nije precizno određena, ali su vjerojatno nastale tijekom kvartara. Na istočnom dijelu, osnovna fliška stijenska masa pokrivena je mješavinom prahovite gline nastale trošenjem podloge i fragmenata karbonatnih stijena transportiranih s okolnih uzvišenja.

Na krajevima danas uglavnom suhих krških dolina oko naselja nalaze se šljunkovite lepeze u uvalama, čiji se veći dio proteže ispod morske razine (Slika 8.1.).



Slika 8.1. Pregledna inženjerskogeološka karta istraživanog područja (crveni pravokutnik): 1 – karbonatne stijene; 2 – siliciklastične stijene pokrivene siparnim brečama i koherentnim padinskim naslagama; 3 – Šljunkovite bujične naplavine; 4 – Povremeni površinski tokovi.

Na istraženom dijelu obale zapadno od naselja Stara Baška, koji pripada Kampu Škrila, osnovnu stijensku masu tvore siparne breče. Breče se sastoje od uglastih odlomaka vapnenačkog podrijetla različitih dimenzija: od milimetarskih dimenzija do blokova većih od 50 cm, prevladavaju odlomci veličine 1 do 4 cm. Vezivo je pjeskovita glina crvenkaste boje čiji je udio 20 do 50 %. Glina je različito kalcificirana što bitno utječe na čvrstoću breča. Ova stijenska masa ima naglašenu stratifikaciju. Slojevi su gotovo horizontalni, ali bez izraženog kontinuiteta, što je jasno vidljivo na klifovima. Klifovi formirani u brečama imaju prosječnu visinu od 5 do 6 m. Na vrhu je raspucana zona s slojem tla debljine oko 1 m (slika 8.2.)



Slika 8.2. Recentni kolaps klifa snimljen 9.2.2014. 1 – sloj tla debljine cca 1 m; 2 – siparna breča

Veći dio marinske terase pokriven je pijeskom i šljunkom. Zrna šljunka su dobro zaobljena, veličine od 2 do 20 mm. U tijelu žala mjestimično je vidljiv jednoliki pijesak. Na žalu i mjestimice pod vodom se nalaze neraspadnuti blokovi siparnih breča (slika 8.3.).



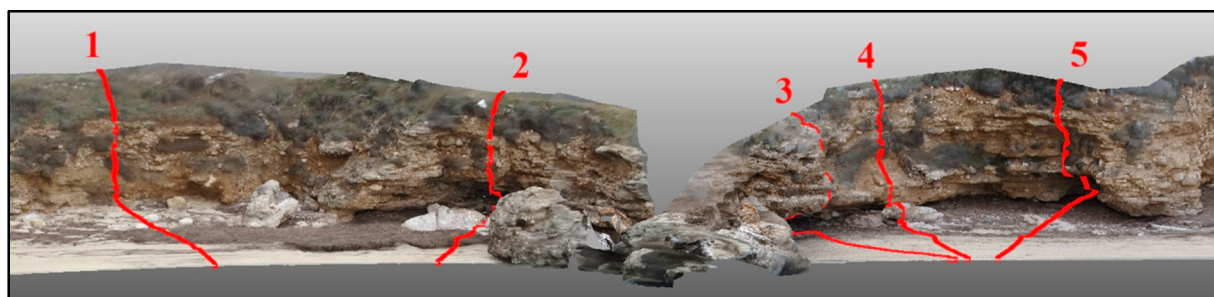
Slika 8.3. Šljunkovito-pjeskovito žalo i blokovi siparnih breča

Siparne breče imaju promijenjivi anizotropni tip vodopropusnosti. Fliška stijenska masa u podlozi je u cjelini vodonepropusna. Tijekom kišnog razdoblja kroz breče se procjeđuju vode i teku do obale. Veći izvori vode nisu ustanovljeni. Na zapadnom rubu istraženog područja nalazi se korito suhog vodotoka, gdje povremeno može teći voda. Količine protoka nisu poznate.

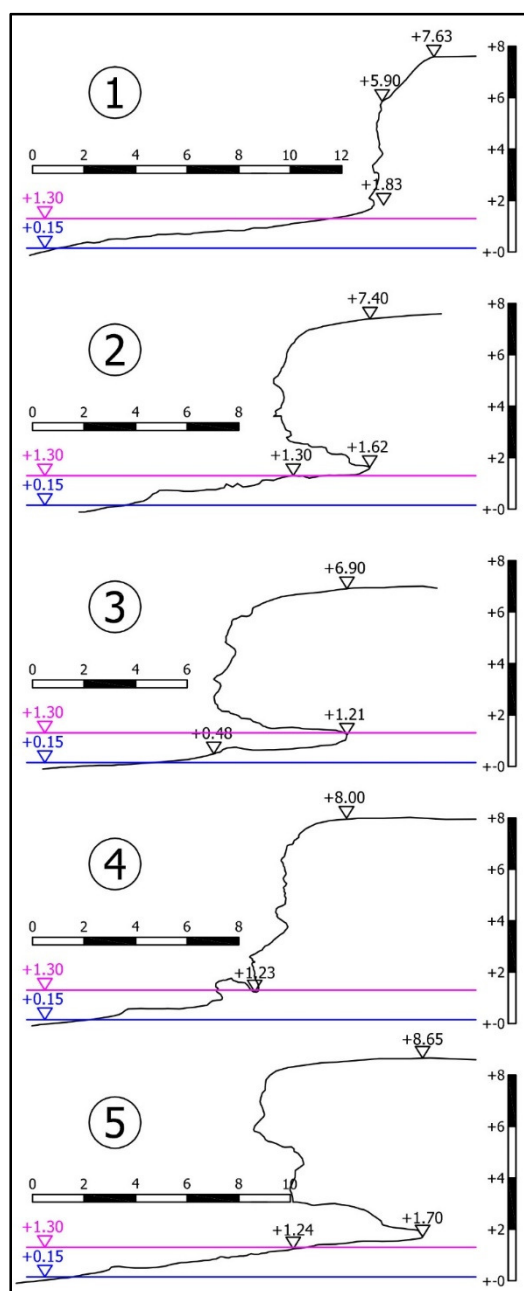
8.2. Rezultati

8.2.1. Morfološke značajke obale

Analize djelovanja marinske erozije i stabilnosti klifa zasnovane su na trodimenzionalnim oblacima točaka deriviranim iz SfM fotogrametrije. Na slici 8.4. prikazan je trodimenzionalni fotorealistični oblak točaka žala i klifa sa prikazanim detaljno analiziranim profilima (1-5). Poprečni presjeci profila prikazani su na slici 8.5.



Slika 8.4. Trodimenzionalni oblak točaka žala i klifa s prikazom detaljno analiziranih profila.

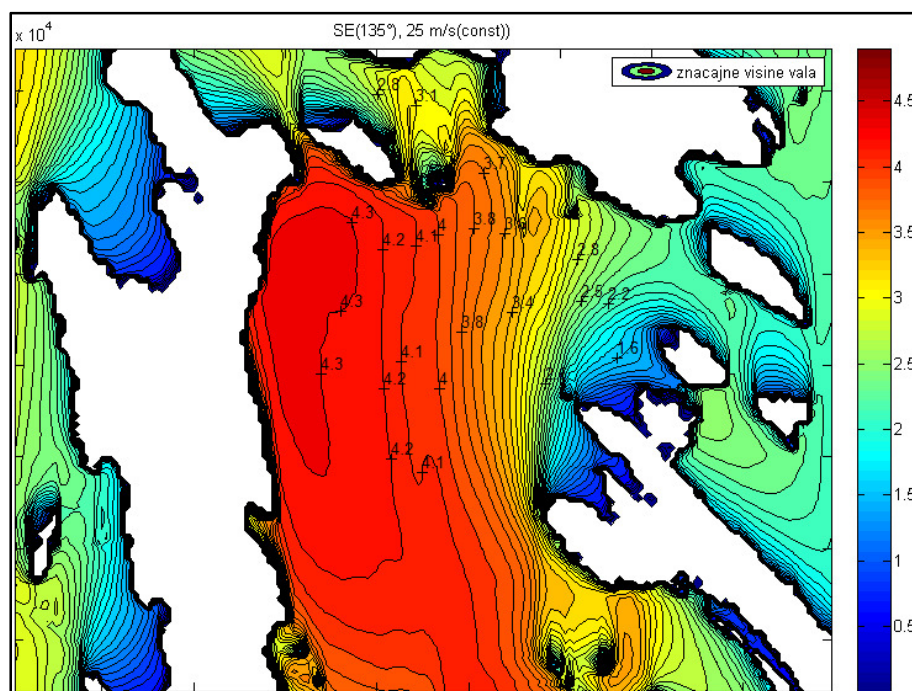


Slika 8.5. Poprečni presjeci karakterističnih profila 1-5 (slika 8.4.), plava - srednja morska razina (SMR); ljubičasta - morska razina olujnog usupra (100 gPP)

Poprečni presjeci žala derivirani pomoću SfM fotogrametrije prikazuju presjek čitavog klifa, detaljno je snimljena čak i sama potkapina klifa, što je važan preduvjet, kasnije u ovom poglavlju, provedenih analiza stabilnosti obalnog klifa. Na profilima 2, 3 i 5 potkapine klifa su dužine od 3,73 m do 6,56 m. Visine klifova su od 5,69 m do 6,92 m. Detaljna geometrija i primjena istraženih profila prikazana je u tablicama 8.1. i 8.2. Korijen srednjeg kvadratnog odstupanje (RMSE) visina verifikacijskih točaka mjerenih pomoću GPS uređaja i SfM fotogrametrije je 5 cm (Ružić i dr., 2014).

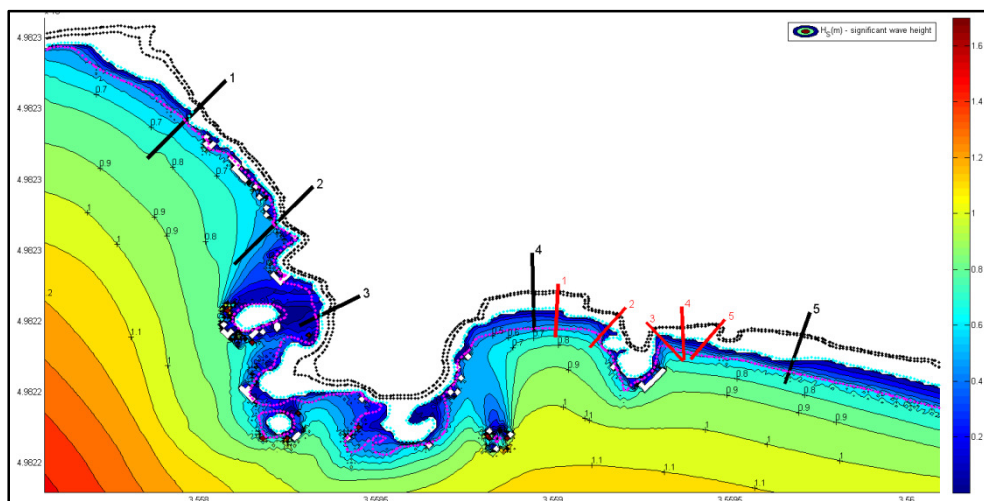
8.3.2. Marinska erozija

Na slici 8.6. prikazani su rezultati numeričke simulacije značajne visine vala sjeveroistočnog dijela Kvarnerića numeričkim modelom SWAN (Booij i dr., 1999) za vjetar SE smjera (jugo) jačine 25 m/s što odgovara 100 godišnjem povratnom periodu (DHMZ, 2003).



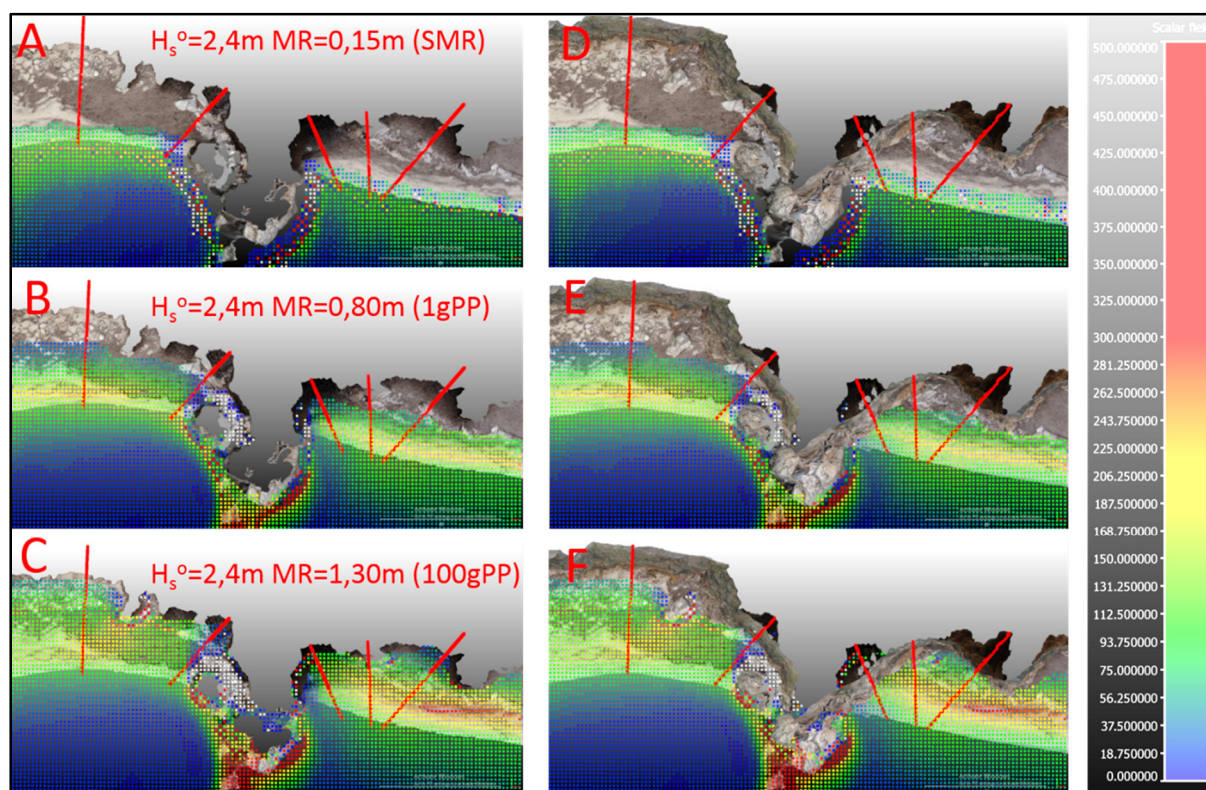
Slika 8.6. Značajna visina valova 100 god PP (H_s (m)), sjeveroistočni dio Kvarnerića (rezultati modela SWAN)

Ispred Stare Baške značajna visina vala u dubokoj vodi je oko 2,4 m. Na slici 8.6. prikazani su rezultati detaljnih numeričkih simulacija, značajnih visina valova juga, 100 godišnjeg povratnog perioda, akvatorija ispred istraživanog područja.



Slika 8.7. Značajna visina valova juga, 100 god PP (SWAN). Obalna linija (0,15 m n.m.) označena je ljubičasto, dno i vrh klifa crnom isprekidanom linijom

Uvale i žala istraženog područja izloženu su djelovanjem manjih visina valova juga u odnosu na izložene rtove. Uvala oko profila III zaštićena je hridi koja značajno umanjuje djelovanje valova na samu obalu. U uvali oko profila IV dolazi do značajnog smanjenja valova zbog njihovog oplićavanja u samoj uvali. Valovi juga značajne visine 0,80 m dolaze do klifova između profila I i II. Slika 8.8. prikazuje primjenu fotorealističnih trodimenzionalnih oblaka točaka za prikaz rezultata numeričkih simulacija valova.



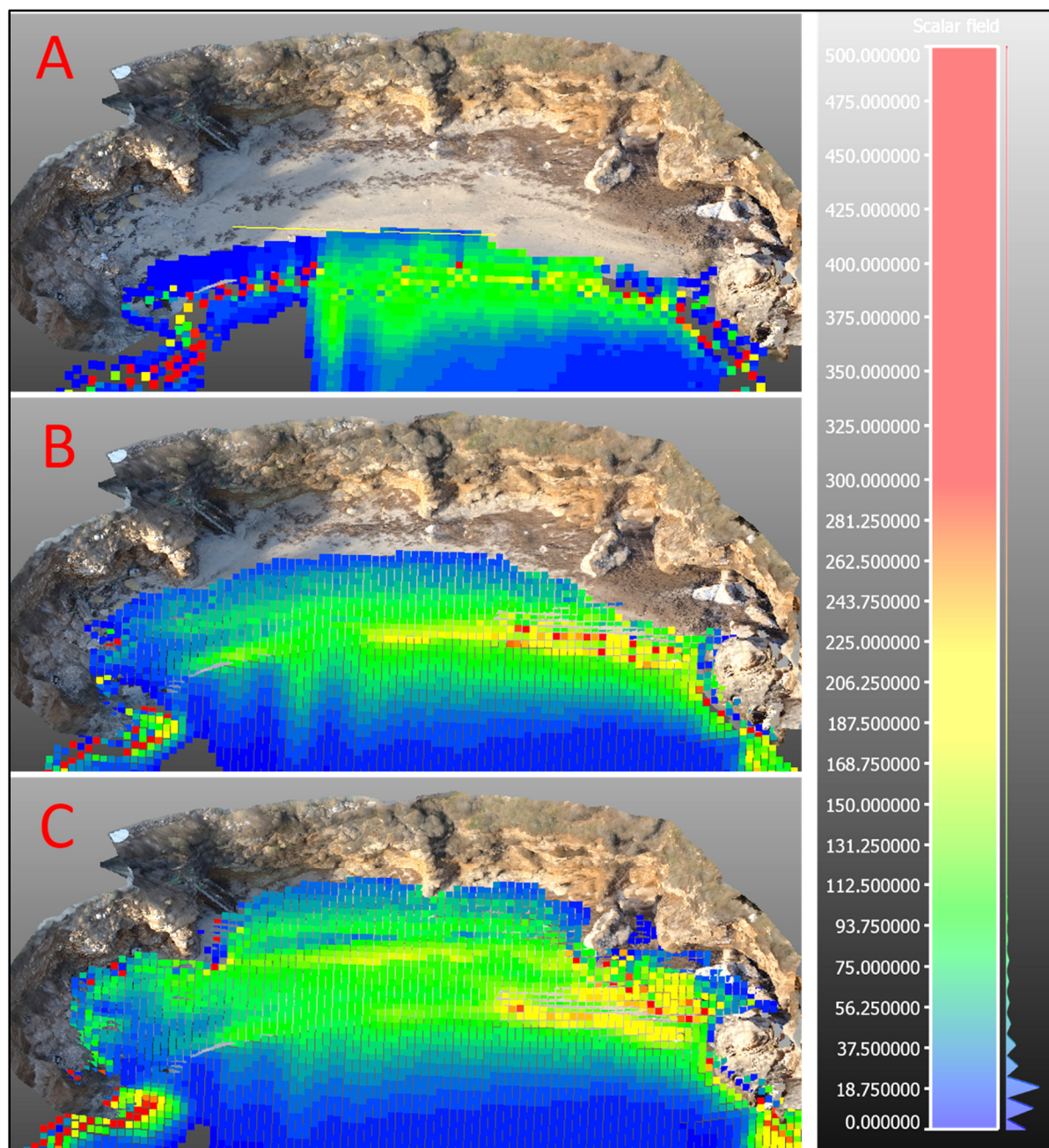
Slika 8.8. Rezultati numeričke simulacije disipacije energije valova prikazane na foto-realističnom 3D oblaku točaka. A-C - originalni oblak točaka; D-F - oblak točaka reduciran do visine 1,30 m n.m.

Na slici 8.8. prikazani su rezultati numeričkih simulacija disipacije energije valova u slučaju simuliranih razina mora 0,15 m n.m. (SMR); 0,80 m n.m.(1gPP) i 1.30 m n.m. (100gPP). Prikaz rezultata na 3D oblaku točaka omogućuje prikaz djelovanja valova unutar potkapine klifa ukoliko se prikazuju točke trodimenzionalnog oblaka točaka niže od 1.30 m n.m. Klif u profilu 1 (slika 8.4.) zaštićen je od djelovanja valova tijelom žala, čak i tijekom ekstremnih morskih razina. Klif u profilu 2 zaštićen je odronjenim blokom, unutar potkapine klifa dolazi do disipacije manjeg dijela energije valova (slika 8.8.C.). Profil 3 direktno je izložen je djelovanju valova juga, koji pri povišenim razinama mora dolaze do krajnje točke potkapine. Klifovi u profilu 4 i 5 zaštićeni su od djelovanja valova juga relativno širokim tijelom žala.

U ovo radu razvijene su procedure za prikaz rezultata numeričkih simulacija valovanja na trodimenzionalnom foto-realističnom oblaku točaka. Te procedure matricu rezultata numeričkih simulacija valovanja povezuju s visinama trodimenzionalnog oblaka točaka i transformiraju je u n-dimenzionalni oblak točaka koji sadrži prostorne koordinate točke X Y i Z, te podatke o simuliranim parametrima valova u toj točki. Dimenzija oblaka

točaka ovisi o broju parametara numeričkih simulacija koje se žele prikazati na oblaku točaka.

Na slici 8.9. je detaljni prikaz rezultata numeričkih simulacija disipacije energije valova minijaturnog žala oko profila IV.



Slika 8.9. Disipacija energije valova značajne visine $H_s^0=2,4\text{m}(100\text{gPP})$. A - srednja morska razina (0,15m), B - povišena morska razina (1gPP 0,80m); C - ekstremna morska razina (100gPP 1,30m)

Prikaz rezultata numeričkih simulacija valova na trodimenzionalnom foto-realističnom oblaku točaka ima mnoge prednosti u odnosu na klasičan načina prikaza (slike 8.7.,

8.8. i 8.9.). Takvim prikazom točno se mogu odrediti najugroženija područja obale, točno se može odrediti zona doseg valova. U slučaju djelovanja olujnih valova značajne visine dubokovodnog vala od 2,4 m, u kombinaciji s morskim razinama manjim od 1 godišnjeg povratnog perioda (0,80 m n.m.), većina energije valova se postepeno se disipira na tijelu žala, zbog čega su nožice klifova zaštićene od marinske erozije.

Iz trodimenzionalnih oblaka točaka derivirani su geometrijski parametri poprečnih presjeka detaljno obrađenih profila 1-5 koji su prikazani na slikama 8.4. i 8.5. Tablica 8.1. prikazuje geometrijske karakteristike poprečnih presjeka 1-5 i naprezanja kritičnog profila obalnog klifa koje je prikazano kasnije u poglavlju (red 12).

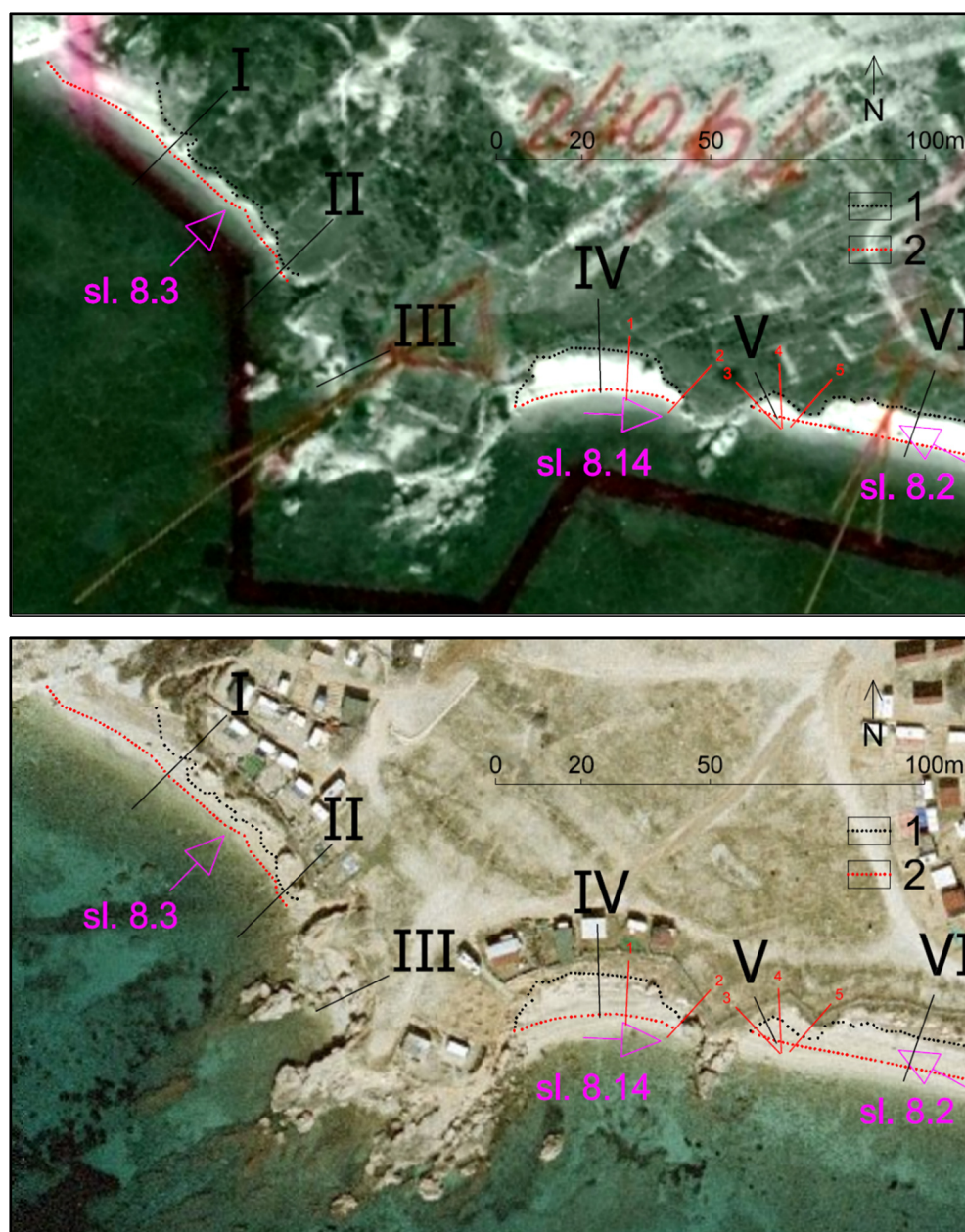
Tablica 8.1. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka 1-5

			Profil					
			1	2	3	4	5	
1	visina klifa	h_c	m	5.76	5.78	5.7	6.74	6.92
2	širina klifa	l_c	m	0.00	3.72	5.16	0	6.56
3	visina potkapine na ulazu	h_n^0	m	0.00	1.37	1.3	0	1.84
4	donja kota potkapine na ulazu	EL_n^0	m	1.80	1.3	0.48	1.23	1.24
5	kota krajnje točke potkapine	EL_n^{RP}	m	1.83	1.62	1.21	1.23	1.7
6	horizontalna udaljenost od žala sa kotom SMR do potkapine na ulazu	L_n^{MSL-0}	m	11.42	5.84	0.78	5.52	7.67
7	horizontalna udaljenost od žala sa kotom SMR do krajnje točke klifa	L_n^{MSL-RP}	m	11.42	8.81	5.94	5.52	12.69
8	vertikalna udaljenost od SMR do potkapine na ulazu	dEL_n^{MSL-0}	m	1.50	1.00	0.18	0.93	0.94
9	vertikalna udaljenost od SMR do krajnje točke klifa	dEL_n^{MSL-RP}	m	1.53	1.32	0.91	0.93	1.40
10	nagib žala do ulaza u klif	I_n^{MSL-RP}	1	0.13	0.17	0.23	0.17	0.12
11	nagib žala do krajnje točke klifa	I_n^{MSL-0}	1	0.13	0.15	0.15	0.17	0.11
12	maksimalno naprezane presjeka klifa	σ	$KN/m^2/m^1$	0.0	260.7	341.2	0.0	372.9
13	Površina žala do baze klifa	$(L_n^{MSL-0} * dEL_n^{MSL-0})/2$	m^2	8.6	2.9	0.1	2.6	3.6
14	Površina žala do baze krajnje točke klifa	$(L_n^{MSL-RP} * dEL_n^{MSL-RP})/2$	m^2	8.7	5.8	2.7	2.6	8.9

Površina poprečnog presjeka profila žala, iznad srednje morske razine do točke presjeka žala i klifa daje omjer disipacije energije valova na žalu (Lee, 2008). Najveća površina žala, do krajnje točke klifa je u profilima 1 i 5, dok je najmanja u profilima 3 i 4 (tablica 8.1., red 14). Odnos tih površina žala sugerira da su profili 3 i 4 najviše izloženi djelovanju valova, odnosno potencijalnom djelovanju marinske erozije.

Analiza povijenih avionskih snimaka prikazala je znatnu eroziju obalnih klifova istraživanog područja (Ružić i dr., 2014 a i b). Pomaci lica klifova analizirani su usporedbom georeferenciranih avionskih snimaka iz 1966 i orto-foto karata iz 2004. godine (slika 8.10.). Georeferenciranje starih avio-snimaka napravljeno je pomoću

Autodeskovog programa Raster Design. Nastale promjene znatno su veće od nominalne preciznosti georeferenciranih avio-snimaka koja je procijenjena na 0,50m (Ružić i dr., 2014 a i b).



Slika 8.10. Promjene obalne linije i linije lica klifa istraživanog područja: a) avio-snimak 1966; b) orto-foto karta (mj. 1:5000) 2004; 1 – linija lica klifa iz 1966; 2 – obalna linija iz 1966.

Na zapadnom dijelu istraživanog područja oko profila I i II, od 1966 do 2003 godine zabilježena je značajna erozija klifova (do 5 m). Na tom dijelu obale simulirane značajne visine valova juga 100 godišnjeg povratnog perioda su oko 0,60 m (slika

8.7.). Na taj dio obale s klifovima djeluju veći valovi nego na obalu oko profila III, IV i V. Pretpostavlja se da je to djelovanje valova uzrok značajnom povlačenju klifova. Promjene obalne linije nisu izražene, površina žala se većinom proširila povlačenjem klifova (slika 8.10.).

U uvali na srednjem dijelu istraživanog područja oko profila III došlo je do povlačenja klifova na zapadnom dijelu, obala linija pomakla se prema moru na jugoistočnom dijelu uvale, površina žala se znatno povećala.

Na zapadnom dijelu istraživanog područja oko profila V i VI zabilježeno je povlačenja klifova i značajno napredovanje obalne linije, odnosno proširenja žala (slika 8.10.).

8.2.3. Analiza stabilnosti obalnog klifa

Analiza stabilnosti obalnih klifova s izraženim potkapinama zasnovana je na statičkom modelu konzolne grede (Thorne i Tovey, 1981; Abam, 1997, Matsukura, 1988, 2001; Kogure i dr., 2006; Kogure i Matsukura, 2010; Castedo i dr., 2012). Model (Timoshenko i Gere, 1972) se temelji na pretpostavkama da se materijal klifa iznad potkapine ponaša kao konzolna greda, vlačna i tlačna naprezanja linearno su raspoređena po kritičnom profilu. Opterećenja se mogu odrediti na osnovi specifične težine stijenske mase i geometrije klifa. Model je do sada korišten za analizu stabilnosti obalnih klifova formiranih u vapnencima koji imaju približno pravilnu pravokutnu geometriju (Kogure, 2006; Kogure i Matsukura, 2010). U tom slučaju površina potencijalnog odrona klifa određena je kao umnožak prosječne visine klifa i dubine potkapine. U ovom radu model je prilagođen analizama stabilnosti obalnih klifova složene geometrije. Nepravilni poprečni presjek klifova formiranih u stijenama poput breča ne može se analizirati primjenom jednostavne geometrije poprečnog presjeka. Neki autori (Williams i dr., 1993; Kogure i Matsukura, 2010; Castedo i dr., 2012) navode nužnost poznavanja precizne 3D geometrije klifova za točnu analizu stabilnosti klifova.

Analiza stabilnosti obalnih klifova provedena je na osnovi modela konzolne grede (Kogure i dr., 2006). Kogure i dr. (2006) proces kolapsa klifa opisuju kroz tri faze: (1) formacija potkapine i pojava naprezanja u materijalu klifa iznad potkapine (konzolna greda), (2) vlačna naprezanja na gornjoj strani klifa dovode do stvaranja vlačne pukotine, (3) vertikalno širenje pukotine izaziva prevrtanje klifa.

Najveća naprezanja (σ_{max}) unutar kritičnog presjeka klifa su omjer (M/Z) momenta savijanja (M) i modul presjeka (Z), što je prikazano u jednadžbi 1.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{Z} \quad (1)$$

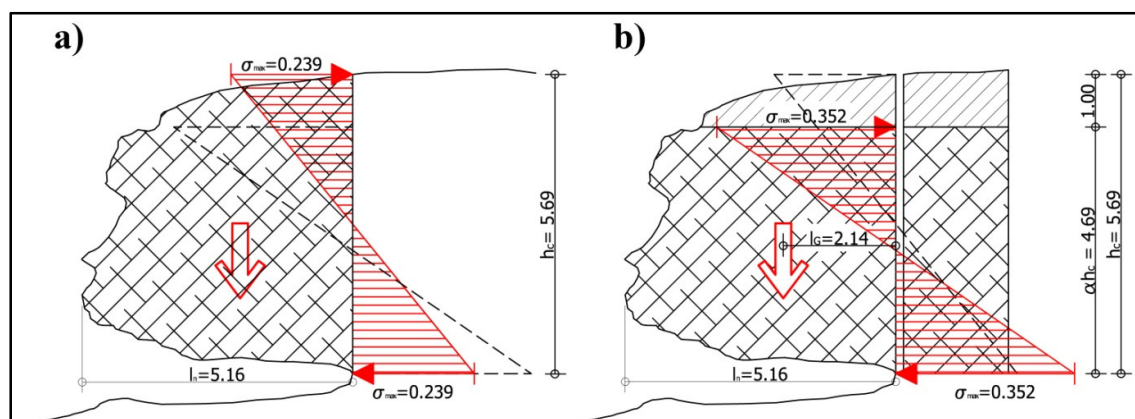
$$M = \frac{1}{2} \rho g b h_c l_n^2 \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{6} b h_c^2 \quad (3)$$

Jednadžbe 2 i 3 prikazuju proračun momenta i modula presjeka, za sekciju klifa širine b , visine h_c , i dubine potkapine l_n . Visina klifa h_c definirana je kao vertikalna udaljenosti između krajnje točke potkapine i gornje površine klifa. Dubina potkapine l_n definirana je kao vertikalna udaljenost između najudaljenije točke klifa i srednjice lica klifa. U slučaju pojave vlačne pukotine nosiva površina klifa se reducira.

Suha gustoća breče je $24,5 \text{ kN/m}^3$, težina saturiranog materijala je $25,3 \text{ kN/m}^3$. Jednosna tlačna čvrstoća (USC) je od $29,21$ do $70,21 \text{ MPa}$ za suhe breče, dok je USC saturiranog materijala od $19,82$ do $62,10 \text{ MPa}$. Analize stabilnosti provedene su za slučaj vodom zasićenog materijala breča. Poprečni presjeci derivirani iz SfM fotogrametrije (slika 8.5.) upotrijebljeni su za proračun parametara stabilnosti klifa. Rezultati naprezanja u profilima 2, 3 i 5 su prikazani u tablici 8.2 (red 11) i slici 8.13. koja prikazuje raspodjelu naprezanja profila 3.

U proračun je uvedena redukcija nosive visine kritičnog poprečnog presjeka klifa (slika 8.13.b.) zbog utjecaja sloja tla na vrhu klifa, zanemarive vlačne čvrstoće.



Slika 8.11. Geometrijski parametri i raspodjela naprezanja unutar klifa – profil 3. a – bez vlačne pukotine, b – s slojem zemlje na vrhu klifa

U tablici 8.2. prikazani su rezultati naprezanja kritičnog presjeka klifa, u slučaju bez (slika 8.11.A.) i sa (slika 8.11.B.) utjecajem sloja zemlje (vlačne pukotine) na statički sustava stabilnosti klifa. Proračun se zasniva na stvarnoj geometriji klifa prikazanoj na slici 8.5, a ne na pretpostavljenoj pravokutnoj geometriji (jednadžba 1).

Smanjenje nosivog presjeka klifa zbog stupca zemlje značajno povećava naprezanja u kritičnom presjeku. Visina sloja zemlje određena je iz 3D foto-realističnog oblaka točaka na kome se vidi lice klifa (slika 8.4.).

Tablica 8.2. Proračun stabilnosti obalnih klifova

			Profil			
			2	3	5	
Gustoća	γ	KN/m^3	25.30	25.30	25.30	
Površina	A	m^2	16.20	23.04	33.09	
Notch depth	l_n	m	3.73	5.16	6.56	
Udaljenost tež	l_G	m	1.56	2.21	2.71	
Težina klifa	G	KN/m^1	409.9	582.9	837.1	
Moment	M	KNm/m^1	640.7	1290.6	2269.2	
Visina klifa	h_c	m	5.78	5.69	6.92	
Bez pukotine	Dubina vlačne pukotine	αh_c	m	0.00	0.00	0.00
	Visina nosivog presjeka	$h_c - \alpha h_c$	m	5.78	5.69	6.92
	Centar masa profila	Z	m^3	5.57	5.39	7.98
	Vlačna naprezanja	σ	$\text{KN/m}^2/\text{m}^1$	115.1	239.3	284.3
S pukotinom	Dubina vlačne pukotine	αh_c	m	1.00	1.00	1.00
	Visina nosivog presjeka	$h_c - \alpha h_c$	m	4.78	4.69	5.92
	Centar masa profila	Z	m^3	3.81	3.66	5.84
	Vlačna naprezanja	σ	$\text{KN/m}^2/\text{m}^1$	168.2	352.4	388.5

Tablica 8.2. prikazuje znatna povećanja naprezanja u slučaju kad se stabilnost klifa računa na osniva modificiranog proračuna koji uzima u obzir nepovoljan utjecaj sloja tla na vrhu klifa. Takvim proračunom opterećenje kritičnog presjeka klifa u detaljnom profilu 3 povećalo se s 239 na 352 $\text{kNm}^{-2}\text{m}^{-1}$, odnosno za oko 50%.

8.3. Diskusija

Prikaz rezultata numeričkih simulacija valova na trodimenzionalnom foto-realističnom oblaku točaka ima mnoge prednosti u odnosu na klasičan načina prikaza (slika 8.9. i 8.7.). Foto-realističan prikaz jasno pokazuje do kojeg dijela žala djeluju valovi, kolike su visine valova na pojedinom dijelu istraživanje obale, te gdje su simulirane najveće disipacije energije valova. Zbog toga se jednostavnije mogu detektirati potencijalno ugrožena područja obale, rezultati istraživanja postaju razumljivi širem krugu ljudi. Upotreba trodimenzionalnih oblaka točaka omogućuje provođenje i prikazivanje rezultata numeričkih simulacija valovanja i na zaklonjenim dijelovima obale kao što su površine ispod klifa.

Disipacija energije valova ispred klifa ovisi o površini žala ispred klifa (Lee, 2008), to je prikazano i na slikama 8.11 i 8.12., koje prikazuju djelovanje valova na obalu oko profila IV. Detaljni profil 1 zaštićen je od djelovanja valova uvalom i tijekom žala, čak i prilikom ekstremnih djelovanja valova u kombinaciji s ekstremno visokim razinama mora. To potvrđuje i usporedba obalne linije između 1966 i 2004 kada nije zabilježen pomak linije klifova oko detaljnog profila 1, dok je taj pomak u ostalim prikazanim detaljnim profilima značajan. Može se smatrati da je obala ispred kampa Škrile dostigla svoj geomorfološki ekvilibrijum (Trenhaile, 1989), kada je erozija obale u uvalama, sporija od erozije na obale rtovima, iako se na rtovima nalaze stijene veće čvrstoće. Dokaz navedenoj tezi je odron podlokano klifa, na rtu, između detaljnih profila 3 i 4, do kojeg je došlo između 9.1.2014 i 3.2.2014. godine (slika 8.12.).

Do odrona klifa na rtu došlo je kao rezultat kombinacije više nepovoljnih čimbenika. Vlačna naprezanja klifa u detaljnom profilu 3, koji se nalazi neposredno uz odronjeni dio klifa, su veća od 300 kNm^{-2} (tablica 8.2). Površina žala ispred detaljnog profila 3 je ograničena (tablica 8.1.), te ne štiti klif od djelovanja valova, koji dolaze do krajnje točke klifa.



Slika 8.12. Odron podlokanog klifa na rtu, između detaljnih profila 3 i 4

Pretpostavlja se da valovi u potkapini klifa, s zarobljenim zrakom, izazivaju hidraulički udar koji izrazito nepovoljno djeluje na stabilnost samog klifa. Klifovi na rtu su konkavnog oblika, što njihov statički sustav čini trodimenzionalnim problemom, zbog čega su na samom rtu opterećenja kritičnih profila klifova veća od procijenjenih pomoću modela stabilnosti klifa na osnovi modela konzole, koja je dvodimenzionalni problem.

8.4. Zaključak i buduća istraživanja obale kod stare baške

U ovom radu primijenjeni su trodimenzionalni oblaci točaka derivirani iz niza fotografija pomoću SfM fotogrametrije za analizu geometrijskih parametara (stabilnosti) obalnog klifa, topografije žala i prikaza rezultata numeričkih simulacija valovanja. Model analize stabilnosti obalnih klifova prilagođen je klifovima složenog oblika poprečnog presjeka primjenom trodimenzionalnih oblaka točaka, čime je došlo do značajnog povećanja preciznosti modela i mogućnosti slobodnog odabira poprečnog presjeka za analizu stabilnosti. Klasičnim pristupom, kritičan profil klifa morao je biti određen tijekom

snimanja, primjenom SfM fotogrametrije, snimljen je oblak točaka čitavog klifa čime je omogućen naknadni slobodan odabir kritičnog profila klifa. Vlačna opterećenja analiziranih klifova su kritična za siparne breče u kojima su istraživani klifovi formirani. No osim naprezanja kritičnog profila, stabilnost klifa određena je djelovanjem valova na nožicu klifa koji izazivaju njezino potkopavanje, močenje, a u nepovoljnim uvjetima mogu izazvati i dinamički udar.

Istraženo je funkcioniranje prirodne obale sastavljene od žala i klifa, koja je naizgled nestabilna. Kratkoročno, u prvi plan dolazi odronjavanje klifova i značajno nazadovanje platoa iznad žala. Analizom podataka starih 40 godina, pokazalo se da je istovremeno došlo do povlačenja klifova ali i značajnog proširenja površine žala. Obalna linija se čak i pomakla prema moru u tih 40 godina. Provedene analize su pokazale da je istražena obala na području Stare Baške dostigla svoj geomorfološki ekvilibrijum (Trenhaile, 1989) na osnovi analiza stabilnosti klifova, utjecaja žala, te zabilježenih kratkotrajnih i dugotrajnih promjena.

Uloga žala u zaštiti obale je izrazito važna. Na ovom istraženom primjeru dolazi do povlačenja klifova i širenja žala, koja umanjuju nepovoljno djelovanje valova na obalu, odnosno marinsku eroziju. Materijal iz degradiranih klifova dohranjuje žalo, čime dolazi do umanjenja erozije klifova ispred žala. Postavlja se pitanje koja bi bila reakcija ovog obalnog sustava na inženjerske zahvate koji bi zaustavili eroziju klifova. Zaustavljanjem erozije klifova, vjerojatno bi došlo do prestanka prirodne dohrane žala i smanjenja volumena tijela žala, što može intenzivirati obalne procese u podnožju klifova.

Važan naglasak u budućim istraživanjima treba dati na mjerenje valova u podmorju ispred obale, ali i na samoj obali i licu žala. To će omogućiti detaljnu analizu djelovanja valova na obalu, te će pobliže razjasniti utjecaj žala na zaštitu obale. Naglasak istraživanja treba dati na uzdizanje valova po žalu, i doseg njihovog utjecaja. Za takve analize nepohodni su točni mjereni parametri vala.

Obala od istraženog područja Škrile do samog mjesta stara baška izložena je intenzivnim obalnim procesima. U samom mjestu zabilježena su i manja klizanja tla, koja su povezana s slabo istraženim obalnim procesima. Zbog toga je potrebno istraživanja obale na čitavo područje.

9. ZAKLJUČAK

Primjena metode *Structure-from-Motion* fotogrametrije omogućila je detaljno istraživanje geodinamičke ravnoteže minijatura žala na tri lokacije u području Kvarnera.

Prethodno je izvršeno preliminarno istraživanja više desetaka lokacija na obalama Liburnije, otoka Cresa i Krka. Nakon odabira najpovoljnijih i dovoljno različitih mikrolokacija, detalja „*in situ*“ mjerenja obavljena su u uvali Uboka južno od Mošćeničke Drage, žalu Klančac kod Brseča i na lokaciji Škrila zapadno od Stare Baške, na jugoistočnoj obali otoka Krka.

Tijekom istraživanja korišteno je više način mjerenja promjene morfologije minijturnih šljunčanih žala te se došlo do zaključka da primjena *Structure-from-Motion* fotogrametrije ima niz prednosti u odnosu na ostale metode. Istražene lokacije vrlo su pogodne za primjenu ove metode mjerenja zbog granulometrijskog sastava tijela žala, reljefa okolne obale, te povoljnih pozicija za snimanje fotografija. Kvaliteta trodimenzionalnih oblaka točaka snimljenih žala zadovoljila je sve potrebe provedenih istraživanja, a horizontalna i vertikalna točnost modela je ± 5 cm. Prednosti korištenja *Structure-from-Motion* fotogrametrije pokazala se prilikom uzastopnih mjerenja jednog žala, kod kojeg su definirane stalne kontrolne točke za georeferenciranje trodimenzionalnih oblaka točaka. Snimanja žala Klančac i Uboka traju manje od 20 minuta nakon što su prethodno postavljene fiksne kontrolne točka. To je bitno za interpretaciju dinamičkih promjena u njihovim tijelima. Osnovno ograničenje primijenjene metodologije je nemogućnost mjerenja ispod razine vode zbog čega se u budućim istraživanjima predlaže nadopuna mjerenja s upotrebom RTK-GPS uređaja.

Numeričke simulacije valova istraživanih područja provedene su na dubinama dna deriviranim iz snimaka podmorja i izmjerenih oblaka točaka. Primjena oblaka točaka u omogućila je precizne simulacije djelovanja valova na žalo, kao i prikaz rezultata tih simulacija na foto-realističnim oblacima točaka, koji imaju značajne prednosti u odnosu na standardni način prikaza.

Mjerenjima pomoću metode *Structure-from-Motion* fotogrametrije ustanovljeno je da se žali na sve tri odabrane lokacije nalaze se u osjetljivoj geodinamičkoj ravnoteži.

Uzrok tomu je geološka građa i izravna izloženost obale destruktivnom djelovanju morskih valova i struja, te mjestimično i povremenom površinskom i podzemnom istjecanju.

Na lokaciji žala Klančac istražen je utjecaj djelovanja vjetrovnih valova na žalo omeđeno strmim liticama izgrađenim od relativno rezistentne vapnenačke stijenske mase. Valovi izazivaju značajne morfološke promjene tog minijaturnog žala. Zabilježene su varijacije volumena tijela žala od 137 m³ do 225 m³, kroz 9 provedenih mjerenja u razdoblju od 4.10.2013. do 27.12.2013. Erozijska žala nastala je djelovanjem olujnih valova iz SE (juga) i NE (bure) smjera, oporavak žala generiran je umjerenim valovima iz južnog kvadranta. Zabilježena erozijska žala zbilja se brzo, tijekom jednog olujnog događaja, dok se oporavak žala odvijao znatno sporije. Pokazala se visoka korelacijska veza između promjena volumena žala i visine značajnog dubokovodnog vala, neovisno o smjeru valova. Erozijska je nastala za dubokovodne valove značajne visine veće od 1,40m. Zabilježene su promjene smjera obalne linije žala Klančac u rasponu od čak 30°, dok je najveća zabilježena pojedinačna rotacija žala bila 20°. Najveće zabilježene erozije tijela žala koincidiraju sa najvećim rotacijama obalne linije žala, odnosno najvećim dužobalnim migracijama sedimenta. Važan utjecaj na dinamiku žala Klančac imaju litice u njegovom zaleđu, jer se na njihovim kosinama zbiva lom visokih valova, a na taj način povećanja intenzitet povratnih struja.

Na lokaciji žala Uboka južno od Mošćeničke Drage istražen je utjecaj prodora slatkih voda na morfološke promjene tijela žala, prethodno nastalog akumulacijom bujičnog sedimenta, pretežito veličine šljunka. Istjecanjem slatkih voda dolazi do formiranja privremenog kanala toka voda i koncentrirane erozije tijela žala. Zabilježene su oscilacije volumena žala od 712 m³ do 820 m³ tijekom 11 provedenih mjerenja u razdoblju od 2.1.2012. do 12.4.2012. Erodirani sedimenti tijela žala lepezasto su akumulirani u podmorju ispred ušća kanala. Djelovanjem vjetrovnih valova dolazi do potpunog opravka žala odnosno povratka sedimenta na žalo. Potpuno zatrpavanje kanala nastalo je nakon djelovanja olujnog vjetrova iz NE smjera transportom sedimenta duž-obale i okomito na obalnu liniju, kada se oblikuje nova berma.

Na žalu Uboka došlo je do povećanja volumena njegovog tijela i tijekom djelovanja najvećih valova zbog relativno velike širine tijela žala koja omogućuje nesmetane migracije sedimenta prema obali. Nasuprot tomu, žalo Klančac, koje je manjih

dimenzija, značajno je erodirano tijekom djelovanja najvećih valova zbog ograničene širine žala i negativnog utjecaja litica u zaleđu.

Posebnost žala Škrila sjeveroistočno od naselja Stara Baška izražena je erozija klifa. Usporedbom fotografija i karata različitih generacija, ustanovljeno je pomicanje kosine klifa za 4 do 5 m tijekom četrdeset godišnjeg razdoblja. Dokazana je međuzavisnost između nazadovanja klifa i povećanja tijela žala. Osnovi uzrok nestabilnosti kosina na klifovima je utjecaj destruktivnog djelovanja valova, a sekundarno, procesi trošenja breča. Dok se erozija na kosinama klifa zbiva neprekidno, odroni velikih blokova zbivaju se epizodno, nakon stvaranja pukotina u stijenskoj masi.

U ovom doktorskom radu obrađene su tri lokacije na kojima je antropogeni utjecaj zanemariv. Međutim, pregledom svih žala na području Kvarnera ustanovljeno je da se intenzivnom i često neplanskom izgradnjom na obalama, često drastično mijenjaju lokalne hidrodinamičke prilike, posljedica čega je smanjenje, pa čak i potpuno odnašanje tijela žala.

Prognozirani ubrzani rast razine Jadranskog mora vjerojatno će dodatno ugroziti geodinamičku stabilnost prirodnih žala i povećati eroziju obale posebice na mjestima gdje tijela žala imaju ulogu prirodne zaštite. Povećanjem razina mora na nekim žalima doći će do erozije kakva je zabilježena na žalu Klančac, dok će oporavak žala ovisiti reljefu podmorja i djelovanju valova, zbog čega bi na nekim žalima moglo doći do trajnog gubitka sedimenta. Posljedice tih procesa već su bile uočene nakon rekordno visokih plima izmjerenih posljednjih godina. Stoga rezultati istraživanja prikazani u ovom doktorskom radu, kao i njihov nastavak, mogu pomoći u znanstvenoj procjeni očekivano povećanog geološkog hazarda i doprinesti hidrotehničkom i geotehničkom inženjerstvu u umanjivanju očekivanih posljedica.

LITERATURA

Alfirević, S., 1964. Sedimentološki pokrov kanalskog područja Jadrana i faktori koji uplivaju na njegovo formiranje. *Acta Adriatica*, 11: 9-17.

Alfirević, S., 1965. Geologija Jadrana. Matica hrvatska, str. 247, Split.

Aarninkhof, S.G., Turner, I.L., Dronkers, T.D., Caljouw, M., Nipius, L., 2003. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering*, 49: 275–289.

Amin, S.M.N., 2001. Bluff response in glacial till: South Shore of Lake Erie. *The Great Lakes Geographer*, 8: 78–86.

Anthony, E.J., Dolique, F., 2004. The influence of Amazon-derived mud banks on the morphology of sandy, headland-bound beaches in Cayenne, French Guiana: a short- to long-term perspective. *Marine Geology*, 208: 249–264.

Arbanas, Ž., Benac, Č., Rubinić, J., 2004. The geotechnical properties of the sediment body in the estuary of the Raša River, Croatia. In: Coastal Environment V incorporating Oil Spill Studies, 90: 209–218, WIT press, Southampton-Boston.

Austin, M.J., Masselink, G., 2005. Infiltration and exfiltration in the swash zone of a steep gravel beach. Implications for morphological change. *Coastal Dynamics 2005*, Barcelona.

Austin, M.J., Masselink, G., 2006. Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach. *Marine Geology*, 229: 59–77.

Baffisfore, A. 1957. A do-it-yourself terrain model. *Photogrammetric Engineering*, 23: 712–720.

Bagnold, R.A., 1940. Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank. *Journal of Institution of Civil Engineers*, 15: 27–52.

Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 225: 49–63.

Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S., Horvath, K. 2009. Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosfere ALADIN. *Hrvatski meteorološki časopis*, 42: 66-77.

Baldock, T.E., Holmes, P., 1999. Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach. *Coastal Engineering*, 36: 219–242.

Baldock, T.E., Holmes, P., Horn, D.P., 1997. Low frequency swash motion induced by wave grouping. *Coastal Engineering*, 32: 866–874.

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 1217–1227.

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: 131–148.

Bascom, W.H., 1953. Characteristics of natural beaches. *Proc. of the 4th Coastal Engineering Conference*. ASCE: 163–180.

Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Casas, B., Lynett, P., Liu, P.L.F., Duarte, C.M., Tintoré, J., 2004. Seasonal dynamics of a microtidal pocket beach with *Posidonia oceanica* seabeds (Mallorca, Spain). *Journal of Coastal Research*, 20: 1155–1164.

Benac, Č., Arbanas, Ž., 1990. Sedimentacija u području ušća Rječine. *Pomorski zbornik*, 28: 593–609, Rijeka.

Benac, Č., Juračić, M., 1998. Geomorphological indicators of the sea level changes during Upper Pleistocene, Wuerm) and Holocene in the Kvarner region. *Acta Geographica Croatica*, 33: 27–45.

Benac, Č., Šegota, T., 1990. Potopljena ris-virmska abrazijska terasa u podmorju ispred Rijeke. - *Geološki vjesnik*, 43: 43–52, Zagreb.

Benac, Č., 1989. Morfogeneza vrlo strmih i okomitih obala na području Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 27: 485–495, Rijeka.

Benac, Č., 1992. Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva. *Geografski glasnik*, 54: 1–18, Zagreb.

Benac, Č., 1996. Rast morske razine i promjene na obalama Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 34: 345–359.

Benac, Č., 1996a. Morfološka evolucija Riječkog zaljeva: utjecaj klimatskih i glacioeustatičkih promjena. *Acta Geographica Croatica*, 31: 69–84.

Benac, Č., 2000. Prostorni plan Primorsko-goranske županije: inženjerskogeološke podloge. *Zbornik radova 2. Hrvatskog geografskog kongresa*, Lovran, rujan 1999. Hrvatsko geografsko društvo, Zagreb. 347–353.

Benac, Č., Arbanas, Ž., Jardas, B., 1992. Morphogenesis and Evolution of the River Mouths in the Kvarner Area. *Proceedings of International Symposium Geomorphology and Sea*, Mali Lošinj 1992. Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb. 37–45.

Benac, Č., Arbanas, Ž., Pavlovec, E., 1991. Postanak i geotehničke osobitosti doline i zaljeva Raše. *Pomorski zbornik*, 29: 475–492.

Benac, Č., Dugonjić-Jovančević, S., Ružić, I., Vivoda, M., Peranić, J., 2014. Marine erosion and slope movements: SE coast of the Krk Island. *2st World Landslide Forum*, Beijing.

Benac, Č., Đomlija, P., Vivoda, M., Buljan, R., Navratil, D., 2013. The instability phenomena along the coasts of the Kvarner area, NE Adriatic Sea. *1st ICL-ABN Regional Symposium on Landslides*.

Benac, Č., Jardas, B., Arbanas, Ž., Ilić, S., 1998. Zaštita žala na području Kvarnera. *14. Biennial International Congress*, 2: 647–656.

Benac, Č., Juračić, M., Bakran-Petricioli, T., 2004. Submerged tidal notches in the Rijeka Bay NE Adriatic Sea: Indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements. *Marine Geology*, 212: 21–33.

Benac, Č., Juračić, M., Blašković, I., 2008. Tidal notches in Vinodol Channel and Bakar Bay, NE Adriatic Sea: Indicators of recent tectonics. *Marine Geology*, 248 (3–4): 151–160.

Benac, Č., Rubinić, J., Ožanić, N., 2003. The Origine and Evolution of coastal and submarine springs in Bakar Bay. *Acta Carsologica*, 32/1: 157–171.

Benac, Č., Rubinić, J., Ružić, I., Celija, I., 2007. Geomorfološka evolucija riječnih ušća na istarskom poluotoku. *Zbornik radova 4. Hrvatske konferencije o vodama*, Gereš, D., (Ur.), Opatija, svibanj 2007. Hrvatske vode, Zagreb. 273–280.

Benac, Č., Ružić, I., Dugonjić, S., Jardas, B., Jagodnik, V., 2009. Podizanje morske razine i stabilnost obala u području Kvarnera. *Publikacija sa sažecima 5. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva: izvori rizika u geotehničkim zahvatima*, Osijek, svibanj, 2009. Hrvatsko geotehničko društvo i Građevinski fakultet Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku.

Benac, Č., Ružić, I., Ilić, S., 2010. Morfodinamika minijturnih žala, Kvarner, sjeveroistočni Jadran. *Knjiga sažetaka 4. Hrvatskog geološkog kongresa*, Horvat, M., (Ur.), 384-385. Šibenik listopad 2010., Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Benac, Č., Ružić, I., Ljutić, K., Ferenac-Grubišić, A., 2012. Ranjivost obala otoka Raba. *Rapski zbornik II: 235-243*.

Benac, Č., Ružić, I., Žic, E., 2007. Ranjivost obala u području Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 44: 201-214.

Benac, Č., Ružić, I., Žic, E., Gržančić, Ž., Kraljić, R., 2010. Ranjivost prirodnih žala u području Kvarnera. Prirodoslovna istraživanja riječkog područja II. *Prirodoslovna biblioteka*, 15: 97-107.

Besl, P., McKay, N., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 239-256.

Betts, H.D., DeRose, R.C., 1999. Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1: 91–101.

Bird, E.C.F., 2000. *Coastal Geomorphology: An Introduction*. Wiley, Chichester, 322 pp.

Bird S, Hogan D, Schwab J. 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 952-970.

Blašković, I., 1999. Tectonics of part of the Vinodol Valley within the model of the continental crust subduction. *Geolgia Croatica*, 52: 153–189.

Blewett, J.C., Holmes, P., Horn, D.P., 2000. Swash hydrodynamics on sand and shingle beaches. *Proc. 27th Int. Conf. Coast. Eng., ASCE*, New York. 597–609.

Bluck, B., 1967. Sedimentation of beach gravels: examples from South Wales. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 128–156.

Boike, J., Yoshikawa, K., 2003. Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography. *Permafrost and Periglacial Processes*, 14: 81–85.

Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany. 466–470.

Bowen, A.J., Inman, D.L., 1966. Budget of Littoral Sand in the Vicinity of Point Arguello, California. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum No. 19, 56 pp.

Bowman, D., Guillen, J., Lopez, L., Pellegrino, V., 2009. Planview geometry and morphological characteristics of pocket beaches on the Catalan coast (Spain). *Geomorphology*, 108: 191–199.

Brasington, J., Smart, R.M.A., 2003. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 231–247.

Bray, M.J., Hooke, J.M., 1997. Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 13: 453–467.

Brodu, N., Lague, D., 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 121–134.

Brunel, C. i, Sabatier, F., 2009. Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean coast. *Geomorphology*, 107: 47–57.

Brunsdon, D., Lee, E.M., 2004. Behaviour of coastal landslide systems: an inter- disciplinary view. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 134: 1–112.

Bruun, P., 1968. Tidal inlets and littoral drift. University Book Company, Oslo, Norway.

Burcharth, H. F., 1993. The Design of Breakwaters, Coastal and Harbour Engineering Reference Book CRC Press.

Buscombe, D., Masselink, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79: 33–52.

Caldwell, N.E., Williams, A.T., 1985. The use of beach profile configuration in discrimination between differing depositional environments affecting coarse clastic beaches. *Journal of Coastal Research*, 1: 129–139.

Caldwell, N.E., Williams, A.T., 1986. Spatial and seasonal pebble beach profile characteristics. *Geological Journal*, 21: 127–138.

Carr, A.P., 1971. Experiments on longshore transport and sorting of pebbles: Chesil Beach, England. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 1084–1104.

Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1984. Coarse clastic barrier beaches: a discussion of the distinctive dynamic and morphosedimentary characteristics. *Marine Geology*, 60: 377–389

Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1991. The sedimentary organisation and behaviour of drift-aligned gravel barriers. *Coastal Sediments '91, ASCE*, 934–948.

Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1993. The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers: a short term and long term perspective. *Journal of Coastal Research*, 15: 158–179.

Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., & Paredes, C., 2012. A new process – response coastal recession model of soft rock cliffs. *Geomorphology*, 178: 128–143.

Chandler, J., P. Ashmore, C. Paola, M. Gooch, and F. Varkaris, 2002, Monitoring river-channel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry. *Annals of the Association of American Geographers*, 92: 631-644.

Cipriani, L.E., Pranzini, E., Rosas, V., Wetzels, L., 2011. Landuse changes and erosion of pocket beaches in Elba Island (Tuscany, Italy). *Journal of Coastal Research*, 64: 1774–1778.

Clayton, K.M., 1989. Implications of climatic change. *Coastal Management*. Thomas Telford, London, 165–176.

Clifton, H.E., 1969. Beach lamination: nature and origin. *Marine Geology*, 7: 553–559.

Coates, T.T., Hawkes, P.J., 1998. Beach recharge design and bi-modal wave spectra. *Proc. 26th The International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 3036–3045.

Costa, S., Delahaye, D., Freire-Diaz, S., Di Nocera, L., Davidson, R., Plessis, E., 2004. Quantification of the Normandy and Picardy chalk cliff retreat by photogrammetric analysis. *Engineering Geology Special Publications*, 20: 139–148.

Crmarčić, R., Juračić M, Benac, Č., Ružić, I., 2007. Sedimentacija na ušću Dubračine i Novljanske Ričine, Vinodolski kanal. *Zbornik radova 4. Hrvatske konferencije o vodama*, Gereš, D., (Ur.), Opatija, svibanj 2007. Hrvatske vode, Zagreb. 297-302.

Curtiss, G. M., Osborne, P. D., Horner-Devine, A. R., 2009. Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents. *Marine Geology*, 259: 73–85.

Dail, H. J., Merrifield, M. a, & Bevis, M., 2000. Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing. *Marine Geology*, 162: 443–458.

Dandois, J. P., Ellis, E. C., 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136: 259–276.

Dean, R.G., 1983. Principles of beach nourishment. *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton, 217–232.

Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 2004. Coastal processes with engineering applications. Cambridge University Press, 476 p.

Dehouck, A., Dupuis, H., Sénéchal, N., 2009. Pocket beach dynamics: the example of four macrotidal beaches, Brittany, France. *Marine Geology*, 266: 1–17.

Del Grosso, G., Pranzini, E., 2003. Pocket Beach Erosion: Golfo di Procchio (Isola d'Elba). *Medcoast*. 1559–1570.

DGU, 2015. Cropos Dostupno na: (http://www.cropos.hr/index.php?option=com_content&view=article&id=13:vpps&catid=6:vpps&Itemid=3). (10.11.2014).

DHMZ, 2003. Klimatski atlas Hrvatske. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.

Dornbusch, U., Moses, C., Robinson, D. a., Williams, R., 2008. Soft copy photogrammetry to measure shore platform erosion on decadal timescales. *Journal of Coastal Conservation*, 11: 193–200.

Dornbusch, U., Williams, R.B.G., Moeses, C. and Robinson, D.A., 2002. Life expectancy of shingle beaches: measuring in situ abrasion. *Journal of Coastal Research*, 36: 249–55.

Duncan, J.R., 1964. The effects of water table and tidal cycle on swash–backwash sediment distribution and beach profile development. *Marine Geology*, 2: 186–197.

Eisenbeiss, H., K. Lambers, M. Sauerbier, and L. Zhang, 2005. Photogrammetric documentation of an archaeological site, Palpa, Peru using an autonomous model helicopter. *Remote Sensing Spatial Info*, 34: 238–246.

Everts, C.H., Eldon, C.D., Moore, J., 2002. Performance of cobble berms in Southern California. *Shore and Beach*, 70: 5–14.

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.

Felton, E., 2002. Sedimentology of rocky shorelines: 1. A review of the problem, with analytical methods, and insights gained from the Hulopoe Gravel and the modern rocky shoreline of Lanai, Hawaii. *Sedimentary Geology*, 152: 221–245.

Finkelstein, K., 1982. Morphological variations and sediment transport in crenulate-bay beaches, Kodiak Island, Alaska. *Marine Geology*, 47: 261–281.

Forbes, D.L., Orford, J.D., Carter, R.W.G., Shaw, J., Jennings, S.C., 1995. Morphodynamic evolution, self-organisation and instability of coarse clastic barriers on paraglacial coasts. *Marine Geology*, 126: 63–85.

Forbes, D.L., Taylor, R.B., Orford, J.D., Carter, R.W.G., Shaw, J., 1997. Gravel-barrier migration and overstepping. *Marine Geology*, 97: 305–313.

Förstner, W., 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26: 150–166.

Fraser, C.S., Cronk, S., 2009. A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64: 328–333.

Gessesse, G. D., H. Fuchs, R. Mansberger, A. Klik, and D. Rieke-Zapp, 2010, Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close rang digital photogrammetry, *The Photogrammetric Record*, 25: 299-318.

Grabau, A.W., 1913. Principles of Stratigraphy. A.G. Seiler & Co., New York.

Greenwood, R.O., Orford, J.D., 2007. Factors controlling the retreat of drumlin coastal cliffs in a low energy marine environment—Strangford Lough, Northern Ireland. *Journal of Coastal Research*, 23: 285–297.

Grosse, P., B. Van Wyk de Vries, P. A. Euillades, M. Kervyn, and I. A. Petrinovic, 2012, Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology*, 136: 114-131.

Guenther, G. C., Brooks, M. W., Larocque, P. E., 1998. New Capabilities of the “ SHOALS ” Airborne Lidar Bathymeter. *Remote Sensing of Environment*, 73: 247–255.

Hancock, G.R., Willgoose, G.R., 2001. The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 475–490.

Harley, M. D., Turner, I. L., Short, a. D., Ranasinghe, R., 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research*, 116: F04033.

Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester. 147–151.

Harris, L., Nel, R., Schoeman, D., 2011. Mapping beach morphodynamics remotely: A novel application tested on South African sandy shores. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92: 78–89.

Hart, B.S., Plint, A.G., 1989. Gravelly shoreface deposits: a comparison of modern and ancient facies sequences. *Sediment*, 36: 43–52.

Hart, D. E., 2009. Morphodynamics of Non-Estuarine Rivermouth Lagoons on High-Energy Coasts, *Journal of Coastal Research*, 56: 1355–1359.

Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle, UAV Imagery. *Remote Sensing*, 4: 1573–1599.

Hemmingsen, M.A. 2001: The abrasion of 'greywacke' on a mixed sand and gravel coast. *Journal of Coastal Research*, 34: 278–87.

Heng, B.C.P., Chandler, J.H., Armstrong, A., 2010. Applying close-range digital photogrammetry and soil erosion studies. *The Photogrammetric Record*, 25: 240–265.

Hine, A.C., 1979. Mechanics of berm development and resulting beach growth along a barrier spit complex. *Sedimentology*, 26: 333–351.

Holman, R.A., Lippmann, T.C., 1987. Remote sensing of nearshore bar systems: making morphology visible. *Coastal Sediments '87*, New Orleans.

Holman, R.A., Stanley, J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54: 477–491.

Holmes, P., Horn, D., Blewett, J., Blanco, B., Peel-Yates, T., Shanehsaz-zadeh, A., 2002. Hydraulic gradients and bed level changes in the swash zone on sand and gravel beaches. 28th ICCE.

Hooke, J.M., 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79: 311–335.

Horn, D.P., 2002. Beach groundwater dynamics. *Geomorphology*, 48: 121–146.

Horn, D.P., Li, L., Holmes, P., 2003. Measurement and modelling of gravel beach groundwater response to wave run-up. *Coastal Sediments '03*, ASCE.

Horvat, B., Rubinić, J. 2008: Annual runoff estimate - an example of karstic aquifers in the transboundary region of Croatia and Slovenia. *Hydrological Sciences Journal*, 51: 314-324.

Horvath, K.; Bajić, A.; Ivatek-Šahdan, S., 2011: Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows. *Journal of applied meteorology and climatology*, 50: 1676-1691.

House, D., Crescent, S., 2000. Beach topography mapping – a comparison of techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 6: 113-124.

Hsu, J.R.C., Silvester, R., Xia, Y.M., 1989a. Static equilibrium bays: new relationships. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115: 285–298.

Hsu, J.R.C., Silvester, R., Xia, Y.M., 1989b. Generalities on static equilibrium bays. *Coastal Engineering*, 12: 353–369.

Inman, D.L., Ewing, G.C., Corliss, J.B., 1966. Coastal sand dunes of Guerro Negro, Baja California, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 77: 787–802.

Inman, D.L., Jenkins, S.A., 1999. Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology*, 107: 251–270.

Isla, F.I., 1993. Overpassing and armouring phenomena on gravel beaches. *Marine Geology*, 110: 369–376.

Ivamy, M. C., Kench, P. S., 2006. Hydrodynamics and morphological adjustment of a mixed sand and gravel beach, Torere, Bay of Plenty, New Zealand. *Marine Geology*, 228: 137–152.

Ivatek-Šahdan S. Tudor, M., 2004. Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies. *Meteorologische Zeitschrift*, 13: 99–108.

Jackson, N.L., Nordstrom, K.F., Saini, S., Smith, D.R., 2010. Effects of nourishment on the form and function of an estuarine beach. *Ecological Engineering*, 36: 1709–1718.

Jackson, N.L., Nordstrom, K.F., 1993. Depth of activation of sediment by plunging breakers on a steep sand beach. *Marine Geology*, 115: 143–151.

James, M. R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, 117: F03017.

James, M.R., Ilić, S., Ružić, I. (2013). Measuring 3D coastal change with a digital camera. Coastal Dynamics 2013. 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, 893-904.

Jardas, B., Ilić, S., Benac, Č., Arbanas, Ž., 1998. Beach Protection and Beach Recharge Design in Rijeka Bay, Croatia. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, 2: 271-281.

Jennings, R., Shulmeister, J., 2002. Afield based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186:211–228.

Jennings, S., Orford, J.D., Canti, M., Devoy, R.J.N., Straker, V., 1998. The role of relative sea level rise and changing sediment supply on Holocene gravel barrier development: the example of Porlock, Somerset, UK. *Holocene*, 8: 165-181.

Juračić, M., Benac, Č., 2006. Relationship between submerged tidal notches and recent tectonic movements in the Vinodol Channel, NE Adriatic Sea. *Proceedings of International Geological Congress ADRIA 2006*, Urbino, 38-39.

Juračić, M., Benac, Č., Crmarić, R., 1999. Seabeded and surface sediments map of the Kvarner Bay, Adriatic Sea, Croatia. *Geologica Croatica*, 52: 131-140.

Juračić, M., Benac, Č., Pikelj, K., Ilić, S., 2009. Comparison of the vulnerability of lime- stone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). *Geomorphology*, 107: 90–99.

King, C.A.M., 1972. Beaches and Coasts. Edward Arnold, London.

Klein, A.H.F., Ferreira, Ó., Dias, J.M.A., Tessler, M.G., Silveira, L.F., Benedet, L., de Menezes, J.T., de Abreu, J.G.N., 2010. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: A review. *Coastal Engineering*, 57: 98–111.

Klein, A.H.F., Filho, L.B., Schumacher, D.H., 2002. Short-term beach rotation processes in distinct headland bay beach systems. *Journal of Coastal Research*, 18: 442–458.

Klein, A.H.F., Menezes, J.T., 2001. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *Journal of Coastal Research*, 17: 812–835.

Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T., Matsukura, Y., 2006. Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. *Geomorphology*, 80: 236–244.

Kogure, T., Matsukura, Y., 2010. Critical notch depths for failure of coastal limestone cliffs: case study at Kuro-shima Island, Okinawa, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 1044–1056.

Komar, P., 1998, Beach processes and sedimentation, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Komar, P., Shih, S.-M., 1993. Cliff erosion along the Oregon coast: a tectonic-sea level imprint plus local controls by beach processes. *Journal of Coastal Research*, 9: 747–765.

Kraus, N.C., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T., Horikawa, K., 1982. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Proceedings of the 18th Coastal Engineering Conference*, ASCE. 969–988.

Lane, S.N., 2000. The measurement of river channel morphology using digital photo-grammetry. *The Photogrammetric Record*, 16: 937–961.

Lee E.M., 2008. Coastal cliff behaviour: observations on relationship between beach levels and recession rates. *Geomorphology*, 101: 558–571.

Lee, K.H., Mizutani, N., Hur, D.S., Kamiya, A., 2007. The effect of groundwater on topographic changes in a gravel beach. *Ocean Engineering*, 34: 605–615.

Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1705–1725.

Lewis, W.V., 1931. The effect of wave incidence on the configuration of a shingle beach. *Geographical Journal*, 78: 129–143.

Lorang, M.S., Namikas, S.L., McDermott, J.P., Sherman, D.J., 1999. El Nino storms and the morphodynamic response of two cobble beaches. *Coastal Sediments '99*. ASCE, 922–937.

Magdalenić, A., Jurak, V., Benac, Č., 1992. Inženjerskogeološka problematika izgradnje luke u jugoistočnom dijelu Bakarskog zaljeva. *Pomorski zbornik*, 30: 633-654.

Malanson, G.P., Butler, D.R., Georgakakos, K.P., 1992. Nonequilibrium geomorphic processes and deterministic chaos. *Geomorphology*, 5: 311–322.

Mannori, S., Pranzini, E., 2004. From agriculture to tourism: a cause of beach erosion. In: Micallef, A., Vassallo, A. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on the Management of Coastal Recreational Resources (Malta)*, 79–85.

Marzloff, I., Poesen, J., 2009. The potential of 3-D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, 111: 48–60

Marzloff, I., Ries, J.B., Albert, K.D., 2003. Kite aerial photography for gully monitoring in Sahelian landscapes. *Proceedings of the Second Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries*.

Mason, T., Coates, T.T., 2001. Sediment transport processes on mixed beaches: a review for shoreline management. *Journal of Coastal Research*, 17: 645–657.

Masselink, G., Hughes, M., 2003, Introduction to coastal processes and geomorphology, Hodder Headline Group, London.

Masselink, G., Li, L., 2001. The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology*, 176: 139–156.

Masselink, G., Pattiaratchi, C.B., 1998. Morphological evolution of beach cusp morphology and associated swash circulation patterns. *Marine Geology*, 146: 93–113.

Matsukura, Y. (2001). Rockfall at Toyohama Tunnel, Japan, in 1996: effect of notch growth on instability of a coastal cliff, 285–289. doi:10.1007/s100640100123

Matthews, E. R., 1983. Measurements of beach pebble attrition in Palisser Bay, southern North Island, New Zealand, *Sedimentology*, 30: 787-799.

Matthews, N.A., 2008. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. Technical Note 428. Bureau of Land Management, Denver, Colorado.

McKay, P.J., Terich, T.A., 1992. Gravel barrier morphology: Olympic National Park, Washington State, USA. *Journal of Coastal Research*, 8: 813–829.

Miller, C.L., Laflamme, R.A., 1958. The digital terrain model - theory and application. *Photo-grammetric Engineering*, 25: 433–442.

Mitasova, H., Overton, M., Recalde, J., Bernstein, D., Freeman, C., 2009. Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal Lidar data. *Journal of Coastal Research*, 25: 507–514.

Mizutani, N., Ma, H., Eguchi, S., 2003. An experimental study on the beach profile change and grading process of beach material. *International offshore and polar engineering conference*, ISOPE, 864–869.

Moreno, L., Kraus, N., 1999. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design. *Coastal Sediments'99*, ASCE, 860–875.

Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J., Joswig, W., 2012. UAV-based remote sensing of the Super Sauze landslide: evaluation and results. *Engineering Geology*, 128: 2–11.

Norcross, Z.M., Fletcher, C.H., Merrifield, M., 2002. Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii. *Marine Geology*, 190: 553–580.

Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., Pranzini, E., 2004. Beach sediment alteration by natural processes and human actions: Elba Island, Italy. *Annals of the Association of American Geographers*, 94: 794–806.

Ojeda Zújar, J., Borgniet, L., Pérez Romero, A. M., Loder, J. F., 2002. Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 8 (1): 69.

- Ojeda, E., Guillén, J., 2008. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, 253: 51–62.
- Orford, J.D., 1975. Discrimination of particle zonation on a pebble beach. *Sedimentology*, 22: 441–463.
- Orford, J.D., Carter, R.W.G., Jennings, S.C., Hinton, A.C., 1995. Processes and time scales by which a coastal gravel dominated barrier respond geomorphologically to sea level rise—Story Head Barrier, Nova-Scotia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 21–37.
- Orford, J.D., Forbes, D.L., Jennings, S.C., 2002. Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel- dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48: 51–85.
- Osborne, P.D., 2005. Transport of gravel and cobble on a mixed-sediment inner bank shoreline of a large inlet, Grays Harbor, Washington. *Marine Geology*, 224: 145–156.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Reeve, D. E., 2008. Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *Marine Geology*, 253: 26–35.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D., Otta, A.K., Chadwick, A.J., 2006. On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53: 335–347.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Chadwick, A.J., Silva, R., 2007. A numerical– empirical approach for evaluating morphodynamic processes on mixed and gravel beaches. *Marine Geology*, 241: 1–18.
- Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M. 2001. Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Biblioteka Geographia Croatica, Knjiga 16, Dr. Feletar, Zagreb.
- Petrov, V.A., 1989. The differentiation of material on gravel beaches. *Okeanologiya*, 29: 279–284.
- Phillips, J.D., 1994. Deterministic uncertainty in landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 389–401.
- Pikelj, K. and Juračić, M., 2013. Eastern Adriatic Coast, EAC. Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast. *Journal of Coastal Research*, 29: 944–957.
- Pirazzoli, P.A., 1996. Sea Level Changes. The Last 20 000 Years. Wiley, Chichester, New York. 211.
- Poate, T., Masselink, G., Davidson, M., McCall, R., Russell, P., Turner, I., 2013. High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions. *Marine Geology*, 342: 1–13.
- Pontee, N.I., Pye, K., Blott, S., 2004. Morphodynamic behaviour and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches, Suffolk, UK. *Journal of Coastal Research*, 20: 256–276.
- Powell, K.A., 1990. Predicting Short Term Profile Response for Shingle Beaches. Hydraulics Research Limited, Wallingford, Oxfordshire.
- Pranzini, E., Rosas, V., 2009. Pocket beach response to high magnitude–low frequency floods (Elba Island, Italy). *Journal of Coastal Research*, 50: 969–977.
- Pranzini, E., Rosas, V., Jackson, N. L., i Nordstrom, K. F., 2013. Beach changes from sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood. *Geomorphology*, 199: 36–47.
- Prelogović, E., Kuk, V., Jamičić, D., Aljinović, B., Marić, K., 1995. Seizmotektonska aktivnost Kvarnerskog područja. *Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa*, Opatija 1995. 487-490.

Pye, K., Blott, S.J., 2009. Progressive breakdown of a gravel-dominated coastal barrier, Dunwich-Walberswick, Suffolk, U.K.: processes and implications. *Journal of Coastal Research*, 25: 589–602.

Pyle, C.J., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1997. Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *The Photogrammetric Record*, 15: 753–764.

Ranasinghe, R., McLoughlin, R., Short, A., Symonds, G., 2004. The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation. *Marine Geology*, 204: 273–287.

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3-D modelling: a review. *The Photo-grammetric Record*, 21: 269–291.

Richter, A., Faust, D., Maas, H.G., 2013. Dune cliff erosion and beach width change at the northern and southern spits of Sylt detected with multi-temporal Lidar. *Catena*, 103: 103–111.

Rosati, J. D., 2005. Concepts in Sediment Budgets. *Journal of Coastal Research*, 212: 307–322.

Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A., 2001. Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17: 407–419.

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Masselink, G., 2010. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278: 77–99.

Ružić, I., Benac, Č., 2011. Mošćenička Draga Investigating Sight – Hydrology and Coastal Processes. 2nd Project workshop: Monitoring and Analyses for Disaster Mitigation of Landslides, Debris flow and Floods.

Ružić, I., 2003. Analiza razina mora sjeverojadranskog područja i njihova međuodnosa s pojavama visokih razina voda u vodotocima na primjeru ušća Dubračine, Diplomski rad. Građevinski fakultet, Rijeka.

Ružić, I., Benac, Č., Ilić, S., Sušan, I., Ljutić, K., 2011. Promjene korištenja zemljišta i regulacija bujičnih vodotoka: utjecaj na žala Liburnije i otoka Cresa. 5. Hrvatska konferencije o vodama, 2011. Opatija. Hrvatske vode, Zagreb, 771-780.

Ružić, I., Marović, I., Vivoda, M., Dugonjić Jonjčević, S., Kalajžić, D., Benac, Č., Ožanić, N., 2013. Application of Structure-from-Motion photogrammetry for erosion processes monitoring, Moscenicka Draga example. *The 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, University of Split, Split, 49-50.

Ružić, I., Marović, I., Benac, Č., Ilić, S., 2014a. Coastal cliff geometry derived from Structure-from-Motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia. *Geo-Marine Letters*, 34: 555-565.

Ružić, I., Benac, Č., Marović, I., Ilić, S., 2014b. Stability assessment of coastal cliffs using digital imagery. *Acta Geotechnica Slovenica*. (prihvaćen za objavljivanje).

Sallenger Jr., A.H., Krabill, W., Brock, J., Swift, R., Manizade, S., Stockdon, H., 2002. Sea-cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997–1998 El Niño. *Marine Geology*, 187: 279–297.

Sallenger, A.H., 1979. Beach cusp formation. *Marine Geology*, 29: 23–37.

Sancho-García, A., Guillén, J., Ojeda, E., 2013. Storm-induced readjustment of an embayed beach after modification by protection works. *Geo-Marine Letters*, 33: 159–172.

Saye, S. E., van der Wal, D., Pye, K., Blott, S. J., 2005. Beach–dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72: 128–155

Schiaffino, C. F., Brignone, M., Ferrari, M., 2012. Application of the parabolic bay shape equation to sand and gravel beaches on Mediterranean coasts. *Coastal Engineering*, 59 (1), 57–63.

Schuhmacher, S., Böhm, J., 2005. Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modeling. U: El-Hakim, S., Remondino, F., Gonzo, L. (Ur.), 3D-ARCH 2005. Vol. XXXVI-5/W17 of ISPRS Archives. 7.

Semeniuk, V., Johnson, D.P., 1985. Modern and Pleistocene rocky shore sequences along carbonate coastlines, southwestern Australia. *Sedimentary Geology*, 44: 225–261.

Sharp, W.E., Fan, P., 1963. A sorting index. *Journal of Geology*, 71: 76–84.

Shepard, R.N., 1962. The analysis of proximities: multidimensional scaling with an unknown distance function. *Psychometrika*, 27: 125–140.

Sherman, D.J., 1991. Gravel beaches. *Nat. Geogr. Res.* 7 (4), 442–452. Shulmeister, J., Kirk, R.M., 1997. Evolution of a mixed sand and gravel barrier system in North Canterbury, New Zealand, during Holocene sea-level rise and still-stand. *Sediment Geology*, 87: 215–235.

Short AD, Masselink G., 1999. Embayed and structurally controlled beaches. Short A.D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, New York, 230–249.

Short, A.D., 1984. Temporal change in beach type resulting from a change in grain size. *Search*, 15 (7-8): 228–230.

Short, A.D., 2010. Role of geological inheritance in Australian beach morphodynamics. *Coastal Engineering*, 57: 92–97.

Short, A.D., Trembanis, A.C., Turner, I.L., 2000. Beach oscillation, rotation and the southern oscillation, Narraben Beach, Australia. *Proceeding of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, Australia, 2439–2456.

Shulmeister, J., Kirk, R.M., 1997. Holocene fluvial-coastal interactions on a mixed sand and sand and gravel beach system, North Canterbury, New Zealand. *Catena*, 30: 337–355.

Silveira, L. F., Klein, A.H.F. and Tessler, M.G., 2010. Headland bay beach planform stability of Santa Catarina State and of the Northern Coast of Sao Paulo State. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58: 101–122.

Silvester, R., 1960. Stabilization of sedimentary coastlines. *Nature*, 188: 467–469.

Smith, M., Chandler, J., Rose, J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 155–161.

Snively, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections, Doktorski rad, University of Washington, USA.

- Snavely, N., Seitz, S.N., Szelski, R., 2006. Photo Tourism: Exploring Image Collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, New York, 1–12.
- Spetsakis, M.E., Aloimonos, Y., 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision*, 6: 245–255.
- Stapleton, K., Mason, T., Coates, T.T., 1999. Sub-tidal resolution of beach profiles on a macro-tidal shingle beach. *Proc. Coastal Sed.'99*. ASCE, 885–893.
- Stephenson, W.J., Brander, R.W., 2003. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography*, 27: 607–623.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *Journal of Geophysical Research*, 105: 22015–22033.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53: 573–588.
- Stojic, M., Chandler, J.H., Ashmore, P., Luce, J., 1998. The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64: 387–395.
- Storlazzi, C.D., Field, M.E., 2000. Sediment distribution and transport along a rocky, embayed coast: Monterey Peninsula and Carmel Bay, California. *Marine Geology*, 170: 289–316.
- Strahler, A.N., 1966. Tidal cycle of changes on an equilibrium beach. *Journal of Geology*, 74: 247–268.
- Sturznegger, M., Stead, D., 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106: 163–182.
- Sunamura, T., 1975. A study of beach ridge formation in laboratory. *Geographical Review of Japan*, 48: 761–767.
- Sunamura, T., 1982. A predictive model for wave induced erosion, with application to Pacific coasts of Japan. *Journal of Geology*, 90: 167–178.
- Sunamura, T., 1992. *The Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, Chichester.
- Syvitski, J.P.M., Milliman, J.D., 2007. Geology, geography and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *Journal of Geology*, 115: 1–19.
- Šegota, T., Filipčić, A. 1996: *Klimatologija za geografe*, 3. izdanje, str.470. Školska knjiga, Zagreb.
- Šutalo, I., Ivandić, N., Marušić, Z.: Total contribution of tourism to Croatian economy: Input output model and tourism satellite account, *Ekonomski pregled*, 5: 267-285.
- Takeda, I., Sunamura, T., 1982. Formation and height of berms. *Transactions—Japanese Geomorphological Union*. 3, 145–157.
- Theuerkauf, E.J. and Rodriguez, A.B., 2012. Impacts of Transect Location and Variations in Along-Beach Morphology on Measuring Volume Change. *Journal of Coastal Research*, 28: 707–718.
- Thomas, T., Phillips, M.R., Williams, A.T., Jenkins, R.E., 2012. Medium time-scale behavior of adjacent embayed beaches: influence of low energy external forcing. *Applied Geography*, 32: 265–280.

- Trenhaile, A.S., 2002. Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 48: 7-22.
- Trenhaile, A.S., 1989. Sea level oscillations and the development of rock coasts. In: Lakhan, V.C., Trenhaile, A.S. (Ur.), *Applications in Coastal Modeling*. Elsevier, Amsterdam, 271–295.
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., Gonzalez, M., 2013. An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Marine Geology*, 346: 220–232.
- Turki, I., Medina, R., Gonzalez, M., Coco, G., 2013. Natural variability of shoreline position: Observations at three pocket beaches. *Marine Geology*, 338: 76–89.
- Van der Werf, I., Van Gent, M.R.A., 2010. Gravel beaches with seawalls. *Coastal Engineering*, 32: 1853-1868.
- VanWellen, E., Chadwick, A.J., Mason, T., 2000. A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 40: 243–275.
- Velegrakis, A.F., Voudoukas, M., Meligonitis, R., 2005. Erosion of islandic beaches: phenomenology and causes of the degradation of the largest natural resource of islandic Greece. Tsaltas, G. (Ur.), *Islandic Greece in the 21st century (in Greek)*. SIDERIS Publications, Atna, 243–262
- Velić, I., Vlahović, I., 2009. *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- Vericat, D., Brasington, J., Wheaton, J., Cowie, M., 2009. Accuracy assessment of aerial photographs acquiring using lighter-than-air blimps: low cost tools for mapping river corridors. *River Research and Applications*, 25: 985–1000.
- Vlada Republike Hrvatske: strategija razvoja turizma Republike Hrvatske do 2020. Godine, Zagreb, travanj, 2013.
- Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I., Matičec, D., 2005. Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Paleogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 220: 333–360.
- Voudoukas, M.I., Velegrakis, A.F., Dimou, K., Zervakis, V., Conley, D. C., 2009. Wave run-up observations in microtidal, sediment-starved pocket beaches of the Eastern Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, 78: 37–47.
- Walkden, M.J.A., Hall, J.W., 2005. A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. *Coastal Engineering*, 52: 535–563.
- Walkden, M.J.A., Hall, J.W., 2011. A Mesoscale predictive model of the evolution and management of a soft-rock coast. *Journal of Coastal Research*, 27: 529–543.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, D., 2012. Development of a UAV–LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4: 1519–1543.
- Warrick, J.A., Fong, D.A., 2004. Dispersal scaling from the world's rivers. *Geophysical Research Letters*, 31: L04301.
- Weir, F. M., Hughes, M. G., Baldock, T. E., 2006. Beach face and berm morphodynamics fronting a coastal lagoon. *Geomorphology*, 82: 331–346.

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 209–226.

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: 300–314.

Wheatcroft, R.A., Sommerfield, C.K., Drake, D.E., Borgeld, J.C., Nittrouer, C.A., 1997. Rapid and widespread dispersal of flood sediment on the northern California margin. *Geology*, 25: 163–166.

Williams, A.T., Caldwell, N., 1988. Particle size and shape in pebble beach sedimentation. *Marine Geology*, 82: 199–215.

Williams, A.T., Davies, P., Bomboe, P., 1993. Geometrical simulation studies of coastal cliff failures in Liassic strata, south Wales, U.K. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 703–720.

Willis, C.M., Griggs, G.B., 2003. Reductions in fluvial sediment discharge by coastal dams in California and implications for beach sustainability. *Journal of Geology*, 111: 167–182.

Wright, L. D., and Short, A. D., 1983. Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. *Handbook of Coastal Processes and Erosion*, P. D. Komar (Ur), CRC Press, Boca Raton, Florida, 35-64.

Wright, L.D., Chappell, J., Thom, B.G., Bradshaw, M., Cowell, P., 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems, southeastern Australia. *Marine Geology*, 32: 105–140.

Youd, T.L., 1977. Packing changes and liquefaction susceptibility. *Journal of Geotechnical Engineering*, 103: 918–922.

Young, A., Ashford, S., 2006. Application of Airborne Lidar for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions. *Journal of Coastal Research*, 22: 307–318.

PRILOG 1

Zabilježene motrene jačine i smjerovi vjetrova na meteorološkim postajama Kukuljanovo i Crikvenica od 1.10.2013. do 31.12.2014.

datum	Motriteljska postaja Kukuljanovo						Motriteljska postaja Crikvenica						Kukulj. prosjek jačina	Crikv. prosjek jačina	Mjer. topog. žala
	7 sati vjetar smjer	14 sati vjetar jačina	21 sati vjetar smjer	21 sati vjetar jačina	7 sati vjetar smjer	14 sati vjetar jačina	21 sati vjetar smjer	21 sati vjetar jačina	7 sati vjetar smjer	14 sati vjetar jačina	21 sati vjetar smjer	21 sati vjetar jačina			
2013-10-01	NNE	4	NE	3	NNE	1	S	1	SE	3	S	2	2.7	2.0	
2013-10-02	NE	2	NNE	3	NNE	3	E	1	C	0	SW	1	2.7	0.7	
2013-10-03	NE	3	NE	4	NNE	4	E	2	SW	4	S	4	3.7	3.3	
2013-10-04	NNE	3	ENE	1	NNE	2	E	1	SE	2	NE	2	2.0	1.7	1
2013-10-05	NNE	1	NNE	1	NW	1	NE	1	S	1	S	2	1.0	1.3	
2013-10-06	N	1	SSW	1	ESE	2	NE	1	SE	2	NE	3	1.3	2.0	
2013-10-07	NE	4	NE	4	NNE	3	NE	2	NW	1	NW	1	3.7	1.3	
2013-10-08	NE	2	SE	3	NNE	2	SW	1	S	1	SW	2	2.3	1.3	
2013-10-09	NE	1	SSW	1	SE	1	NE	1	C	0	NE	2	1.0	1.0	
2013-10-10	SSW	1	SSW	2	SE	3	S	1	SW	1	S	4	2.0	2.0	
2013-10-11	SE	1	NW	1	N	1	S	4	NE	2	NE	1	1.0	2.3	
2013-10-12	N	1	NW	1	N	1	NE	1	SW	1	NE	1	1.0	1.0	
2013-10-13	NNW	1	SSW	1	NNW	1	C	0	NE	2	N	1	1.0	1.0	
2013-10-14	NNE	1	SSE	1	N	1	NW	1	N	2	C	0	1.0	1.0	
2013-10-15	N	1	SE	1	SW	1	NE	1	C	0	E	2	1.0	1.0	
2013-10-16	NNE	1	WNW	1	ENE	1	C	0	N	1	NE	2	1.0	1.0	
2013-10-17	NE	1	SW	1	NNE	1	NE	1	C	0	NE	1	1.0	0.7	
2013-10-18	NNW	1	SSE	1	NNE	1	NE	1	E	1	NE	1	1.0	1.0	
2013-10-19	NNW	1	SSE	1	N	1	NE	1	E	2	NE	1	1.0	1.3	
2013-10-20	SSW	1	SSW	1	SSW	1	NE	1	N	2	SE	2	1.0	1.7	
2013-10-21	SSW	1	SSE	1	NW	1	SE	1	SE	1	C	0	1.0	0.7	
2013-10-22	SSW	1	SSW	1	NNW	1	C	0	SE	2	E	1	1.0	1.0	
2013-10-23	WSW	1	SE	1	ESE	1	C	0	C	0	C	0	1.0	0.0	
2013-10-24	SE	1	SE	1	N	1	C	0	NW	1	SW	1	1.0	0.7	
2013-10-25	NE	1	SSW	1	NE	1	NE	1	SW	1	NE	1	1.0	1.0	
2013-10-26	N	1	SSW	1	NNW	1	E	1	NE	1	C	0	1.0	0.7	
2013-10-27	NNW	1	S	1	SSE	1	NE	1	SE	1	W	1	1.0	1.0	
2013-10-28	SE	1	SSE	2	SSW	1	E	2	S	2	SW	1	1.3	1.7	
2013-10-29	SSW	1	SSW	1	NNE	1	SW	1	C	0	NE	1	1.0	0.7	
2013-10-30	NNE	2	NNE	3	NNE	5	C	0	E	3	NE	4	3.3	2.3	2
2013-10-31	NNE	5	ENE	3	ENE	1	NE	4	E	2	NE	1	3.0	2.3	
2013-11-01	N	1	SE	1	NNE	1	NW	1	SE	2	S	1	1.0	1.3	
2013-11-02	ESE	1	SSE	2	SSW	1	SSW	2	SW	3	SW	2	1.3	2.3	
2013-11-03	SSW	2	SSE	2	SSE	2	S	3	SE	4	SE	2	2.0	3.0	
2013-11-04	NNE	1	SSW	2	NE	1	NE	1	NE	2	NW	1	1.3	1.3	
2013-11-05	WSW	1	NNE	3	NNE	3	C	0	NW	4	NE	5	2.3	3.0	
2013-11-06	NNW	1	SW	1	N	1	NE	2	SE	2	NW	1	1.0	1.7	3
2013-11-07	NNE	1	SSW	1	N	1	NE	1	SW	1	E	3	1.0	1.7	
2013-11-08	NW	1	SSW	1	SSW	1	NE	1	S	1	SE	3	1.0	1.7	
2013-11-09	SSW	2	SSE	2	S	2	SE	2	S	2	SSE	4	2.0	2.7	
2013-11-10	ESE	1	SSE	2	NNE	1	NE	1	S	4	SSW	6	1.3	3.7	
2013-11-11	NNE	8	NNE	8	NNE	7	NNE	7	NNE	8	NE	6	7.7	7.0	
2013-11-12	NNW	7	NNE	6	NE	5	E	4	SW	3	NNE	2	6.0	3.0	4
2013-11-13	NE	4	NNE	4	NNE	6	C	0	NW	2	NE	3	4.7	1.7	
2013-11-14	NNE	4	NE	2	NNE	3	NE	3	E	2	NW	1	3.0	2.0	
2013-11-15	NNE	5	NNE	5	NNE	4	NE	3	NNE	4	N	1	4.7	2.7	
2013-11-16	NNE	4	NNE	4	NNE	3	NNE	4	NE	3	NE	3	3.7	3.3	
2013-11-17	ENE	3	S	1	NNE	1	NE	1	SE	1	NE	1	1.7	1.0	
2013-11-18	N	1	SE	1	SW	1	NE	1	NE	2	N	1	1.0	1.3	5
2013-11-19	NNE	1	NE	1	NE	1	NW	1	NE	3	SW	6	1.0	3.3	
2013-11-20	ESE	1	SW	1	NW	1	N	1	SE	2	NE	2	1.0	1.7	
2013-11-21	ENE	1	SE	1	NE	1	SE	1	E	2	NE	1	1.0	1.3	
2013-11-22	NE	1	NE	2	NNE	3	NE	1	NNE	3	NE	5	2.0	3.0	
2013-11-23	NNE	5	NNE	3	ESE	2	NNE	6	NE	5	S	1	3.3	4.0	
2013-11-24	NE	2	NNE	3	NW	1	N	1	NW	2	NW	1	2.0	1.3	
2013-11-25	NNW	1	NNE	4	NNW	2	NE	2	SE	5	NE	1	2.3	2.7	

datum	Motriteljska postaja Kukuljanovo						Motriteljska postaja Crikvenica						Kukulj. prosjek jačina	Crikv. prosjek jačina	Mjer. topog. Zala
	7 sati	14 sati	21 sat	7 sati	14 sati	21 sat	7 sati	14 sati	21 sat	7 sati	14 sati	21 sat			
	vjetar smjer	vjetar jačina	vjetar smjer	vjetar jačina	vjetar smjer	vjetar jačina	vjetar smjer	vjetar jačina	vjetar smjer	vjetar jačina	vjetar smjer	vjetar jačina			
2013-11-26	N	7	NNE	6	NNE	6	NNE	3	NW	5	NE	3	6.3	3.7	
2013-11-27	NE	3	ENE	2	NE	2	NE	2	E	1	NE	2	2.3	1.7	
2013-11-28	NNE	3	SSW	1	N	1	NE	1	SE	2	NE	2	1.7	1.7	6
2013-11-29	N	1	SW	1	N	1	NE	1	SE	1	NE	2	1.0	1.3	
2013-11-30	NNE	1	ENE	1	NNE	5	NE	2	NW	1	NNE	4	2.3	2.3	
2013-12-01	NNE	7	NNE	6	NNE	7	NE	6	NE	8	NE	6	6.7	6.7	
2013-12-02	NNW	5	NNE	5	NNE	7	E	3	NW	2	NW	3	5.7	2.7	
2013-12-03	NNE	4	NNE	3	NNE	3	NE	2	C	0	NE	1	3.3	1.0	
2013-12-04	NNE	1	SSW	1	NNE	1	NW	1	SE	1	NE	1	1.0	1.0	7
2013-12-05	NNE	3	NNE	3	N	1	NE	1	NW	1	N	1	2.3	1.0	
2013-12-06	N	1	NNE	1	NE	1	NE	1	N	1	C	0	1.0	0.7	
2013-12-07	NW	1	SSW	1	NE	1	NE	1	W	2	NE	1	1.0	1.3	
2013-12-08	N	1	SE	1	SSE	1	NE	1	SE	2	W	1	1.0	1.3	
2013-12-09	N	1	WNW	1	ESE	1	C	0	NW	1	NW	1	1.0	0.7	
2013-12-10	NNW	1	NNE	3	NNE	3	E	1	SE	2	NE	2	2.3	1.7	
2013-12-11	NNE	1	SW	1	NE	2	C	0	W	1	NE	1	1.3	0.7	
2013-12-12	NNE	2	SW	1	NNE	2	NE	1	SE	1	NW	1	1.7	1.0	
2013-12-13	NNE	1	SSW	1	NNE	1	NE	1	C	0	NE	1	1.0	0.7	
2013-12-14	NNW	1	SSW	1	SW	1	NE	1	C	0	NE	2	1.0	1.0	
2013-12-15	NNE	2	ENE	2	N	1	NE	1	W	2	NE	2	1.7	1.7	
2013-12-16	N	1	SSE	1	NNE	1	NE	1	E	1	C	0	1.0	0.7	
2013-12-17	NNE	1	SSW	1	NNE	1	NE	1	SE	1	NE	1	1.0	1.0	
2013-12-18	NNW	1	SSE	1	NNW	1	NE	1	E	1	NE	1	1.0	1.0	
2013-12-19	NNW	1	SSW	1	N	1	S	1	SE	1	NW	1	1.0	1.0	
2013-12-20	ENE	1	SSW	1	NNW	1	E	2	C	0	NE	2	1.0	1.3	
2013-12-21	ENE	1	NE	1	N	1	C	0	NE	1	C	0	1.0	0.3	
2013-12-22	SSW	1	SSE	1	S	1	NE	1	C	0	C	0	1.0	0.3	
2013-12-23	S	1	WSW	1	NNW	1	C	0	NE	1	C	0	1.0	0.3	
2013-12-24	NNW	1	SW	2	SSE	2	C	0	E	1	SE	2	1.7	1.0	8
2013-12-25	S	1	SSE	2	SSE	3	NE	3	S	2	S	5	2.0	3.3	
2013-12-26	S	3	SSE	4	ESE	1	SE	2	SE	5	NE	1	2.7	2.7	
2013-12-27	NNE	5	NNE	4	NE	1	SE	1	NW	1	NW	1	3.3	1.0	9
2013-12-28	N	1	SE	1	SSE	1	C	0	E	1	NE	2	1.0	1.0	
2013-12-29	ESE	1	NNW	1	NE	1	E	1	NW	2	W	1	1.0	1.3	
2013-12-30	NNE	5	NNE	5	NNE	3	NE	4	NE	5	NE	3	4.3	4.0	
2013-12-31	NE	2	NNE	2	NE	1	C	0	NW	1	NE	2	1.7	1.0	

POPIS TABLICA

<i>Tablica 3.1. Statistički podatci za mjesečne srednjake u Bakru, (1959-2001)</i>	28
<i>Tablica 3.2. Statistički podatci za mjesečne i godišnje maksimume u Bakru (1959-2001)</i>	28
<i>Tablica 5.1. Pregled kontrolnih (GCP) i verifikacijskih točaka. Korištene GCP su označene sivom bojom.</i>	48
<i>Tablica 5.2. Kriteriji vrednovanja vertikalnog odstupanja 3D modela u verifikacijskim točkama</i>	51
<i>Tablica 5.3. Korijen srednjeg kvadrata pogreške – RMSE (cm) i maksimalno (cm) vertikalno odstupanja verifikacijskih točaka ispitanih scenarija georeferenciranja oblaka točaka žala Klančac (Brseč)</i>	52
<i>Tablica 6.1. Pregled mjerenja žala Klančac (Brseč)</i>	68
<i>Tablica 6.2. Integrirani volumeni žala (m³), različitih visina integracije (0,00, 0,25, 0,50 i 0,75 m n.m.). Zelenim su označene integracije od određene visine u slučajevima kada je ta visina izmjerena, narančasto djelomično izmjerena i crveno kada nije izmjerena (slika 6.2. i 6.3.).</i>	77
<i>Tablica 6.3. Ukupne parcijalne promjene volumena žala između sukcesivnih mjerenja</i>	81
<i>Tablica 6.4. Prognozirani parametri vjetra (ALADIN), simulirani parametri vala (SWAN) između provedenih mjerenja. Zabilježeni volumeni i orijentacije žala tijekom provedenih mjerenja i njihove razlike.</i>	102
<i>Tablica 7.1. Redni brojevi, datumi i integrirani volumeni žala od 2.1.2012. do 11.4.2012.</i>	112
<i>Tablica 7.2. Trajanje (u satima i postocima), maksimalne i prosječne srednje satne brzine vjetrova iz NE i SE kvadranta. Ukupne promjene volumena i intenzitet</i>	115
<i>Tablica 8.1. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka 1-5</i>	145
<i>Tablica 8.2. Proračun stabilnosti obalnih klifova</i>	149

POPIS SLIKA

<i>Slika 1.1. Pregledna krata provedenih istraživanja. I - Klančac (kraj Brseča); II - Uboka (južno od Mošćeničke Drage), III – Škrila (Stara Baška). 1-9 - karakteristična žala istraživanog područja (slika 1.2.); 10 - Potovščica (Faivre i dr., 2011)</i>	7
<i>Slika 1.2. Karakteristična žala na području Kvarnera.</i>	8
<i>Slika 1.3. Žalo Klančac pokraj Brseča. 1 – Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka; 2 – Špilja; 3 - Šljunkovito žalo</i>	9
<i>Slika 1.4. Žalo Uboka južno od Mošćeničke Drage. 1 – Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka i izvorskih voda; 2 – Povremeno izviranje voda; 3 - Šljunkovito žalo</i>	9
<i>Slika 1.5. Obala na lokaciji Škrila zapadno od Stare Baške. 1 - Povremeno istjecanje bujičnog vodotoka; 2 – obalni klifovi; 3 - Šljunkovito žalo</i>	10
<i>Slika 2.1. Uska zona loma valova iz smjera SE (jugo) na šljunčanom žalu Klančac kod Brseča 26. i 27. 12.2013. a: neposredno prije loma vala; b: lom vala; c: doseg loma vala; d: žalo dan poslije tijekom umjerenih valova</i>	13
<i>Slika 3.1. Prognoze učestalosti pojave maksimalne razine mora u Bakru, sadašnja morska razina (plava), u slučaju povećanja morske razine 20 cm (ljubičasta) i 60 cm (crvena).</i>	29
<i>Slika 3.2. Digitalni model podmorje Kvarnera</i>	30
<i>Slika 3.3. Značajne visine valova (Hs) iz SE i NE smjera; vjetar konstantne jačine 25 m/s</i>	31
<i>Slika 5.1. Dijagram toka snimanja minijaturnog žala pomoću Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije</i>	40
<i>Slika 5.2. Rekonstrukcija minijaturnog šljunčanog žala pomoću SfM fotogrametrije. a – fotografija žala u uvali Uboka, b – lokacije snimanja niz fotografija (Jemes i dr. 2013.)</i>	41
<i>Slika 5.3. Trodimenzionalni oblaci točaka žala Klančac, snimljeni 30.10.2013. (crvena) i 18.11.2013. (zelena). Strelicama su prikazane pojednostavljene pozicije i kutovi snimanja fotografija</i>	42
<i>Slika 5.4. Primjer korištenih zemaljskih kontrolnih točaka (ground-control-points (GCP))</i>	45
<i>Slika 5.5. Korištene zemaljske kontrolne točke (GCP) na fotografiji i foto-realističnom oblaku točaka.</i>	45
<i>Slika 5.6. Fiksne kontrolne točke (GCP) na žalu Klančac kod Brseč označene su crvenim krugom</i>	46
<i>Slika 5.7. Žalo Klančac (Brseč) tijekom provedenih istraživanja od 4.10.2013. do 28.11.2013. Desno je tlocrtni prikaz oblaka točaka sa granicama žala (ljubičasta)</i>	46
<i>Slika 5.8. Prostorna raspodjela GCP i verifikacijskih točaka, prikazani na radnoj fotografiji 6.11.2013 (A), tlocrtnom rasporedu (B) i trodimenzionalnom foto realističnom oblaku točaka (C).</i>	49
<i>Slika 5.9. Vertikalna odstupanja (m) verifikacijskih točaka četiri ispitana scenarija korištenja različitih tipova GCP (crveno ljubičasti krug)</i>	50
<i>Slika 5.10. Histogram vertikalnih odstupanja verifikacijskih točaka,</i>	51
<i>Slika 5.11. Kontrolne točke - fiksne oznake na stijenama 18 i 19 (slika 5.7.), snimljeno 18.11.2013.</i>	52
<i>Slika 5.12. Poprečni presjeci derivirani iz oblaka točaka prije (crveno) i nakon (zeleno) primjene ICP algoritma u odnosu na referentno mjerenje broj 3 (ljubičasta). A – poprečni presjek sa prikazanim detaljem na objektu (B); C – poprečni presjek s prikazanim detaljem na granici stijene i žala (D)</i>	55
<i>Slika 5.13. Poprečni presjeci derivirani iz oblaka točaka nakon primjene ICP algoritma. A – poprečni presjek s prikazanim detaljem na objektu (B); C – poprečni presjek s prikazanim detaljem na granici stijene i žala (D)</i>	57
<i>Slika 5.14. Analize morfolo minijaturnih šljunčanih žala baziraju se na podacima deriviranim iz trodimenzionalnih oblaka točaka i DEM.</i>	58
<i>Slika 5.15. Primjer promjena složenog profila žala prikazan trodimenzionalnim oblakom točaka.</i>	59
<i>Slika 5.16. Rotacija minijaturnog žala Klančac (Brseč) od 4.10.2013 do 28.11.2013, prikaz slojnice 0.30m na foto-realističnom oblaku točaka</i>	60
<i>Slika 5.17. Primjer profila žala i klifa generiranih iz 3D oblaka točaka (Stara Baška)</i>	61
<i>Slika 5.18. Trodimenzionalni oblak točaka žala. a – oblak točaka tijela žala; b – ortogonalni prikaz oblaka točaka žala (bijelo) i okonih stijena; Tlocrtni prikaz žala i okonih stijena presjek na 7 m n.m.(c) i 2 m n.m.(d)</i>	62
<i>Slika 6.1. A - Oblak točaka žala prikazan u relativnom koordinatnom sustavu s ishodištem u točki E 322710, N 5007320, H 0, HTRS96 (svjetlo plava) i relativnom rotiranom koordinatnom sustavu (crvena) s kutom rotacije</i>	

23,7°; B – 3D prikaz oblaka točaka sa karakterističnim udaljenostima; C – Prikaz udaljenosti duž obale (long-shore) i okomito na obalu (cross-shore) žala	67
Slika 6.2. Trodimenzionalni foto-realistični oblak točaka i slojnice derivirane iz oblaka točaka žala Klančac. Mjerenja: 1 (4.10.), 2 (30.10.), 3 (6.11.), 4 (12.11.) i 5 (18.11.)	69
Slika 6.3. Trodimenzionalni foto-realistični oblak točaka i slojnice derivirane iz oblaka točaka žala Klančac. Mjerenja: 6 (28.11.), 7 (4.12), 8 (24.12) i 9 (27.12).	70
Slika 6.4. Numerička simulacija valova SE (jugo) i NE (bura) vjetra. A – C: jugo, 26.12.2013.; D – F: bura, 11.11.2013.; Prognozirano polje vjetra modela Aladin - DHMZ (A,D); Numeričke simulacije valova Kvarnera i Riječkog zaljeva (B,E), te detalja oko Brseča (C,F)	72
Slika 6.5. Srednje dnevne motrene jačine vjetra (u Boforima) od 1.10.2013. do 31.12.2013., meteorološke postaje Kukuljanovo (zeleno) i Crikvenica (crveno), s prikazanim provedenim mjerenjima žala Klančac (ljubičasto).	73
Slika 6.6. Promjene obalne linije i rotacija žala Klančac (Brseč) prikazane na foto-realističnom oblaku točaka žala i slojnicom žala visine 0.40 m n.m.	74
Slika 6.7. Slojnice žala derivirane iz oblaka točaka prikazane u relativnom rotiranom koordinatnom sustavu žala. Prikazane su slojnice visine 0,15 m n.m. (A), 0,40 m n.m. (B), 0,80 m n.m. (C), 1,20 m n.m. (D). Slojnice pojedinog mjerenja prikazane su različitim bojama (legenda, tablica 6.1.)	75
Slika 6.8. Zabilježene promjene poprečnih (A-C) i uzdužnih (D-F) presjeka žala.	76
Slika 6.9. Integrirani volumeni žala od visine 0 m n.m. (crvena), 0,25 m n.m. (svijetloplava), 0,50 m n.m. (ljubičasta), 0,75 m n.m. (žuta). Zelenom točkom su prikazane integracije od određene visine u slučajevima kada je ta visina izmjerena na oblaku točaka, narančasto djelomično izmjerena i crveno kada nije izmjerena (slika 6.2 i 6.3).	78
Slika 6.10. Parcijalne promjene volumena uzduž žala Klančac.	79
Slika 6.11. Parcijalne promjene volumena uzduž žala Klančac između uzastopnih mjerenja.	80
Slika 6.12. A – Prognozirano polje vjetra (ALADIN) 20.11.2012. B - Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 1.	82
Slika 6.13. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 1 (4.10.) i 2 (30.10.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala	83
Slika 6.14. Prognozirano polje vjetra (ALADIN) (A - 3.11., C - 5.11.). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 2 i 3.	85
Slika 6.15. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 2 (30.10.) i 3 (6.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - promjene poprečnih presjeka žala	86
Slika 6.16. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A – 11.11.), Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja br. 3.	88
Slika 6.17 Fotografija žala tijekom mjerenja broj 4 (12.11), blokovi vidljivi na površini žala nakon erozije sjeveroistočnog dijela žala	89
Slika 6.18. Promjene žala Klančac između mjerenja 3 (6.11.), 4 (12.11.) i 5 (18.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala	90
Slika 6.19. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 21.11, C - 28.11). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama.	91
Slika 6.20. Promjene žala Klančac između mjerenja br. 5 (18.11.) i 6 (28.11.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala	92
Slika 6.21. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 1.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 6 i 7 (raspored slojnica detaljno je prikazan na slici 3).	94
Slika 6.22. Promjene žala Klančac između mjerenja 6 (28.11) i 7 (4.12) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala izražene po metru dužnom žala; C - poprečni presjeci žala	95
Slika 6.23. Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (A - 20.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 7 i 8	97
Slika 6.24. Promjene žala Klančac između mjerenja 7 (4.12) i 8 (24.12) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala izražene po metru dužnom žala; C - poprečni presjeci žala	98

<i>Slika 6.25. Djelovanje valova SE vjetra na žalo Klančac (26.12.2013.)</i>	99
<i>Slika 6.26 Polje vjetra prognozirano modelom Aladin (26.12). Rezultati numeričke simulacije značajne visine vala (SWAN) ispred žala Klančac sa prikazanim slojnicama mjerenja 8(24.12)</i>	100
<i>Slika 6.27. Promjene žala Klančac između mjerenja 8 (24.12.) i 9 (27.12.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala</i>	101
<i>Slika 6.28. Promjene poprečnih presjeka profila 10, 15, 25 i 35 od mjerenja br. 3 (6.11.) do 9 (27.12.)</i>	103
<i>Slika 6.29. Površine žala u profilima 9, 15, 25 i 35.</i>	104
<i>Slika 6.30. Korelacija simuliranih značajnih visina dubokovodnog vala (H_s^0) ispred žala Klančac i promjena volumena žala.</i>	105
<i>Slika 6.31. Odnos orijentacije i volumena žala Klančac kod Brseča od mjerenja br. 1 (4.10.) do 9 (27.12.).</i>	106
<i>Slika 7.1 Zabilježena stanja žala Uboka tijekom jeseni 2013.</i>	111
<i>Slika 7.2. Žalo Uboka, orto-foto i zonacija sedimenta žala (19.2.2014)</i>	111
<i>Slika 7.3. Fotografije žala snimljene tijekom karakterističnih mjerenja i promjene visina žala (m)</i>	114
<i>Slika 7.4. Specifični morfološki stadiji žala. Srednje satne brzine (A) i direkcije (B) vjetra; C-kumulativna godišnja oborina (mm); D-Integrirani volumen žala (m^3)</i>	116
<i>Slika 7.5. Parcijalne promjene volumena uzduž žala [m^3m^{-1}]. A - otvaranje žala: 1 (2.1.) – 2 (5.1.), B - spori oporavak žala: 2 (5.1.) – 4 (24.1.), C - brzi oporavak žala: 4 (20.1.) – 7 (14.2.), D - bez značajnih promjena 7 (14.2.) – 10 (11.4.)</i>	117
<i>Slika 7.6. Promjene žala Uboka između mjerenja br. 1 (2.1.) i 2 (5.1.) A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala</i>	119
<i>Slika 7.7. Promjene žala Uboka između mjerenja 2 (5.1.) i 4 (24.1); A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena; C - poprečni presjeci žala</i>	121
<i>Slika 7.8. Promjene žala Uboka između mjerenja 4 (24.1.) i 7 (14.2.); A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C - poprečni presjeci žala</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Slika 7.9. Promjene žala Uboka između mjerenja 7 (14.2.) i 10 (11.4.). A - promjene visina žala; B - parcijalne promjene volumena žala; C – poprečni presjeci žala.</i>	125
<i>Slika 7.10. Motreni podaci o vjetru (Meteorološka postaja Crikvenica (DHMZ)): smjer vjetra (°), jačina vjetra (crveno (≥ 4 Bf), narančasto (2 – 3 Bf), plavo (1 Bf)). Integrirani volumeni žala.</i>	127
<i>Slika 7.11 Parcijalne promjene volumena žala između uzastopnih mjerenja žala od 20.1.2012 do 14.2.2012.</i>	128
<i>Slika 7.12. Karakteristični poprečni presjeci žala od mjerenja br. 3(20.1.) do 7(14.2.)</i>	129
<i>Slika 7.13. Primjer snimljenog profila žala u slučaju kada je kanal ispunjen vodom mjerenje br. 2 (5.1.) i kada je kanal suh mjerenja br. 1 (2.1), 3 (20.1) i 4 (24.1)</i>	131
<i>Slika 7.14. Integrirani volumena žala bez (crvena) i sa (plava) primjenom korekcije visina površina pod vodom.</i>	131
<i>Slika 8.1. Pregledna inženjerskogeološka karta istraživanog područja (crveni pravokutnik): 1 – karbonatne stijene; 2 – siliciklastične stijene pokrivene siparnim brečama i koherentnim padinskim naslagama; 3 – Šljunkovite bujične naplavine; 4 – Povremeni površinski tokovi.</i>	137
<i>Slika 8.2. Recentni kolaps klifa snimljen 9.2.2014. 1 – sloj tla debljine cca 1 m; 2 – siparna breča</i>	138
<i>Slika 8.3. Šljunkovito-pjeskovito žalo i blokovi siparnih breča</i>	138
<i>Slika 8.4. Trodimenzionalni oblak točaka žala i klifa s prikazom detaljno analiziranih profila.</i>	139
<i>Slika 8.5. Poprečni presjeci karakterističnih profila 1-5 (slika 8.4.), plava - srednja morska razina (SMR); ljubičasta - morska razina olujnog usopra (100 gPP)</i>	140
<i>Slika 8.6. Značajna visina valova 100 god PP (H_s (m)), sjeveroistočni dio Kvarnerića (rezultati modela SWAN)</i>	141
<i>Slika 8.7. Značajna visina valova juga, 100 god PP (SWAN). Obalna linija (0,15 m n.m.) označena je ljubičasto, dno i vrh klifa crnom isprekidanom linijom</i>	142
<i>Slika 8.8. Rezultati numeričke simulacije disipacije energije valova prikazane na foto-realističnom 3D oblaku točaka. A-C - originalni oblak točaka; D-F - oblak točaka reduciran do visine 1,30 m n.m.</i>	143
<i>Slika 8.9. Disipacija energije valova značajne visine $H_s^0=2,4m(100gPP)$. A - srednja morska razina (0,15m), B - povišena morska razina (1gPP 0,80m); C - ekstremna morska razina (100gPP 1,30m)</i>	144
<i>Slika 8.10. Promjene obalne linije i linije lica klifa istraživanog područja: a) avio-snimak 1966; b) orto-foto karta (mj. 1:5000) 2004; 1 – linija lica klifa iz 1966; 2 – obalna linija iz 1966.</i>	146

POPIS SLIKA

<i>Slika 8.11. Geometrijski parametri i raspodjela naprezanja unutar klifa – profil 3. a – bez vlačne pukotine, b – s slojem zemlje na vrhu klifa</i>	148
<i>Slika 8.12. Odron podlokanog klifa na rtu, između detaljnih profila 3 i 4</i>	151

ŽIVOTOPIS

Igor Ružić rođen je u Rijeci, 06.04.1977. godine. Sušačku gimnaziju prirodoslovno matematičkog usmjerenja završava 1996, kada upisujem Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci gdje je 2003. godine i diplomirao pod vodstvom mentora prof.dr.sc. Nevenke Ožanić i mr.sc Josipa Rubinića. Diplomski rad: ANALIZA RAZINA MORA SJEVERNOJADRANSKOG PODRUČJA I NJIHOVA MEĐUODNOSA S POJAVAMA VISOKIH RAZINA VODA U VODOTOCIMA NA PRIMJERU UŠĆA DUBRAČINE rad je predložen za nagradu Hrvatskih voda u konkurenciji najboljih diplomskih radova iz hidrotehnike s područja Hrvatske, tijekom 2003./2004. kao najbolji takav rad na Građevinskom fakultetu Rijeka tijekom školske godine.

Nakon završenog fakulteta zapošljava se u Hrvatskim vodama, VGO Rijeka, gdje radi kao projektant suradnik na projektima regulacija vodotoka. Godine 2005. zapošljava se na Građevinskom fakultetu kao znanstveni novak na Zavodu za hidrotehniku i geotehniku. Godine 2006. upisuje Poslijediplomski doktorski studij Građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, smjer Hidrotehnika i geotehnika.

POPIS OBJEVLJENIH RADOVA

POPIS OBJEVLJENIH RADOVA

Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima

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: 555–565.

Benac, Č., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K., 2013. Fluviokarst and classical karst: Examples from the Dinarics (Krk Island, Northern Adriatic, Croatia). *Geomorphology*, 184: 64–73.

Poglavlja u knjizi

Benac, Č., Ružić, I., Ljutić, K., Ferenac-Grubišić, A., 2012. Ranjivost obala otoka Raba. Rapski zbornik II, Andrić, J., Lončarić, R., (Ur.). Zagreb: Ogranak Matice Hrvatske u Rabu, 235–243.

Benac, Č., Ružić, I., Žic, E., Gržančić, Ž., Kraljić, R., 2010. Ranjivost prirodnih žala u području Kvarnera. Prirodoslovna istraživanja riječkog područja II, Arko-Pijevac, M., Surina-Boštjan, Ž.(Ur.). Rijeka: Prirodoslovni muzej Rijeka, 97–107.

Znanstveni radovi u drugim časopisima

Krvavica, N., Mofardin, B., Ružić, I., Ožanić, N., 2012. Mjerenje i analiza zaslanjavanja na ušću Rječine. *Građevinar*, 64: 923–933.

Hinić, V., Rubinić, J., Vučković, I., Ružić, I., Gržetić, A., Volf, G., Ljubotina, M., Kvas, N., 2009. Analysis of interrelation between water quality and hydrologic conditions on a small karst catchment area of sinking watercourse Trbuhovica. *Earth and Environmental Science*, 4: 1–8.

Benac, Č., Ružić, I., Žic, E., 2007. Ranjivost obala u području Kvarnera. *Pomorski zbornik*, 44: 201–214.

Ružić, I., Rubinić, J., Ožanić, N., 2007. Modeliranje sintetičkih nizova podataka – primjer modeliranja mjesečnih količina oborina. *Građevinar*, 59: 665–673.

Radovi u postupku objavljivanja

Ružić, I., Benac, Č., Marović, I., Ilić, S., 2014. Stability assessment of coastal cliffs using digital imagery. *Acta Geotechnica Slovenica*. (prihvaćen za objavljivanje).

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom.

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*, Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Ur.). Switzerland: Springer International Publishing, 563–567.

Rubinić, A., Kukuljan, L., Glavaš, I., Rubinić, J., Ružić, I., 2013. Cave Explorations and Application Of Hydrological Model In Rašpor Cave (Istria, Croatia), 16th International congress of speleology, Proceedings, Volume 2, Filippi, M., Bosak, P. (Ur.). Brno: Czech Speleological Society and technology SPELEO2013 and in the co-operation with the International Union of Speleology, 369–374.

Krvavica, N., Ružić, I., Ožanić, N., Yamashiki, Y. Karabaić, I., Mofardin, B., Škoda, M. 2012. Daily variability of salinity and temperature in the Rječina estuary. Second workshop on the monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Ožanić, N., Arabanas, Ž., Mihalić S, Marui, H., Dragičević, N.(Ur.). Rijeka: University of Rijeka, 109-112.

Ožanić, N., Sušan, I., Ružić, I., Žic, E., Dragičević, N. 2012. Monitoring and analyses for the working group II (WG2) in Rijeka area in Croatian-Japanese project. Second workshop on the monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Ožanić, N., Arabanas, Ž., Mihalić S, Marui, H., Dragičević, N.(Ur.). Rijeka: University of Rijeka, 86-90.

Ružić, I., Benac, Č., 2012. Mošćenička draga investigating sight – hydrology and coastal processes. Second workshop on the monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Ožanić, N., Arabanas, Ž., Mihalić S, Marui, H., Dragičević, N.(Ur.). Rijeka: University of Rijeka, 91-104.

Žic, E., Bičanić, N., Koziara, T., Ožanić, N., Ružić, I., 2012. Application of the Solfec program for the Numerical Modeling of suspended sediment propagation in small torrents. Second workshop on the monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Ožanić, N., Arabanas, Ž., Mihalić S, Marui, H., Dragičević, N.(Ur.). Rijeka: University of Rijeka, 98-101.

Ružić, I., Benac, Č., Ilić, S., Sušan, I., Ljutić, K., 2011. Promjene korištenja zemljišta i regulacija bujičnih vodotoka: utjecaj na žala Liburnije i otoka Cresa. Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena, Biondić, D. , Holjević, D. , Tropan, Lj. (Ur.). Zagreb, Hrvatske vode, 772-781

Ružić, I., Sušan, I., Ožanić, N., Žic, E., 2011. Otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine na području Vinodolske doline. Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena, Biondić, D. , Holjević, D. , Tropan, Lj. (Ur.). Zagreb, Hrvatske vode, 226-237.

Oštrić, M., Horvat, B., Lončarić-Trinajstić, I., Benac, Č., Ružić, I., Rubinić, J., 2010. Research of water resources on karst island on the example of Krk island (Croatia). *BALWOIS 2010*. Morell, Marc (Ur.). Skopje: Institut de Recherche pour le Developpement - France , Hydrometeorological Service of Republic of Macedonia , Hydrobiological Institute of Ohrid, 269-269.

Benac, Č., Gržančić, Ž., Šišić, S., Ružić, I., 2008. Submerged Karst Phenomena in the Kvarner Area. *Proceedings of the 5th International ProGEO Symposium on Conservation of the Geological Heritage and ProGEO Working Group 1 Annual Meeting*. Marjanac, T. (Ur.). Zagreb, ProGEO-Croatia, 12-13.

Ružić, I., Feretić, S., Ožanić, N., Rubinić, J., 2008. Modeling Synthetic Data Series - Monthly Precipitation Using Pseudorandom Scalar Numbers. *Proceedings of BALWOIS conference*, Marc Morell (Ur.). Ohrid: Denona, 54-65.

Rubinić, J., Ružić, I., Mihalić, I., Oštrić, M., 2007. Analysis of changes in sedimentation process in the Boljunčica basin and the Plomin bay due to draining of the Čepić lake and building of storage reservoir Boljunčica - Istria (Croatia). Erosion and torrent control as a factor in sustainable river basin management, Kostadinov, S., Bruk, S., Walling, D., (Ur.). Beograd: Faculty of Forestry, Belgrade, 251-258.

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Sušan, I., Žic, E., Ružić, I., Dragičević, N., 2012. Hrvatsko-japanski projekt o poplavama i klizištima: znanstvene aktivnosti i primjena rezultata Zaštita od poplava u Hrvatskoj. Okrugli stol, Biondić, D., Holjević, D.,(Ur.). Vukovar: Hrvatske vode, 171-188.

Ožanić, N., Ružić, I., Sušan, I., Žic, E., 2012. Planed Hydrotechnical Research in Rijeka Area in Croatian-Japanese Project. Book of extended abstract of 1st Project Workshop: Risk identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia – International experience. Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H. (Ur.). Dubrovnik: Sveučilište u Zagrebu.

Benac, Č., Ružić, I., Dugonjić, S., Jardas, B., Jagodnik V., 2009. Podizanje morske razine i stabilnost obala u području Kvarnera. Hrvatsko geotehničko društvo, 5. Savjetovanje: Izvori rizika u geotehničkim zahvatima. Mulabdić, M. (Ur.). Osijek: Hrvatsko geotehničko društvo, 1-8.

Hinić, V., Rubinić, J., Vučković, I., Ružić, I., Gržetić, A., Volf, G., Ljubotina, M., Kvas, N., 2008. Analysis of mutual influences of water quality and hydrological conditios at small sinking stream Trbuhovica. XXIVth Conference of the Danubian Countries on the hydrological forecasting and Hydrological bases of water management. Brilly, M., Šraj, M. (Ur.). Ljubljana: Slovenian National Committee for the IHP UNESCO, 102-103.

Benac, Č., Rubinić, J., Ružić, I., Celija, I., 2007. Geomorfološka evolucija riječnih ušća na Istarskom poluotoku. 4. hrvatska konferencija o vodama. Hrvatske vode i Europska unija - izazovi i mogućnosti / Gereš, D. (Ur.). Zagreb: Hrvatske vode, 273-280.

Crmarčić, R., Juračić, M., Benac, Č., Ružić, I., 2007. Sedimentacija na ušću Dubračine i Novljanske ričine, Vinodolski kanal Zbornik radova. 4. hrvatska konferencija o vodama. Hrvatske vode i Europska unija - izazovi i mogućnosti / Gereš, D. (Ur.). Zagreb: Hrvatske vode, 297-302.

Rubinić, J., Travica, T., Ružić, I., Oštrić, M., 2007. Hidrologija krških priobalnih izvora s područja Novog Vinodolskog i Podvelebitskog primorja. 4. hrvatska konferencija o vodama. Hrvatske vode i Europska unija - izazovi i mogućnosti / Gereš, D. (Ur.). Zagreb: Hrvatske vode, 447-454.

Sažeci u zbornicima skupova

Benac, Č., Ružić, I., Vivoda, M., Dugonjić-Jovančević, S., Đomlija, P., 2013. Podložnost obalnih padina marinskoj eroziji i klizanju (jugozapadna obala otoka Krka). Sanacija, tehničko praćenje i održavanje u geotehnici, Matešić, L., Sokolić, I., (Ur.). Zagreb: Kerschoffset Zagreb d.o.o, 114-115.

Krvavica, N., Ružić, I., Ožanić, N., 2013. Analiza pouzdanosti meteorološkog X-band radara u mjerenju oborina na području Kvarnera. Zajednički temelji - Prvi skup mladih istraživača iz područja građevinarstva, arhitekture, geodezije i elektrotehnike – Split. Divić, V., Trogrlić, B., Gotovac, H., (Ur.). Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet Građevinarstva, arhitekture i geodezije, 35-36.

Krvavica, N., Ružić, I., Yamashiki, Y., Ožanić, N., 2013. Performance analysis of X-band radar rainfall measurements in the Kvarner region. Book of Abstracts: 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on 'Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia', Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D., (Ur.). Split: Sveučilište u Splitu, 51-51.

Ožanić, N., Sušanj, I., Žic, E., Krvavica, N., Ružić, I., Dragičević, N., V., Goran, Karleuša, B., 2013. Disaster Mitigation of Floods and Debris Flow at Rijeka Region through Croatian-Japanese Collaboration. Book of Abstracts: 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on 'Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia', Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D., (Ur.). Split: Sveučilište u Splitu, 43-45.

Ružić, I., Marović, I., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Kalajžić, D., Benac, Č., Ožanić, N., 2013. Application of 'Structure-from-Motion' photogrammetry for erosion processes monitoring, Mošćenička Draga example. Book of Abstracts: 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on 'Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia', Vlastelica, G., Andrić, I., Salvezani, D., (Ur.). Split: Sveučilište u Splitu, 49-50.

Žic, E., Sušanj, I., Ružić, I., Ožanić, N., Yamashiki, Y., 2013. Hydrologic Data Analysis for the Grohovo Landslide Area Landslide and flood hazard assesment. Abstract Proceedings. Arbanas, Mihalić, S. , Arbanas, Ž., (Ur.). Zagreb: City of Zagreb, Emergency Management Office, 29-29.

Krvavica, N., Ravlić, N., Ružić, I. 2012. Less aggressive/destructive concept of coastal interceptor construction in coastal sewerage systems. Book of Abstracts, 2nd Annual European Postgraduate Symposium, SDS 2012. Narodoslowsky, M., Schnitzer, H. (Ur.). Graz: Graz University of Techonology, 23-23.

Ružić, I., Benac, Č., 2012. Mošćenička Draga Investigating Sight – Hydrology and Coastal Processes. Second project workshop of the monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, book of abstracts. Ožanić, N., Arbanas, Ž., Mihalić, S., Marui, H. (Ur.). Rijeka: University of Rijeka, 27-27.

Ružić, I., 2010. Morphological characteristics of pocket beaches with significant terrestrial sediment input (Kvarner area). 6th UK Young coastal scientists and engineers conference. Simon R., (ur). London: UCL, London, 35-36.

Benac, Č., Ružić, I., Ilić, S., 2010. Morfodinamika minijaturnih žala (Kvarner, sjeveroistočni Jadran). 4. Hrvatski geološki kongres: knjiga sažetaka. Horvat, M.(Ur.). Zagreb: Hrvatski geološki institut, Zagreb. 384-385.

Benac, Č., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K., 2009. Fluviokarst vs. karst: examples from the Island of Krk, Northern Adriatic, Croatia. Sustainability of the karst environment- Dinaric karst and other karst regions. Abstract book / Bonacci, O., Župan, Ž. (Ur.). Gospić: Centre for Karst, 22-22.

Ilić, S., Ružić, I., Ruiz de Alegria, A., 2007. Evolution of the beach in front of a new seawall: cleveleys, UK Book of abstracts International Conference COASTAL STRUCTURES '07 / Franco, L., Roul, P., Tomasicchio, G.R., Lamberti, A. (Ur.). Venezia: Corila. 7B148-7B149.

Diplomski rad

Ružić, I., 2003. Analiza razina mora sjeverojadranskog područja i njihova međuodnosa s pojavama visokih razina voda u vodotocima na primjeru ušća Dubračine. Diplomski rad. Rijeka: Građevinski fakultet, 30.10. 2003, 128 str. Voditelj: Ožanić, N.