

Prostorno-vremenske promjene morfologije žala na prostoru poluotoka Metajna

Pedić, Gloria

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:162:534630>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-20**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij Primijenjena geografija (jednopedmetni)

Gloria Pedić

**Prostorno-vremenske promjene morfologije žala na
prostoru poluotoka Metajna**

Diplomski rad

Zadar, 2023.

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij Primijenjena geografija (jednopedmetni)

Prostorno-vremenske promjene morfologije žala na prostoru
poluotoka Metajna

Diplomski rad

Studentica:

Gloria Pedić

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Marić

Komentor:

Doc. dr. sc. Fran Domazetović

Zadar, 2023.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Gloria Pedić**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Prostorno-vremenske promjene morfologije žala na prostoru poluotoka Metajna** rezultat mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mogega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mogega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 18. srpanj 2023.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski rad

PROSTORNO-VREMENSKE PROMJENE MORFOLOGIJE ŽALA NA PROSTORU POLUOTOKA METAJNA

Gloria Pedić

Izvadak

Žala predstavljaju najosjetljiviji dio obalnog prostora koji pod utjecajem različitih prirodnih i antropogenih procesa doživljavaju intenzivne morfološke promjene. Obalna erozija globalni je problem koji utječe na evoluciju i morfologiju obalnih područja. Praćenje intenziteta morfoloških promjena ključno je za razumijevanje glavnih čimbenika obalne dinamike. Za otok Pag karakterističan je ogoljeli krški reljef, intenzivna erozija tla i brojne jaruge. Navedena obilježja čine otok Pag prikladnim za kontinuirano praćenje pojave i intenziteta obalne erozije. Područje istraživanja obuhvaća žalo Sušac smješteno na JZ dijelu poluotoka Metajna. Glavni cilj rada je kvantificirati prostorno-vremenske linearne, arealne i volumetrijske promjene žala Sušac. Višegodišnje promjene praćene su na temelju intervalnih DGU snimaka (1959. – 2020.) te na temelju UAV snimaka u razdoblju od šest mjeseci (2022. – 2023.). U radu su kvantificirane linearne i arealne promjene od 1959. do 2023. te šestomjesečne volumetrijske promjene. Utvrđeno je da žalo Sušac u promatranom razdoblju bilježi intenzivnu dinamiku obalne linije, ali ne bilježi linearno i arealno nestajanje.

Ključne riječi: geoprostorne tehnologije, obalna erozija, otok Pag, prostorno-vremenske promjene, žalo Sušac

Voditelj: doc. dr. sc. Ivan Marić, doc. dr. sc. Fran Domazetović (komentor)

Povjerenstvo: izv. prof. dr. sc. Marica Mamut, doc. dr. sc. Ivan Marić, izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg, doc. dr. sc. Denis Radoš

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zadar

Department of Geography

Graduation thesis

SPATIAL-TEMPORAL CHANGES IN THE MORPHOLOGY OF BEACHES IN THE AREA OF THE METAJNA PENINSULA

Gloria Pedić

Abstract

Beaches represent the most sensitive part of the coastal area which is experiencing intense morphological changes under the influence of various natural and anthropogenic processes. Coastal erosion is a global problem that affects the evolution and morphology of coastal areas. Monitoring the intensity of morphological changes is essential for understanding the main factors of coastal dynamics. The island of Pag is characterized by bare karst relief, intense soil erosion and numerous gullies. The aforementioned characteristics make the island of Pag suitable for continuous monitoring of the occurrence and intensity of coastal erosion. The research area includes the Sušac beach located on the SW part of the Metajna peninsula. The main aim of this research is to quantify the spatio-temporal linear, areal and volumetric changes of the Sušac beach. Monitoring of multi-year (1959. – 2020.) based on interval DGU images (1959 – 2020) and monitoring in a period of six months based on UAV images (2022. – 2023.). The paper quantified linear and areal changes from 1959 to 2023, as well as, six-month volumetric changes (2022. – 2023.). It was established that the Sušac beach in the observed period records intense dynamics of the coastline but does not record linear and areal disappearance.

Keywords: geospatial technologies, beach erosion, Pag Island, spatio-temporal changes, Sušac beach

Supervisor: Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Assistant Professor Fran Domazetović, PhD

Reviewers: Associate Profesor Marica Mamut, PhD, Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Associate Profesor Ante Šiljeg, PhD, Assistant Professor Denis Radoš, PhD

Predgovor

Žala predstavljaju najosjetljiviji dio obalnog područja koji je izložen složenim morfološkim promjenama. S obzirom na to da su morfološke promjene rezultat interakcije kompleksnih prirodnih i antropogenih procesa potrebna su točna i kontinuirana praćenja njihovih promjena. Utvrđivanje geografskih fenomena i rješavanje problemskih pitanja, kako bi se unaprijedile znanstvene spoznaje, temeljni su zadatci primijenjene geografije. Ubrzani razvoj geoprostornih tehnologija uzrokovao je njihovu široku primjenu u različitim znanstvenim područjima. Zbog sve veće potrebe za točnim i kontinuiranim podacima geomorfoloških karakteristika obalnih područja, geoprostorne tehnologije imaju ključnu ulogu u obalnoj geomorfologiji. Njihova primjena omogućuje detaljnu detekciju, kvantifikaciju i analizu intenziteta promjena uzrokovanih obalnom dinamikom. Točna detekcija i utvrđivanje trenda promjena važna je za rješavanje potencijalnih socijalnih, gospodarskih i ekoloških problema na lokalnoj i globalnoj razini.

U prvom redu željela bih se zahvaliti mentoru doc. dr. sc. Ivanu Mariću i komentoru doc. dr. sc. Franu Domazetoviću na velikoj pomoći, neprestanoj motivaciji, strpljenju, savjetima i kontinuiranom usmjeravanju koji su bili ključ za ostvarivanje diplomskog rada. Željela bih se zahvaliti za sva nova znanja i vještine koja sam stekla kroz provedena istraživanja pod njihovim stručnim vodstvom.

Željela bih se zahvaliti stručnom povjerenstvu na konstruktivnim kritikama koje su poboljšale kvalitetu ovog rada. Posebno bih se zahvalila izv. prof. dr. sc. Anti Šiljegu na prenesenom znanju, motivaciji i brojnim savjetima tijekom studiranja.

Hvala mojim dragim prijateljicama Eleni, Ivani, Petri, Katarini i Matei na savjetima, ohrabrivanju i podršci kroz pisanje diplomskog rada. Hvala svim ostalim prijateljicama i prijateljima na brojnim druženjima kojih ću se rado sjećati.

I na kraju, najveće hvala mojoj obitelji, majci Marijani, ocu Zvonimiru, bratu Dominiku i dečku Marinu čija ljubav, potpora i razumijevanje su mi uvelike pomogli u pisanju ovog diplomskog rada.

SADRŽAJ

Predgovor.....	3
1. UVOD.....	7
1.1. Objekt, ciljevi i svrha istraživanja	10
1.2. Hipoteze istraživanja	10
1.3. Pregled prethodnih istraživanja	11
1.4. Obuhvat i prirodno-geografske značajke istraživanog područja	15
2. TEORIJSKA OSNOVA.....	20
2.1. Obalna dinamika.....	20
2.1.1. Erozija	20
2.1.2. Transport sedimenta.....	21
2.1.3. Akumulacija materijala	21
2.2. Čimbenici obalne dinamike	22
2.2.1. Hidrodinamički čimbenici.....	22
2.2.2. Meteorološki čimbenici.....	24
2.2.3. Geološki čimbenici	26
2.2.4. Antropogeni čimbenici.....	26
2.3. Negativne posljedice obalne erozije	26
2.4. Metoda u praćenju morfoloških promjena žala	28
2.4.1. Tradicionalne metode.....	28
2.4.2. Primjena geoprostornih tehnologija u praćenju morfoloških promjena žala	28
2.4.2.1. Satelitske snimke	28
2.4.2.2. Fotogrametrija	29
2.4.2.2.1. Izravno georeferenciranje	30
2.4.2.2.3. LiDAR (Light Detection and Ranging).....	32
2.4.2.2.4. Video nadzor obalnih područja	33
2.5. Kvantitativne mjere za praćenje prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom dinamikom	34

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	36
3.1. Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave	36
3.1.1. Grubo georeferenciranje	37
3.1.2. Fino georeferenciranje intervalnih snimaka.....	39
3.1.3. Provjera točnosti georeferenciranih snimaka.....	42
3.1.4. Određivanje obalne linije	44
3.1.5. Analiza prostorno-vremenskih promjena u DSAS-u	45
3.2. Aerofotogrametrijska izmjera šireg područja istraživanja.....	47
3.3. Detekcija i kvantifikacija prostorno-vremenskih promjena	58
3.4. Izvođenje drenažne mreže	59
3.5. Analiza promjene površine i oblika obalnog područja žala Sušac	60
3.6. Prikupljanje i obrada meteoroloških podataka	61
3.6.1. Indeks zaklona od vjetra	61
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	62
4.1. Preliminarni rezultati	62
4.2. Rezultati procjene apsolutne ukupne točnosti intervalnih modela	63
4.2.1. Procjena točnosti georeferenciranih snimaka DGU-a.....	63
4.2.2. Procjena točnosti UAV intervalnih modela	65
4.3. DETEKTIRANE PROSTORNO-VREMENSKE PROMJENE	70
4.3.1. Modeli linearnog pomaka obalne linije (1959. – 2023.).....	70
4.3.2. Modeli površinskog (arealnog) pomaka	74
4.3.3. Volumetrijske promjene.....	77
4.4. OBRAĐENI METEOROLOŠKI PODACI.....	80
4.4.1. Meteorološki podaci DHMZ-a.....	80
4.4.2. Indeks zaklona od vjetra	82
5. RASPRAVA.....	

6. ZAKLJUČAK.....	91
7. LITERATURA.....	93
Popis grafičkih priloga	104
Popis tabličnih prikaza	105

1. UVOD

Obalna područja, posebice žala, dinamična su geomorfološka područja izložena složenim morfološkim promjenama (McLachlan i Erasmus, 2013; Łabuz, 2015; Laporte-Fauret, 2019; Mićunović i dr., 2021). Prema Bird (2008) morfologija žala definira se kao oblik žala, a rezultat je interakcije kompleksnih prirodnih procesa poput obalne erozije i akumulacije materijala s kopna (Stanica, 2010; McLachlan i Erasmus, 2013; Ford 2013; Łabuz, 2015; Casella i dr. 2016; Bheeroo i dr., 2016; Laporte-Fauret, 2019; Hossen 2023; URL 1) i antropogenih procesa (Casella i dr., 2016; Goksel i dr., 2020; Zanutta i dr., 2020). Intenzitet morfoloških promjena ovisi o čimbenicima obalne erozije, sastavu i obliku žala, akumulaciji materijala s kopna uslijed transporta povremenim površinskim tokovima i osipanjem materijala sa sipara i litica na strmim priobalnim padinama. Četiri su karakteristična razdoblja vezana za morfološke promjene žala: dugoročno (od nekoliko desetljeća do nekoliko stotina godina), srednjoročno ili međugodišnja varijabilnost, unutargodišnje ili sezonska varijabilnost i kratkoročno vezano za pojedinačne ekstremne događaje (Masselink i dr., 2001; Senechal i dr., 2020).

Danas su obalna područja populacijska žarišta (Šiljeg i dr., 2021), a to dokazuje činjenica da više od 50% svjetskog stanovništva živi unutar 100 km od mora (Toure i dr., 2019). Prirodni su resurs koji predstavlja veliki potencijal za ekonomski razvoj. Oduvijek su bila atraktivna područja za naseljavanje zbog svojih bogatih resursa i lokalizacije na granici između kopna i mora (Salameh i dr., 2019). Tijekom prošlosti žala su bila udaljenija od naseljenih zona, no razvojem kupališnog turizma raste i njihova atraktivnost. Kao posljedica antropogenih pritisaka (litoralizacija, apartmanizacija, urbanizacija, onečišćenje, izgradnja i poljoprivredno iskorištavanje) (Šiljeg i dr., 2021) i učinaka klimatskih promjena sve više dolazi do intenzivne obalne erozije koja uzrokuje intenzivne morfološke promjene žala (Salameh i dr., 2019) i promjene u obalnoj liniji (Arockiaraj i dr., 2018; Zanutta i dr., 2020). Iako ne postoji pouzdana globalna procjena obalne erozije u svijetu, smatra se da ona zahvaća preko 80% svjetskih žala (Quang i dr., 2021). Narušavaju se prirodni procesi i prirodni rast žala (Rajčić, Faivre i Buzjak, 2010). Prema Luijendijk (2018) 24% žala erodira, 28% se razvija, a 48% je stabilno. Prema Bird (2008) većina žala, čak 70% erodira dok Rajčić, Faivre i Buzjak (2010) navode da tek 10% žala bilježi rast, a oko 20% bilježe relativnu stabilnost. Proučavanje obalne erozije veliki je izazov za znanstvenike i upravitelje obalnih područja. Najranjivije su niske obale na kojima se nalaze žala.

Praćenje i detekcija morfoloških promjena žala (Toure i dr., 2019) i trendova obalne linije (Zanutta i dr., 2020) od velike je društvene i gospodarske važnosti (Toure i dr., 2019). Prisutna je sve veća potreba za točnim i ažurnim podacima o geomorfološkim karakteristikama obalnih područja (Salameh i dr., 2019) kako bi se na što učinkovitiji način upravljalo prirodnim resursima (Zanutta i dr., 2020). Prostorno-vremenske promjene čine osnovu za procjenu interakcije između prirodnih procesa i ljudskih aktivnosti. Prikupljanje podataka o topografiji i topografskim promjenama bitno je za proučavanje geomorfoloških procesa (Cook, 2016). Naime, za kvantitativnu analizu i detekciju morfoloških promjena potrebni su višegodišnji skupovi podataka (Asokan, 2019). Unutar analiza prostorno-vremenskih promjena ističe se potreba za prikupljanjem podataka o topografiji i topografskim promjenama (Cook, 2016). Odabir određene metode prikupljanja podataka i razina detaljnosti ovisi o svrsi istraživanja (Šiljeg i dr., 2018). Žala su podložna visokim morfodinamičnim aktivnostima te predstavljaju najosjetljiviji dio obalnog područja. Upravo zbog toga potrebna su točna i precizna sustavna mjerenja intenziteta promjena. Utvrđivanje intenziteta promjena važno je za razumijevanje njihovog stanja, sprečavanje negativnog utjecaja obalne erozije i upravljanje obalnim prostorom (Casella i dr., 2020).

Kvantitativna revolucija u geografiji, koja je započela 1960-ih godina, omogućila je brzo i precizno modeliranje pojava i procesa. Posljednjih godina sve veću ulogu u praćenju prostorno-vremenskih promjena morfologije žala imaju geoprostorne tehnologije. Sveobuhvatno, geoprostorne tehnologije mogu se definirati kao skup tehnologija (GIS¹, daljinska istraživanja, GNSS² sustavi) koje omogućuju modeliranje kompleksnih procesa i oblika različite razine detaljnosti ovisno o svrsi istraživanja (Marić, 2019). Razvijaju se velikom brzinom, postaju sve dostupnije te omogućavaju realističan prikaz složenih prirodnih elemenata i procesa. Daljinska istraživanja mogu se definirati kao proces prikupljanja podataka o objektima, stvarima i pojavama bez direktnog kontakta s njima (Cracknell, 2007). Napretkom u tehnologiji omogućilo se kontinuirano i učinkovito praćenje obalnih područja. Kako bi se zadovoljila sve veća potražnja za točnim i periodičnim praćenjem obalnih promjena, koriste se razne tehnike daljinske detekcije (Lin i dr., 2019; Shaw i dr., 2019). Daljinska istraživanja imaju značajnu ulogu u različitim geomorfološkim istraživanjima iz sfere obalne geomorfologije (Casella i dr., 2016; Turner i dr., 2016; Benassai i dr., 2017; Duo i dr., 2018; Vos i dr., 2019; Zanutta i dr., 2020), ali i iz sfere fluvijalnih, krških i glacijalnih procesa (Mićunović i dr., 2021).

¹ Geographic Information System

² Global Navigation Satellite System

Geomorfometrija (engl. *geomorphometry*) znanstvena je disciplina čiji je temeljni zadatak izrada i analiza digitalnog modela reljefa o kojem ovise izlazni rezultati (Hengl i Reuter, 2008; Šiljeg i dr, 2018). Fokusira se na matematičku, statističku i tehničku obradu podataka kako bi se kvantificirala zemljina topografija (Hengl i Reuter, 2008; Pike i dr., 2009).

S obzirom na to da je obalna erozija u većini slučajeva brz i kompleksan proces aerofotogrametrijska tehnika prikupljanja podataka ima sve veću primjenu za 3D rekonstrukciju obalnih područja (Guariglia i dr., 2006; Mancini i dr., 2013; Casella i dr., 2016; Turner i dr., 2016; Benassai i dr., 2017; Duo i dr., 2018; Zanutta i dr., 2020; Mićunović i dr., 2021), detekciju morfoloških promjena žala (Casella i dr., 2016; Zanutta i dr., 2020; Mićunović i dr., 2021), erozije obale, evolucije sustava dina na obali, erozije jaruga (Domazetović, 2021), erozije stjenovitih litica, itd. (Laporte-Fauret, 2019). Intervalna aerofotogrametrijska istraživanja koriste se za kvantifikaciju prostorno-vremenskih promjena žala uzrokovanih različitim čimbenicima (Westoby i dr., 2012; Turner i dr., 2016). Primjena bespilotnih letjelica (UAV) u obalnoj geomorfologiji bilježi drastičan rast (Mićunović i dr., 2021). UAV fotogrametrija osigurava brzo i učinkovito prikupljanje podataka i generiranje topografije visoke rezolucije koje je ključno za kvantifikaciju i detekciju promjena i geomorfoloških procesa (Cook, i dr. 2016; Mićunović i dr., 2021).

Iako su, duž istočne obale Jadranskog mora, žala oblikovana u plavinskom materijalu potopljenih krških dolina i jaruga (Pikelj i dr., 2018) te ih ima značajan broj, istraživanja morfoloških promjena žala na području RH još uvijek su rijetka. Još je rjeđa primjena geoprostornih tehnologija u proučavanju i analizi morfoloških promjena. Znanstveno istraživanje vezano za ovu temu aktualiziralo se tek zadnjih nekoliko godina (Rajčić, Faivre i Buzjak, 2010; Mićunović i Faivre, 2017; Ružić i dr., 2018; Benac i dr., 2021; Mićunović, 2021).

U kontekstu proučavanja obalne erozije te dinamike žala u RH potrebno je istaknuti prostor otoka Paga (Domazetović i dr., 2019). Otok Pag obilježavaju specifični reljefni oblici, klimatski uvjeti, oskudni vegetacijski pokrov, intenzivna erozija tla, brojne jaruge i vertikalno raščlanjen teren (Magaš, 2011; Domazetović, 2021). Prikladno je područje za kontinuirano praćenje pojave i intenziteta obalne erozije te osobito za testiranja primjene metode izravnog georeferenciranja na nepristupačnom, vertikalno raščlanjenom terenu (Glavačević i dr., 2023).

U ovom diplomskom radu analizirat će se prostorno-vremenske promjene morfologije žala na prostoru poluotoka Metajna (otok Pag). Za potrebe istraživanja diplomskog rada Državna geodetska uprava (DGU) ustupila je aerofotogrametrijske snimke za razdoblje (1959.

– 2020.) koji su omogućili dugoročno praćenje prostorno-vremenskih promjena žala Sušac, dok je za potrebe analize prostorno-vremenskih promjena u šestomjesečnom razdoblju provedeno intervalno snimanje bespilotnom letjelicom. Navedeni metodološki pristup po prvi put se koristi za istraživanja u obalnim područjima na području RH. Provedena aerofotogrametrijska istraživanja predstavljaju osnovu za daljnje praćenje promjene morfologije žala na prostoru poluotoka Metajna što će omogućiti bolje razumijevanje kompleksnih procesa i čimbenika koji utječu na intenzitet i učestalost promjene morfologije. S obzirom na to da na globalnoj razini žala predstavljaju osjetljivi dio obalnog prostora, korištena metodologija istraživanja moći će se primijeniti za buduća istraživanja vezana za proučavanje promjena morfologije žala, posebice u urbanim područjima, gdje su žala i najugroženija.

1.1. Objekt, ciljevi i svrha istraživanja

Objekt istraživanja su **prostorno-vremenske promjene morfologije žala Sušac**. Glavni cilj ovog diplomskog rada je **kvantifikacija prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom erozijom**. Na temelju definiranog glavnog cilja proizašlo je nekoliko sekundarnih ciljeva:

- 1) Kvantificirati linearne prostorno-vremenske promjene morfologije žala u razdoblju od 1959. do 2023. godine.
- 2) Kvantificirati linijski pomak te arealne i volumetrijske prostorno-vremenske promjene morfologije žala unutar šestomjesečnog razdoblja.
- 3) Testirati ukupnu točnost metode izravnog georeferenciranja na vertikalno raščlanjenom nepristupačnom terenu.

1.2. Hipoteze istraživanja

Iz definiranih ciljeva istraživanja proizašle su sljedeće hipoteze:

- **H1** Maksimalni linearni pomak obalne linije žala unutar 64 godišnjeg razdoblja (1959. – 2023.) bit će veći od 30 m.
- **H2** U proučavanom šestomjesečnom razdoblju odnos (količina) akumuliranog i odnesenog materijala bit će podjednak.
- **H3** Ukupna točnost modela dobivenih metodom izravnog georeferenciranja bit će ispod 30 cm.
- **H4** Maksimalni linearni pomak obalne linije žala unutar proučavanog šestomjesečnog razdoblja bit će veći od jednog metra.

1.3. Pregled prethodnih istraživanja

U nastavku je prikazan pregled prethodnih istraživanja koja su se koristila u ovom diplomskom radu. Zbog složenosti rada, istraživanja su podijeljena u četiri grupe: a) istraživanja u kojima se primjenjuje intervalna UAV fotogrametrija; b) radovi koji se bave kvantifikacijom prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom erozijom; c) istraživanja u kojima se primjenjuje metoda izravnog georeferenciranja; d) istraživanja morfoloških promjena žala u Hrvatskoj.

Dinamika prostorno-vremenskih promjena obalnih područja proučavana je u mnogim znanstvenim radovima. Obalnu dinamiku utvrđivali su **Benac (2016)**, **Bird (2008)**, **Mohamed Rashidi i dr. (2021)**, **Pikelj i dr. (2018)**, **Tatui i dr. (2019)** **Hinkel i dr. (2013)**. Čimbenike obalne erozije analiziraju **Caldwell (1967)**, **Bird (2008)**, **Munk i Traylor (1947)**, **Pavlopoulos i dr. (2009)**, **Dean i dr. (1976)**, **Fox i dr. (1978)**, **Kana (1977)**, **Labuz (2015)**, **Bryant (1985)**, **Nyandwi (2001)**. Negativne posljedice obalne erozije navode **Alexandrakis i dr. (2015)**, **de Andrade i dr. (2019)**, **Lin i dr. (2019)**, **Mohamed Rashidi i dr. (2021)**, **Sousa i dr. (2013)**. Kvantitativne pokazatelje linearnih prostorno-vremenskih promjena utvrđuju **Bheeroo i dr. (2016)**, **Ford (2013)**, **Goksel i dr. (2020)**, **Hossen (2023)**, **Salghuna i Bharathvaj (2015)**. Kvantitativne pokazatelje volumetrijskih prostorno-vremenskih promjena primjenjuju **James i dr. (2012)**, **Neverman i dr. (2016)**, **Carvalho i dr. (2020)**, **Heathfield i dr. (2016)**, **Farris i List (2007)**, **Jayson-Quashigah i dr. (2019)**, **Ma i dr. (2021)**. **Liu i dr. (2022)**, **Hughenoltz i dr. (2016)**, **Oniga i dr. (2020)**, **Dinkov i Kitev (2020)**, **Forlani i dr. (2019)**, **Padró i dr. (2019)**, **Stott i dr. (2020)**, **Zhang i dr. (2019)** primjenjuju i objašnjavaju metodu izravnog georeferenciranja u fotogrametriji.

a) istraživanja u kojima se primjenjuje intervalna UAV fotogrametrija

Casella i dr. (2016) primjenom UAV Mikroptera i kamerom Okto XL procjenjuju topografske promjene obale u regiji Ligurija (Italija). Generiranjem digitalnih modela površina utvrđuju značajne promjene u morfologiji obale. Analizom zaključuju su glavni uzroci promjena olujna razdoblja i ljudske aktivnosti.

Mancini i dr. (2013) uspoređuju UAV i TLS metodu prikupljanja podataka. Analiziraju apsolutnu i relativnu podudarnost između UAV i TLS metode na temelju gustog oblaka točaka. Ističu prosječnu razliku u vertikalnim vrijednostima od 0.05 m (RMS = 0,011).

Zanutta i dr. (2020) proučavaju fotogrametrijske i GNSS tehnike za istraživanje morfoloških promjena u obalnim područjima. Poseban naglasak stavljaju na tehnike kinematičkog pozicioniranja PPK, RTK i NRTK. Utvrđuju da promjene na obali ne slijede stalnu pozitivnu ili negativnu stopu jer su uzrokovane prije svega, ljudskim aktivnostima.

b) kvantifikacija prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom erozijom

Bheeroo i dr. (2016) proučavaju promjenu obalne linije duž žala (Trou aux Biches-Mont Choisy, Mauricijus). Primjenjuju DSAS 4.5. ekstenziju za analizu linearnih pomaka obalne linije. Mjerenjem stopa promjene obalne linije zaključuju veliki rizik od erozije (-1,75 do -0,03 m/god) na SI i JZ dijelu područja istraživanja. Najmanja stopa erozije zabilježena je na SSZ i JJI dijelu kao rezultat koraljnog grebena koji smanjuje energiju i djelovanje valova i time umanjuje intenzitet obalne erozije.

Ford (2013) analizira procese erozije i akumulacije na karipskoj obali Kostarike. Ističe da se šest, od osam proučavanih lokacija koje bilježe značajnu eroziju, nalazi u zaštićenim zonama. Utvrdio je da je temeljni čimbenik koji utječe na morfologiju obale u Sjevernim Karibima nanos riječnog sedimenta. Također, utvrđuje da je uzrok promjena potres iz 1991. godine koji je uvjetovao značajne promjene u Južnim Karibima.

Goksel i dr. (2020) analiziraju morfološke promjene obale duž crnomorske obale Istanbula u razdoblju (2009. – 2016.). Primjenjuju geoprostorne tehnologije i utvrđuju da je najznačajnija promjena zabilježena na europskoj strani grada. Razlog tome je utjecaj antropogenih čimbenika i neposredna blizina građevinskog područja.

Hossen (2023) primjenjuje geoprostorne tehnologije i kvantitativne pokazatelje prostorno-vremenskih promjena obalne linije na koraljnom otoku (Saint Martin, Bangladeš). Morfologija obale kontinuirano se mijenja kao posljedica prirodne i umjetne erozije i akumulacije. Za utvrđivanje intenziteta promjena koristi različite kvantitativne pokazatelje: stopu krajnje točke (EPR), stopu linearne regresije (LRR) i neto kretanje obale (NSM). Ističe da 55% transekata, postavljenih u intervalima od 50 m, bilježe eroziju obale. Duž istraživanog područja intenzitet erozije značajno se izmjenjuje. Najintenzivnija erozija zabilježena je u područjima utjecaja plimnih valova. Maksimalna stopa prirasta (4,81 m/god) je na području koji štiti koraljni greben.

c) istraživanja u kojima se primjenjuje metoda izravnog georeferenciranja

Liu i dr. (2022) u istraživanju testiraju točnost metode izravnog georeferenciranja bespilotnih letjelica potpomognute GNSS-om. U istraživanju poseban naglasak stavljaju na broj i distribuciju GCP-ova. Koriste bespilotnu letjelicu *FEIMA D2000*. Za analizu točnosti koriste metriku RMSE i M3C2. Postižu vertikalnu točnost od 0,087 m (RMSE) i horizontalnu 0,041 m (RMSE). Ukazuju na potrebu pravilne distribucije GCP-ova i predlažu korištenje barem jednog GCP-a blizu područja istraživanja.

Hughenoltz i dr. (2016) uspoređuju pozicijsku točnost korištenjem dva skoro identična UAV-a. Temeljna razlika je što jedan UAV ima GNSS RTK prijemnik dok drugi koristi GNSS prijemnik bez RTK. Za usporedbu koriste dva DMR-a nastala izravnim georeferenciranjem. Horizontalna i vertikalna točnost poboljšana je GNSS RTK prijemnikom dok je horizontalna točnost u oba slučaja bila gotovo jednaka. Rezultati ukazuju na potrebe korištenja GCP-ova za topografska mjerenja koja zahtijevaju veću točnost.

Oniga i dr. (2020) primjenom DJI Phantom 3 Standard ispituju optimalan broj i distribuciju GCP-ova u procesu UAV fotogrametrije. Prikupljeni podaci obrađeni su u softveru 3DF Zephyr s procjenom točnosti u procesu neizravnog georeferenciranja. U radu daju pregled broja i distribucije GCP-ova potrebnih za neizravno georeferenciranje s najmanjim utjecajem na izlazne rezultate.

Stott i dr. (2020) pomoću DJI Phantom 4RTK UAV testiraju pogreške CP-a kroz sedam scenarija koji se odnose na različite konfiguracije GCP-ova. Rezultati kontrolnih točaka nisu pokazali vertikalne sustavne pogreške na temelju čega zaključuju da OT nisu potrebne za topografsko modeliranje u kilometarskom mjerilu.

Zhang i dr. (2019) u radu ispituju pozicijsku točnost i ponovljivost digitalnih modela površine generiranih UAV-PPK-SfM procesom. Za potrebe istraživanja izveli su više misija leta s dva različita sustava kamera/UAV: jeftini mikro UAV i profesionalni UAV s DSLR kamerom. Dolaze do zaključka da PPK rješenje pruža istu točnost (MAE: 0,02m; RMSE; 0,03m) kao i korištenjem GCP-ova.

Glavačević i dr. (2023) testiraju tri načina RTK pozicioniranja koristeći sustav Matrice 210 RTK V2 i mobilnu stanicu DRTK 2. Ispitane su metode: (a) D-RTK 2 kao bazna stanica; (b) D-RTK 2 korekcija s baznom stanicom treće strane; (c) mrežni NTRIP ispravci. Procjena apsolutne točnosti svakog načina RTK pozicioniranja napravljena je pomoću 10 kontrolnih točaka (CP). Izračunom ukupnog RMSE utvrđeno je da (b) i (c) RTK načini pozicioniranja imaju centimetarsku razinu točnosti (<10 cm).

d) Istraživanja morfoloških promjena žala u Hrvatskoj

Mićunović i dr. (2021) istražuju kvalitetu i točnost podataka daljinskog istraživanja, na primjeru žala, kroz tri različita skupa podataka. Uspoređuju DOF Državne geodetske uprave, satelitske snimke s Google Earth-a i ortofoto snimke generirane pomoću UAV-a. Dolaze do nekoliko zaključaka: mjerenje linearnih značajka je točnije od mjerenja temeljena na poligonima što uvjetuje veće pogreške kod žala s manjom površinom. Nadalje, morfološka

složenost žala utječe na točnost mjerenja. Ističu mogućnost korištenja navedenih podataka za precizna istraživanja promjena žala.

Rajčić, Faivre i Buzjak (2010) u radu analiziraju morfološke promjene žala u uvalama Rašćine, Juto i Kutleša u razdoblju od četrdeset godina. Istražuju osnovne prirodne čimbenike njihova oblikovanja. U radu poseban naglasak stavljaju na antropogene modifikacije koje su uzrokovale progradaciju i eroziju pojedinih dijelova žala.

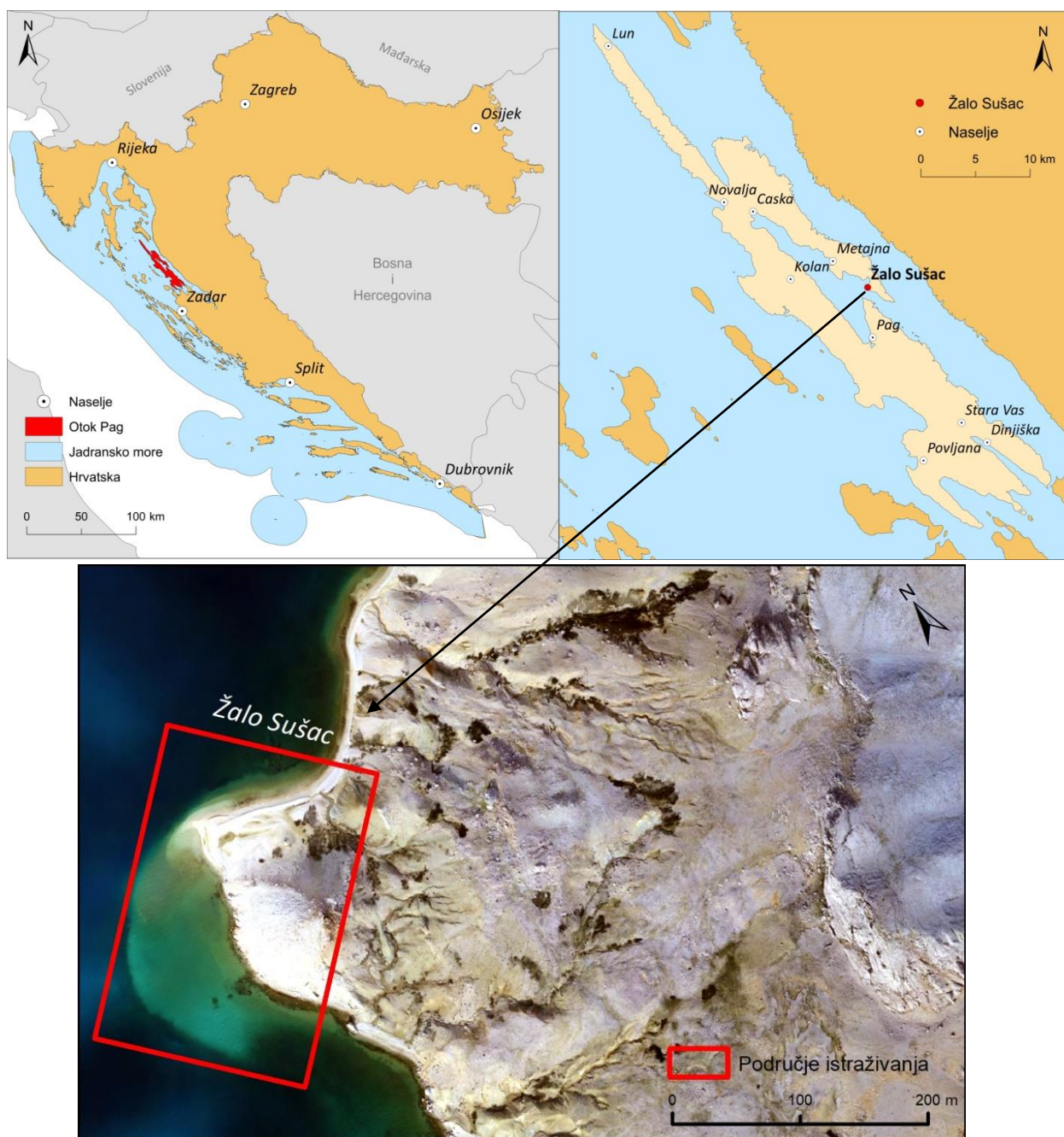
Ružić i dr. (2018) u radu su istraživali geomorfološke promjene minijaturnog žala, duljine oko 70 m, u uvali Uboka, na zapadnoj obali Riječkog zaljeva. Proveli su 11 mjerenja topografije žala metodom Structure-from-Motion (SfM) fotogrametrije pomoću koje su generirani trodimenzionalni oblaci točaka visoke preciznosti i razlučivosti. Rezultati su pokazali da je djelovanje valova i istjecanje površinskih i podzemnih voda glavni uzrok erozije žala. Nakon prestanka istjecanja uočen je brz oporavak žala i vraćanje na prvobitni oblik.

Mićunović i Faivre (2017) primjenom metode ponovljene fotografije, snimanjem bespilotnom letjelicom i terenskim istraživanjem proučavaju geomorfološki sustav jaruga i žala Zogon u Svetoj Nedjelji na južnoj strani otoka Hvara. Temeljni cilj istraživanja bio je diferencijacija prirodnih i antropogenih čimbenika koji utječu na intenzitet promjena.

Benac i dr. (2021) u radu analiziraju ranjivost obala otoka Krka izračunavanjem indeksa ranjivost obale (CVI). Na temelju pet parametara (geološka građa, nagib, značajna visina vala, izloženost obale plavljenju i postojanje i utjecaj žala) utvrđuju značajna odstupanja CVI-a duž obale otoka. Potvrđena je visoka ranjivost obalnih naselja na otoku Krku, prvenstveno zbog izloženosti plavljenju. Pokazalo se da je potrebno stvoriti baze podataka na temelju dovoljno točnih podataka o reljefu kopna i podmorja kako bi se moglo pravovremeno reagirati.

1.4. Obuhvat i prirodno-geografske značajke istraživanog područja

Otok Pag peti je po veličini otok u Hrvatskoj s ukupnom površinom od 284,18 km². Prema uvjetno-homogenoj regionalizaciji dio je sjevernodalmatinske i kvarnerske otočne skupine (Slika 1A).



Slika 1. (A) Geografski smještaj otoka Paga u RH; (B) geografski smještaj žala Sušac na poluotoku Metajna; (C) visokorezolucijski DOF žala

Na sjevernom dijelu omeđen je Paškim kanalom, na južnom dijelu Ninskim zaljevom, na istočnom Velebitskim kanalom i na zapadnom Maunskim kanalom. Otok Pag pripada

skupni najrazvedenijih hrvatskih otoka s obalnom linijom dugom 302,47 km i indeksom razvedenosti (Ir) 4,50 (Magaš, 2011).

Otokom Pagom izmjenjuju se antiklinalni i sinklinalni nizovi. Geološku osnovu antiklinalnih dijelova čine rudistni i foraminiferski vapnenci iz razdoblja gornje krede i eocena dok sinklinalnih čine eluvijalne, aluvijalne i flišne naslage (Magaš, 2011; Domazetović, 2021). Karbonatna građa i pružanje naslaga u smjeru SI-JZ odrazile su se na reljefna obilježja otoka (Magaš, 2011).

Klimatske značajke otoka odrazile su se na biljni pokrov, raznolike krške oblike, karakteristike tla i velik intenzitet erozije tla (Domazetović, 2021). Otok Pag prijelazni je prostor između sredozemne klime s vrućim ljetom (Csa) i umjereno tople vlažne klime (Cfa) (Magaš, 2011). Prosječna godišnja temperatura zraka iznosi 15,5°C dok prosječna godišnja količina padalina iznosi između 1050 i 1106 mm. Izražena je sezonalnost oborina sa zimskim maksimumom (siječanj – veljača) i jesenskim maksimumom (rujan – studeni) (Magaš, 2011; Domazetović, 2021). Otok Pag prepoznatljiv je po intenzivnoj vjetrovitosti. Dominantan vjetar je olujna bura koja puše s Velebita iz smjera SI. Najintenzivnija je u zimskim mjesecima dok je u ljetnim mjesecima po pravilu slabija i rjeđa. Ponekad je prisutna u proljetnim i jesenskim mjesecima što se negativno odražava na poljodjelske kulture (Magaš, 2011).

Poluotok Metajna smješten je na SI strani otoka Paga (Slika 1B). Najzabačeniji je dio otoka Paga do kojeg se može doći samo pješačkim stazama. Poluotok Metajnu karakterizira ogoljeli krš i prisutnost velikih jaruga (Šiljeg i dr, 2021). Uže područje istraživanja obuhvaća žalo Sušac na JZ dijelu poluotoka Metajna (Slika 1C). Obalne padine ispresijecane su brojnim jarugama nastale u dubokim flišnim naslagama (Slika 2). Erozijske jaruge i formirani tokovi u naslagama fliša (Domazetović, 2021) prirodno prihranjuju žalo erodiranim materijalom.

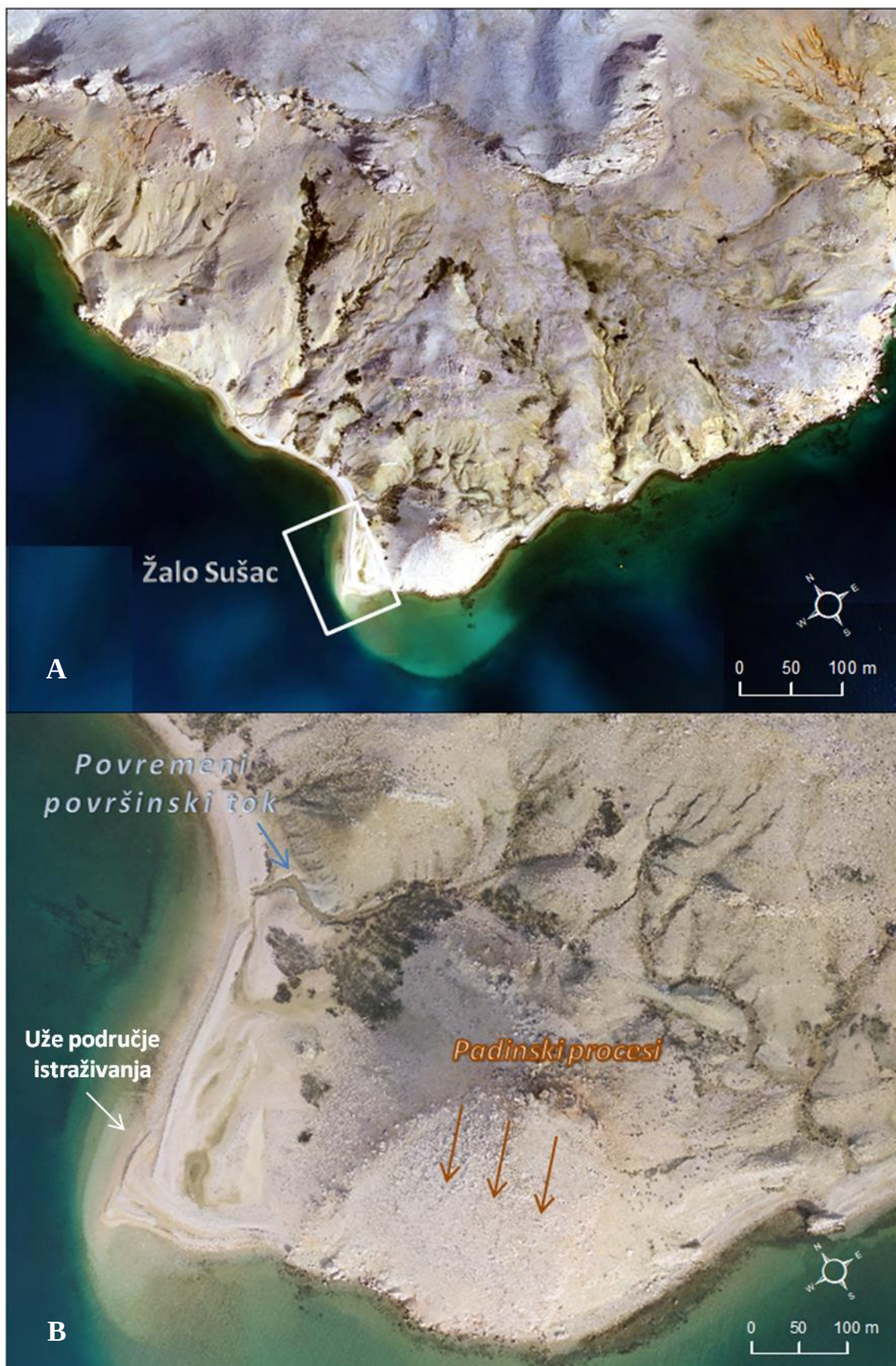


Slika 2. Jaruga nastala na flišnim naslagama poluotoka Metajna

Žalo Sušac odabrano je kao područje istraživanja iz nekoliko razloga. Prije svega, na poluotoku Metajna ističu se brojna žala i erozijski oblici. Zatim, preliminarnim istraživanjem, pomoću softvera Google Earth, zabilježen je veći intenzitet promjena nego na drugim žalima. Nadalje, homogenost materijala koji čini žalo, izostanak povremenih tokova i padinskih procesa, koji izravno prihranjuju žalo i time remete dinamiku promjena morfologije. Zbog izbočene lokacije, vrh rta Sušac, žalo je izloženo vjetru, valovima i morskim strujama. Iako je otok Pag atraktivna turistička destinacija i žala su popularna među turistima, žalo se nalazi na zabačenom dijelu poluotoka Metajna zbog čega nema nikakvih antropogenih procesa koji bi mogli remetiti prirodnu dinamiku promjena morfologije žala.

Uža granica područja istraživanja unutar kojega su praćene prostorno-vremenske promjene morfologije žala određena je kombinacijom preliminarnog istraživanja provedenog uz pomoć snimka s Google Earth-a, prvog terenskog istraživanja te analize visokorezolucijskog DOF-a (Slika 3A). Iako na prostoru područja istraživanja postoji nekoliko odvojenih žala, različitih karakteristika (dimenzije, intenzitet promjena, položaj, tip materijala, itd.), u sklopu ovog rada analizirane su samo promjene na prostoru žala Sušac. Žalo Sušac ističe se u odnosu na druga obližnja žala prema intenzitetu uočenih promjena, specifičnom izbočenom položaju u odnosu na druga obližnja žala te po homogenosti materijala od kojega je žalo sačinjeno. Nadalje, pri određivanju granice odabranog područja istraživanja nastojao se umanjiti utjecaj različitih kopnenih procesa na intenzitet morfoloških

promjena proučavanog žala. U prvom redu nastojao se ukloniti utjecaj prinosa materijala povremenim površinskim tokovima, koji za vrijeme intenzivnih oborina utječu na sedimentaciju materijala erodiranog s kopna. Zbog toga je granica odabranog područja istraživanja u SI dijelu određena lokacijom izraženog povremenog toka, koji utječe na preoblikovanje morfologije tog dijela žala. Također, u južnom dijelu žala nastojao se ukloniti utjecaj padinskih procesa sa strmih padina s kojih se postepeno materijal osipa na prostor žala, utječući pri tome na njegovu morfologiju i litološki sastav (Slika 3B).



Slika 3. (A) Šire područje istraživanja i (B) granice užeg područja istraživanja

2. TEORIJSKA OSNOVA

2.1. Obalna dinamika

Žalo (engl. *beach*) definira se kao geomorfološki oblik građen od rastresitog sedimenta različite veličine poput: pijeska, šljunka, oblutaka do većih blokova. Sedimenti žala su nekohezivni međuspremnici koji apsorbiraju, reflektiraju i raspršuju energiju valova (Bird, 2008, URL 7). Žalom Sušac dominira sitni pijesak (Slika 4). Također, prisutan je šljunak i veći kameni blokovi koji su padinskim procesima dospjeli na žalo.



Slika 4. Sediment na žalu Sušac

Žala predstavljaju dinamične morfološke oblike čija je morfologija uvjetovana kompleksnim procesima obalne dinamike. Intenzitet obalne dinamike ovisi o morfodinamičnim čimbenicima i kopnenim procesima. Žalo se oblikuje i modificira erodiranjem, transportom i akumulacijom sedimenta koji se javljaju kao posljedica djelovanja morfodinamičkih čimbenika i obalnih procesa (Bird, 2008). U nastavku su pojašnjeni značajniji procesi obalne dinamike.

2.1.1. Erozijska

Erozijska (engl. *erosion*) je egzogeni proces koji podrazumijeva odvajanje, pokretanje i transport čestica djelovanjem različitih agensa poput vode, vjetra i leda. Prema uzročnicima erozijska se dijeli na: obalnu erozijsku, erozijsku tla, glacijalnu erozijsku, eolsku erozijsku i riječnu erozijsku (Benac, 2016). Za obalna područja karakteristična je obalna erozijska. Obalna erozijska (engl. *beach erosion*) egzogeni je proces koji podrazumijeva povlačenje ili snižavanje obalnog prostora, odnosno postupno trošenje i nestajanje materijala s obale uzrokovano

različitim prirodnim i antropogenim čimbenicima (Hinkel i dr., 2013; Benac, 2016; Pikelj i dr., 2018; Tatui i dr., 2019; Mohamed Rashidi i dr., 2021; URL1). Žalo je erodirano kada gubi više sedimenta nego što dobiva iz različitih izvora: rijeka, erodiranih hridi i priobalja, nanosa sedimenta s morskog dna, vjetrom nošenog sedimenta, ljudske aktivnosti itd. (Bird, 2008; de Andrade i dr., 2019). Način i intenzitet erozije prvenstveno ovisi o početnom morfološkom stanju žala i intenzitetu čimbenika koji pokreću obalnu eroziju (Sousa i dr., 2013; Benac, 2016; Senechal i dr., 2020). Destruktivnim djelovanjem valova dolazi do erodiranja žala uklanjanjem pijeska i sedimenta s obale (abrazija). Javlja se kada energija valova premašuje sposobnost sedimenta da se odupre kretanju pri čemu dolazi do gubitka materijala i smanjenja volumena žala (Dornbusch i dr., 2002; Limber i Murray, 2015; Benac, 2016). Abrazijski proces je selektivan jer ovisi o geološkoj građi, otpornosti sedimenta u litoralnoj zoni i maritimnim karakteristikama istraživanih područja. Obalna erozija odnosi se i na druge tipove erozije: koraziju (mehaničko trošenje uz pomoć erodiranog materijala), koroziju (kemijsko djelovanje vode) i bioeroziju (erozija nastala djelovanjem organizama na obalnom rubu). Nedostatak vegetacije, vrsta stijena i intenzitet oborina temeljni su uzroci intenzivne erozije tla (engl. *soil erosion*). Širi prostor područja istraživanja podložan je intenzivnoj eroziji tla te je erozija tla neizostavan proces u praćenju promjena žala. Materijal erodiran erozijom jaruga transportira se na žalo.

2.1.2. Transport sedimenta

Transport sedimenta odvija se djelovanjem hidrodinamičkih čimbenika i kopnenih procesa. Djelovanjem valova i morskih struja sediment se pomiče duž žala što dovodi do njegove preraspodjele. Kretanje sedimenta može biti paralelno s obalom ili prema obali. Također, padinski procesi imaju važnu ulogu u transportu sedimenta pri čemu se prenosi slobodni stijenski materijal od mjesta trošenja na topografski višem terenu do akumulacije na topografski nižem terenu. Karakterističan reljefni oblik koji se pojavljuje u čvrstoj stijeni je klif ili strmace dok se u podnožju formira marinska terasa s abrazijskim i akumulacijskom dijelom (Benac, 2016).

2.1.3. Akumulacija materijala

Akumulacija materijala javlja se kada dođe do smanjenja energije valova ili do promjene konfiguracije obale. Sediment nošen valovima, strujama, površinskim tokovima taloži se i nakuplja na žalu. Na taj način akumulacija sedimenta pridonosi rastu i održavanju žala.

2.2. Čimbenici obalne dinamike

Čimbenici, pokretači obalne dinamike, najčešće se klasificiraju u hidrodinamičke, geološke, geomorfološke, meteorološke, biološke i antropogene čimbenike (Bird, 2008; Łabuz, 2015). U nastavku su pojašnjeni čimbenici koji utječu na pojavnost i intenzitet obalne dinamike.

2.2.1. Hidrodinamički čimbenici

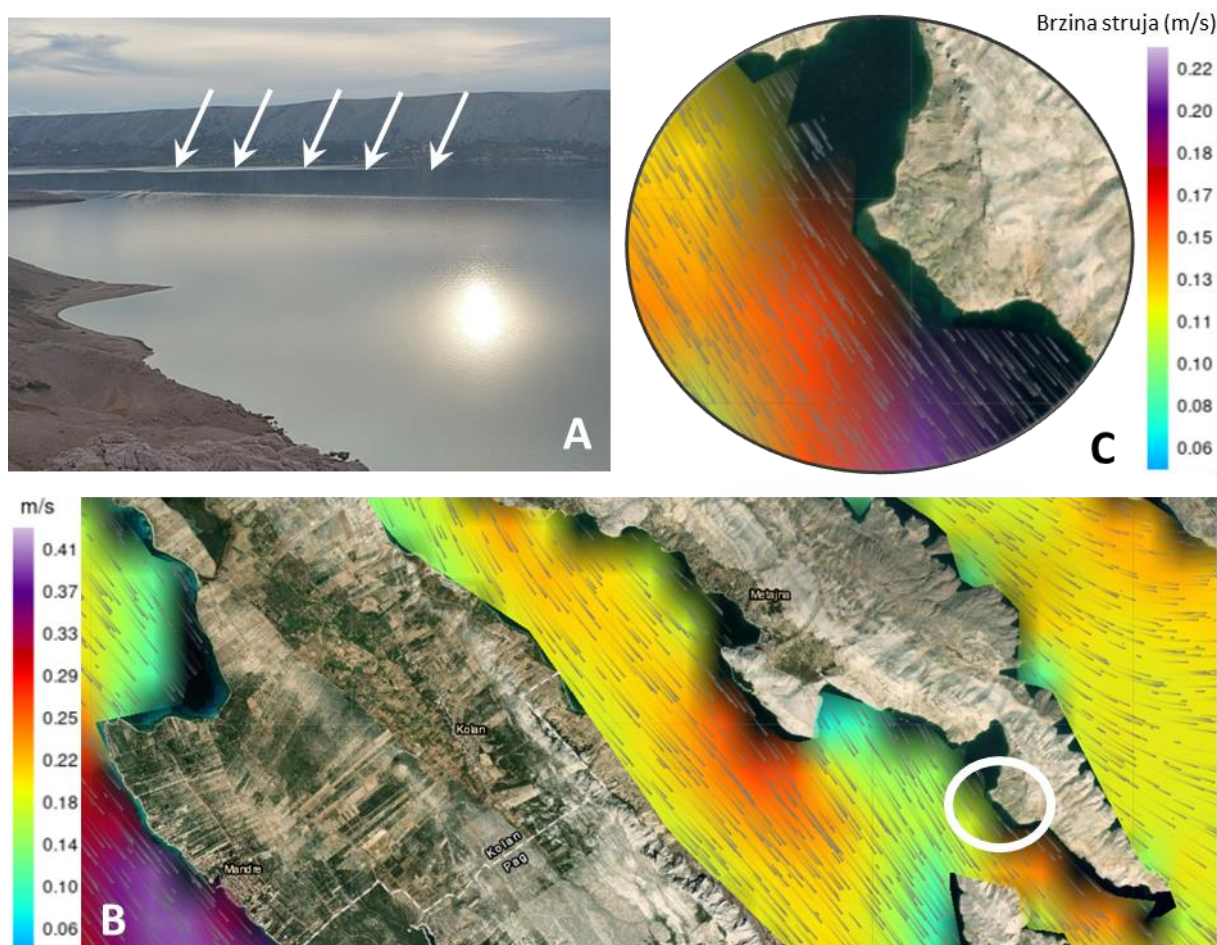
Valovi (engl. *waves*) jedan je od glavnih hidrodinamičkih čimbenika koji utječe na intenzitet obalne erozije. Val nastaje djelovanjem sile trenja između vjetra i vodene površine pri čemu dolazi do prijenosa energije iz vjetra u vodu (URL 2). Valovi ulaskom u plitku vodu transformiraju se na više načina ovisno o karakteristikama morskog dna. Kao rezultat toga duž obale pojavljuju se valovi različitih visina loma vala. Prema Caldwell (1967) za određivanje intenziteta obalne erozije ključni su: period, duljina, visina i strmina vala. Lom vala odgovoran je za akumulaciju ili uklanjanje sedimenata s dna (Munk i Traylor, 1947; Bird, 2008). Stoga, destruktivni valovi (kratke valne duljine i visoke frekvencije), kao što su olujni valovi, odvlače sediment sa žala koji se potom taloži u dubokoj vodi (Caldwell, 1967; URL 1). Konstruktivni valovi (duge valne duljine i niske frekvencije) guraju sediment prema žalu koji se potom akumulira (Caldwell, 1967; URL 1). Intenzitet valova ovisi o klimatskim uvjetima obalnih područja (Bird, 2008).

Olujni valovi (engl. *storm waves*) destruktivni su valovi koji nastaju djelovanjem vjetra velikog intenziteta. Značajan su modifikator morfologije žala. Obalna područja zaštićena grebenima i rtovima, koji nemaju izlaz na ocean, primjerice Jadransko more, primaju valove oslabljenog intenziteta. Tu su prisutni valovi koje stvara lokalni vjetar (Bird, 2008; Kormar, 2018; URL 1). Brojni su autori istraživali morfološke promjene žala u razdoblju olujnih valova (Dean i dr., 1976; Fox i dr., 1978; Russell, 1993; Zhang i dr., 2001). Olujni valovi uzrokuju sezonske varijacije profila žala. Nakupljanje materijala u obliku obalnih dina karakteristično je za olujne valove (Slika 4). Na prvom terenskom istraživanju uočeno je malo formirano jezero na žalu (Slika 4). Voda u jezeru je slana jer se radi o vodi koja je za olujnih nevremena „zarobljena“ u depresiji koju je formirao akumulirani materijal. U mirnijim razdobljima, kada nema olujnih nevremena voda isparava i ostaje sol na rubovima jezera. Na terenskom istraživanju u lipnju jezero je bilo isušeno te su se jasno vidjeli tragovi soli (Slika 5).



Slika 5. Manji akumulacijski oblici na žalu

Morske struje (engl. *currents*) važan su hidrodinamički čimbenik koji utječe na morfološke promjene žala. Kontinuirana strujanja direktno utječu na intenzitet transporta sedimenta (Caldwell, 1967; Russell, 1993). Prema Bird (2008) morske struje dijele se na: valovima stvorene struje, vjetrom generirane struje, plimne struje i oceanske struje. Plimne struje i vjetrom nastale struje mogu biti toliko jake da pokreću pijesak i šljunak s morskog dna pri čemu se materijal nanosi na žalo (Slika 6B). Za transport sedimenta duž obalnih područja najvažnije su obalne struje (Slika 6C). Obalne struje (engl. *coastal currents*) nastaju približavanjem valova obali (Slika 6A). Djelovanjem obalnih struja sediment se prenosi prema obalnim područjima ili prema dubljim dijelovima ovisno o karakteristikama valova. Važan faktor u nastajanju obalnih struja je vjetar koji odnosi površinsku vodenu masu prema smjeru u kojem puše (Pavlopoulos i dr., 2009).



Slika 6. A) Uočeno kretanje morske struje na terenskom istraživanju; B) primjer kretanja morskih struja za šire područje poluotoka Metajna; C) uži prostor istraživanja

Izvor: <https://adri.cmcc.it/>

Plima i oseka uzrokuju promjenu morske razine duž obale i plimnu struju. Učinak plime i oseke na morfološke promjene žala može biti privremeni ili ciklički (Bird, 2008). Za Jadransko more karakteristične su poludnevne morske mijene. Tijekom Mjesečevog dana izmjenjuju se dvije visoke i dvije niske vode (Benac i dr., 2008). Amplituda morskih mijena odnosi se na razliku između prosječne razine mora i najviše točke koju plima dosegne, bez obzira je li riječ o visokoj (engl. *high water* - HW) ili niskoj vodi (engl. *low water* - LW). Prosječna amplituda morskih mijena iznosi ± 29 cm (URL 3). Za vrijeme puhanja bure i visokog tlaka zraka razina mora može biti značajno niža.

2.2.2. Meteorološki čimbenici

Vjetar (engl. *wind*) klimatski je čimbenik koji izravno i neizravno (stvarajući valove i struje) utječe na intenzitet obalne erozije. Djelovanjem vjetra nastaju ili se modificiraju različiti reljefni oblici. Snažni vjetar odnosi sitnozrnati sediment: pijesak, mulj i glinu pri čemu dolazi do smanjenja površine i volumena žala. Pijesak odnesen sa žala akumulira se u

zoni iznad razine plime i formira dinu. Vjetar uzrokuje kretanje stijenskog materijala na kopnu duž obale. Za vrijeme oseke djelovanjem vjetra ubrzava se proces isparavanja i isušivanja obalne platforme (Dean i dr., 1976; Kana, 1977; Fox i dr., 1978; Bird, 2008; Labuz, 2015). Dominantan vjetar na otoku Pagu je bura koji puše sa SI. Najintenzivnija je u zimskom dijelu godinu kada puše orkanskom jačinom. Olujni udari bure izravno utječu na obalnu eroziju odnoseći čestice sedimenta sa žala dok neizravno utječe stvarajući olujne valove.

Oborine (engl. *rainfall*) odnosno količina oborina važan su klimatski čimbenik koji utječe na intenzitet obalne erozije. Velika količina oborina uzrokuje porast razine vode na žalu i uzrokuje povlačenje sedimenta (Bryant, 1985). Tijekom razdoblja obilnih oborina formiraju se bujični tokovi koji odnose sediment žala (Ružić i dr., 2018). Oborine na otoku Pagu vezane su uz ciklonalnu buru i južne vjetrove. Najveća količina oborina je u zimskim mjesecima s maksimumom u studenom. Zbog specifične krške hidrologije, na kontaktu vapnenačkih stijena i flišnih naslaga, prisutni su povremeni izvori i kraći površinski tokovi (Slika 7).



Slika 7. Povremeni površinski tokovi

2.2.3. Geološki čimbenici

Za proučavanje intenziteta erozije tla i obalne erozije važne su geološke, litološke i pedološke značajke područja istraživanja. Otok Pag pripada tektonskoj jedinici Ravni kotari. Obalna područja oblikovana su gornjopleistocensko-holocenskim izdizanjem morske razine. Litološku osnovu čine vapnenci, dolomiti, flišne i padinske naslage (Lončar, 2009). Zbog logističkih razloga i nedostatka vremena u ovom diplomskom radu neće se analizirati utjecaj geoloških čimbenika na intenzitet obalne erozije.

2.2.4. Antropogeni čimbenici

Antropogeni čimbenici neizostavan su čimbenik u proučavanju obalne erozije. Odnose se na ljudske aktivnosti u obalnim područjima koje pokreću ili ubrzavaju proces obalne dinamike (Nyandwi; 2001; Ľabuz, 2015). Povećanom ljudskom modifikacijom kao što su: umjetno proširenje žala, gradnja infrastrukture, apartmanizacija, betonizacija, deforestacija, korištenje umjetnih gnojiva narušava se prirodni rast žala (Nyandwi, 2001; Rajčić i dr., 2010; Ľabuz, 2015). Antropogeni čimbenici odnose se i na gradnju različitih objekata za zaštitu od obalne erozije kao što je primjerice izgradnja lukobrana. Sve navedene aktivnosti modificiraju transport sedimenta i oblik žala (Bird, 2008). Česta pojava vezana za antropogene procese je umjetno prihranjivanje žala koje se provodi zbog učinaka obalne erozije, a time i gubitka sedimenta te rekonstrukcije žala. Navedeni proces dovodi do mnogih ekoloških problema poput gubitka sedimenta, uništavanja bioraznolikosti i onečišćenja koje uzrokuje građevinski materijal. Područje istraživanja obuhvaća zabačeni i nenaseljeni dio otoka Paga, na kojem gotovo da nisu prisutni nikakvi antropogeni utjecaji te su morfološke promjene žala Sušac rezultat isključivo prirodnih čimbenika.

2.3. Negativne posljedice obalne erozije

Obalna erozija, uz klimatske promjene, globalni je problem i jedan od glavnih faktora koji utječu na evoluciju obale (Hinkel, 2013; Casella i dr., 2016). Obalna erozija negativno utječe na dvije skupine: ekologiju i gospodarstvo (Prasad i Kumar, 2014).

Negativne posljedice obalne erozije uključuju smanjenje površine i volumena žala, retrogradaciju žala, degradaciju obalnih područja, gubitak bioraznolikosti, gospodarske i socioekonomske gubitke te ugrožavanje javne i privatne imovine (Slika 8) (Sousa i dr., 2013; Alexandrakis i dr., 2015; de Andrade i dr., 2019; Lin i dr., 2019; Mohamed Rashidi i dr., 2021). Prisutnost navedenih posljedica dovodi do gubitka vrijednosti krajolika i brojnih ekoloških problema (de Andrade i dr., 2019).



Slika 8. Primjeri negativnih posljedica obalne erozije

Izvor: URL 6

2.4. Metoda u praćenju morfoloških promjena žala

2.4.1. Tradicionalne metode

Tradicionalne metode odnose se na primjenu različitih mjernih instrumenata poput užeta, klinometra, šipki i stupova s mjernom trakom i starih karata (Emery, 1961; Komar, 1977; Larasati i Wacano 2012; Mićunović, 2021).

Emeryjeva metoda jedna od najčešće korištenih tradicionalnih metoda u istraživanjima obalnih područja (Splinter i dr., 2018; Balasubramanian i dr., 2022; URL4). Široku primjenu ima u obalnim područjima tropskih krajeva s nepovoljnim klimatskim uvjetima i lošom infrastrukturom (Krause, 2014). Metodu je 1961. godine osmislio K. O. Emery. Jednostavna je metoda profiliranja žala koja se temelji na korištenju dvije šipke, s mjernom trakom, za niveliranje. Šipke su duge 1,5 m i povezane su užetom duljine 5-10 m pri čemu se dobiva linija pogleda prema horizontu. Detektirana razlika u nadmorskoj visini odnosi se na topografsku promjenu tog dijela žala. Mjerenja se provode u pravilnim intervalima (engl. *jumps*). Povezivanjem svih dobivenih vrijednosti promjena dobiva se grafički prikaz profila žala. Nedostatci ove metode su: dugotrajnost mjerenja, ograničena udaljenost između šipki, potrebna korekcija Zemljine zakrivljenosti i velika pogreška, uvjetovana zbrajanjem razlika vrijednosti pojedinačnih mjerenja (Emery, 1961; Komar, 1977; Birkemeier, 1981; Larasati i Wacano 2012; URL 4; URL 5).

2.4.2. Primjena geoprostornih tehnologija u praćenju morfoloških promjena žala

2.4.2.1. Satelitske snimke

Primjena satelitskih snimka za praćenje obalnih područja ima mnoge prednosti od kojih se prvenstveno ističe praćenje teško dostupnih i opasnih područja. Danas satelitske snimke imaju vrlo široku primjenu u različitim geomorfološkim istraživanjima, posebice za detekciju i određivanje intenziteta različitih egzogenih procesa. Posljednjih godina sve je veća globalna pokrivenost besplatnim ili relativno jeftinim satelitskim podacima metarske i submetarske rezolucije. Ograničenje u korištenju satelitskih snimaka za proučavanje geomorfoloških promjena obalnih područja je prostorna rezolucija. Naime, satelitski snimci s lošijom prostornom rezolucijom nisu primjereni za detekciju geomorfoloških promjena malih intenziteta. Također, poželjna je i veća vremenska rezolucija, odnosno veća frekvencija snimanja odabranog područja, da bi se određeni proces mogao što češće proučavati. S toga se, satelitski snimci, koji pružaju detaljne multispektralne značajke prvenstveno koriste za

proučavanje promjena zemljišnog pokrova, poplave, šumske požare, pošumljavanje itd. (Mićunović i dr., 2021).

2.4.2.2. Fotogrametrija

Fotogrametrija (engl. *photogrammetry*) definira se kao tehničko-znanstvena disciplina prikupljanja fotografija na temelju kojih se dobivaju geometrijske značajke određenog područja, objekta, itd. (Linder, 2009). Fotogrametrija, temeljena na primjeni bespilotnih letjelica (UAV) i naprednih digitalnih kamera, koristi se za dobivanje digitalnih modela površina i digitalnih orto-foto snimaka vrlo visoke prostorne rezolucije. Rapidni razvoj UAV-a, alata i tehnika za obradu prikupljenih podataka omogućili su brzo prikupljanje podataka, izradu 3D modela i detaljne analize (Ferrer-González, 2020).

Intervalna fotogrametrija (engl. *repeat UAV photogrammetry*) je specifična grana aerofotogrametrije koja se primjenjuje prilikom provođenja specifičnih prostorno-vremenskih analiza određenog područja. Obradom zračnih snimaka pomoću pripadajućih softvera dobivaju se referentni i intervalni digitalni modeli reljefa vrlo visoke rezolucije. Prednosti primjene UAV fotogrametrije su mnogobrojne. Prije svega, ekonomičnost jer UAV tehnologija postaje sve dostupniji oblik tehnologije u odnosu na primjerice LiDAR tehnologiju. Ostale prednosti su mobilnost tehnologije, odnosno mogućnost snimanja u nedostupnim, vertikalno raščlanjenim i opasnim područjima, mogućnost dosljednog intervalnog snimanja pri čemu se zadržavaju isti parametri i osigurava se metodološka vjerodostojnost i susljednost provedenih istraživanja. Snimanje istraživanog područja bespilotnim letjelicama može biti automatsko, pri čemu je misija leta, u aplikacijama (Pix4D, DJI GO, DroneDeploy, itd.), unaprijed isplanirana ili ju korisnik može direktno izvesti (Domazetović, 2021; Mićunović i dr., 2021). Nadalje, obrada fotogrametrijskih snimaka postaje sve jednostavniji proces s pojavom novih user-friendly, cjenovno dostupnih, programa za fotogrametriju.

S druge strane, ova metoda ima neke i nedostatke. UAV fotogrametrija pokazuje određene nedostatke u snimanju vertikalno raščlanjenog područja, senzori su ograničeni s meteorološkim prilikama, utjecaj vegetacije može biti značajan, itd. (Domazetović, 2021; Mićunović i dr., 2021). Intervalna fotogrametrija često je korištena metoda u praćenju i analizi intenziteta promjena žala uzrokovanih obalnom erozijom (Mancini i dr., 2013; Casella i dr., 2016; Mićunović i dr., 2017., Zanutta i dr., 2020; Mićunović, 2021) jer se dobivaju modeli visoke točnosti, prostorne i vremenske rezolucije.

2.4.2.2.1. Izravno georeferenciranje

Standardno georeferenciranje u fotogrametriji uključuje aerotriangulaciju (engl. *aerotriangulation* - AG) i korištenje orijentacijskih točaka (OT) (Slika 9) (engl. *ground control points* - GCP) (Forlani i dr., 2019; Padró i dr., 2019; Dinkov i Kitev, 2020).

Aerotriangulacija je proces uspostavljanja točnog matematičkog odnosa između fotografija iz zraka, kamere i zemljine površine. Za točnije pozicioniranje koriste se orijentacijske točke (OT). OT su točke vidljive na snimljenim fotografijama s poznatim koordinatama (X, Y, Z). Koordinate se prikupljaju u realnom vremenu (engl. *Real Time Kinematic* - RTK) točnim i preciznim RTK GNSS prijemnikom (Dinkov i Kitev, 2020). Geometrijska točnost modela ovisi o broju i prostornom rasporedu OT-a (Zhang i dr., 2019; Oniga i dr., 2020).

Izravno georeferenciranje (engl. *direct georeferencing* - DG) predstavlja relativno novu metodu u fotogrametriji u kontekstu primjene (Rizaldy i Firdaus, 2012; Zhang i dr., 2019; Glavačević i dr., 2023). Temelji se na inercijalnoj mjernoj jedinici (engl. *Inertial Measurement Unit* - IMU) i integriranom globalnom navigacijskom satelitskom sustavu (GNSS) (Salas López i dr., 2022). Prema Kranjec i Pavasović (2006) inercijalna mjerna jedinica komponenta je inercijalnog sustava. Sastoji se od dva temeljna elementa: akceleratora i žiroskopa koji mjeri nagib kamere (yaw, pitch i roll) (Liu i dr., 2022). Druga važna komponenta inercijalnog sustava su elektronički sklopovi koji analiziraju podatke prikupljene inercijalnom mjernom jedinicom.

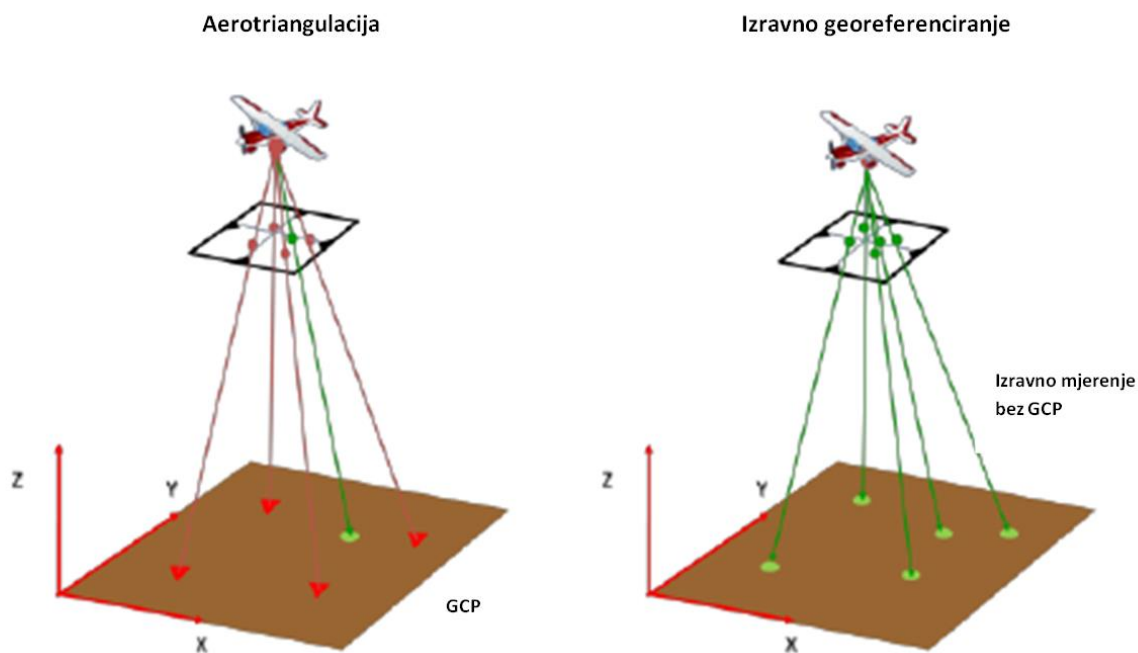
Razvoj kvalitetnih inercijalnih mjernih jedinica i GNSS tehnologije za UAV rezultirao je izravnim i točnijim mjerenjima parametara vanjske orijentacije (engl. *exterior orientation*) koji uključuju položaj i orijentaciju kamere u trenutku snimanja fotografije (Stöcker i dr., 2017; URL 8).

Brzi razvoj i primjena UAV tehnologije u mnogim znanstvenim područjima uvjetovala je brojna istraživanja u kojima se testirala točnost metode izravnog georeferenciranja (Rizaldy i Firdaus, 2012; Carbonneau i Dietrich, 2017; Zhang i dr., 2019; Stott i dr., 2020; Liu i dr., 2022; Glavačević i dr., 2023). Hugenholtz i dr. (2016) savjetuju korištenje OT-a na dijelovima koji zahtijevaju visoku točnost. Stott i dr. (2020) naglašavaju korištenje OT-a na rubovima i središtu područja istraživanja.

Metoda izravnog georeferenciranja u određenoj mjeri je korištena u istraživanjima dinamičnih obalnih područja. Važna je za praćenje, detekciju i analizu geomorfoloških promjena žala (Perez i dr., 2010; Gonçalves, 2011; Jaud i dr., 2018; Bertin, 2020). Prema Zhang i dr. (2019) izravno georeferenciranje učinkovit je alat za kontinuirano, brzo i točno

praćenje geomorfoloških procesa koji zahtijevaju podatke visoke prostorne i vremenske rezolucije.

Izravno georeferenciranje ima brojne prednosti. RTK GNSS prijemnik pruža precizno pozicioniranje, brzo prikupljanje podataka, ne zahtijeva korištenje OT-a čije označavanje i prikupljanje na vertikalno raščlanjenom reljefu, kao što je primjerice prostor Metajne, može predstavljati dugotrajan i zahtjevan proces (Liu i dr., 2022).



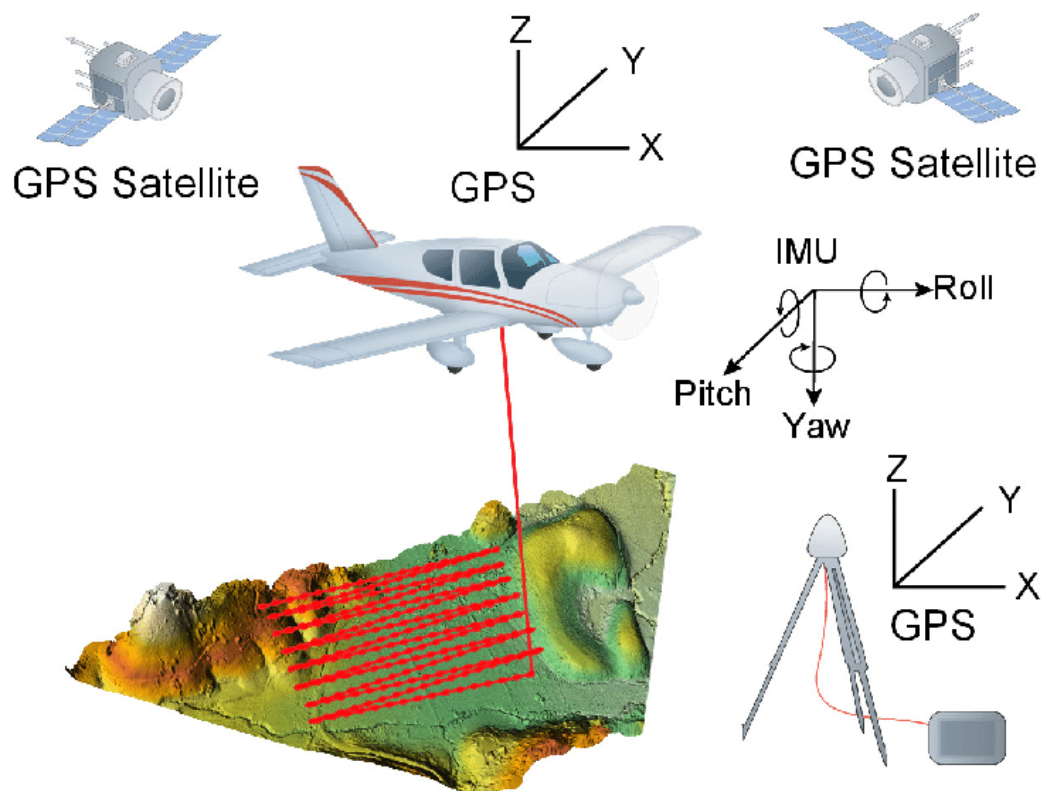
Slika 9. Usporedba klasičnog i izravnog georeferenciranja (modificirano prema Mian i dr., 2015)

2.4.2.3. LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) predstavlja najučinkovitiji način prikupljanja topografskih podataka. Radi na principu da se laserske zrake, usmjerene prema objektu iz nekog senzora, odašilju od njega pri čemu ključnu ulogu ima vrijeme između emitiranja i refleksije (Slika 10). Primjena LiDAR tehnologije za geomorfološka istraživanja počinje sredinom devedesetih godina 20. stoljeća (Šiljeg i dr., 2018; Lin i dr., 2019). Laserska izmjera može biti zračna, terestrička, orbitalna i ekstraterestrička (Šiljeg i dr., 2018). Uz zračni LiDAR, terestrički laserski skener (TLS) (engl. *terrestrial laser scanning*) ima široku primjenu za 3D modeliranje složenih geomorfoloških okruženja (Lin i dr., 2019; Shaw i dr., 2019). TLS izmjera koristi se u istraživanjima obalnih područja, posebice za detekciju prostorno-vremenskih promjena morfologije (Barnes, 2013; dos Santos i dr., 2014; Ding i dr., 2017; Lin i dr., 2019; Xiong i dr., 2019), utvrđivanje intenziteta i kvantifikaciju obalne erozije (Lin i dr., 2019; Xiong i dr., 2019), izračun volumena sedimenta na obali, detekciju sedimentnih procesa (Klemas, 2011; Brand i dr., 2019).

Prednosti korištenja laserske tehnologije su centimetarska točnost prikupljenih podataka, prikupljanje gustog oblaka točaka u kratkom vremenu, ujednačena pokrivenost tla, mogućnost prikupljanja podataka ispod vegetacije, mogućnost izrade detaljnog 3D intervalnog modela (Šiljeg i dr., 2018; Lin i dr., 2019; Domazetović, 2021).

Nedostatci primjene laserske tehnologije su visoka cijena opreme, dugotrajnost prikupljanja podataka, složena obrada podataka i teškoće u razlikovanju snimljenih objekata (Šiljeg i dr., 2018; Domazetović, 2021).



Slika 10. Princip rada zračnog LiDAR-a

Izvor: URL 9

2.4.2.4. Video nadzor obalnih područja

Posljednjih desetljeća, sustavi video nadzora, pokazali su se kao isplativa alternativa za prikupljanje i uočavanje morfoloških promjena obalnih područja. Instalacija kamera na fiksnim pozicijama pruža sve veću vremensku rezoluciju. Podaci prikupljeni metodom video nadzora obalnog područja omogućavaju praćenje razvoja obale i detekciju potencijalne obalne erozije (Slika 11). Digitalni video zapisi snimaju se posebno razvijenom stanicom za video nadzor (Davidson i dr., 2007; Revollo i dr., 2016). Glavni nedostatak je nemogućnost točne kvantifikacije intenziteta promjena i izvođenje detaljnih analiza.



Slika 11. Primjer praćenja morfoloških promjena žala pomoću video nadzora (Revollo i dr., 2016)

2.5. Kvantitativne mjere za praćenje prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom dinamikom

Geometrija obale važan je indikator u kvantifikaciji obalne erozije, odnosno akumulacije i odnošenja sedimenta (Thieler i dr., 2009; Oyedotun, 2014; Mutaqin, 2017; Baig i dr., 2020). Kvantitativni pokazatelji vremenskih promjena temelje se na izmjeranim razlikama položaja obale u određenom razdoblju. Za kvantificiranje i analizu prostorno-vremenskih promjena žala koriste se sljedeći pokazatelji:

- 1) **Promjena obalne linije** (engl. *shoreline change envelope* - **SCE**) odnosi se na najveću udaljenost obalne linije, izraženu u metrima (m), među svim linijama koje sijeku određeni transekt. Vrijednosti SCE su uvijek pozitivne.
- 2) **Neto kretanje obale** (engl. *net shoreline movement* - **NSM**) predstavlja udaljenost između dvije obalne linije za svaki transekt izražen u metrima (m).
- 3) **Stopa krajnje točke** (engl. *end point rate* - **EPR**) kvantitativna je mjera koja predstavlja količnik NSM pokazatelja i vremena između te dvije linije (m/yr). Negativne vrijednosti ukazuju na eroziju dok pozitivne na prirast žala.
- 4) **Stopa linearne regresije** (engl. *linear regression rate* - **LRR**) predstavlja nagib regresijske linije. Regresijska linija se postavlja tako da je zbroj kvadrata reziduala

(određuju se kvadriranjem udaljenosti pomaka svake točke sjecišta od regresijske linije i zbrajanjem kvadrata reziduala) minimaliziran. Zbog lake primjenjivosti koristi se u mnogim istraživanjima obalnih područja.

- 5) **Ponderirana linearna regresija** (engl. *weighted linear regression* - **WLR**) odnosi se na nagib ponderirane regresijske linije (m/yr). Prilikom izračuna algoritam se temelji na principu da obalne linije koje imaju niže vrijednosti nesigurnosti imaju veći utjecaj pri generiranju ponderirane regresijske linije.
- 6) **Volumetrijska promjena** (engl. *total volume of difference*) odnosi se na volumetrijski pomak žala izražen u kubnim metrima (m^3) (Heathfield i dr., 2016; Carvalho i dr., 2020). Farris i List (2007) istražuju i dolaze do relativno visoke korelacije između stope promjene obalne linije i stope volumetrijske promjene. Jayson-Quashigah i dr. (2019) u radu zaključuju da su valovi glavni uzrok kratkoročnih promjena volumena sedimenta.
- 7) **Površinska promjena** (engl. *total area of detectable change*) odnosi se na ukupnu promjenu u površini izraženu u metru kvadratnom (m^2). Obuhvaća detektiranu površinu područja koje bilježi spuštanje nadmorske visine (erozija) (engl. *total area of surface lowering*) i površinu koja bilježi povećanje nadmorske visine (akumulacija) (engl. *total area of surface raising*).

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja može se podijeliti na tri glavna koraka:

1. Prikupljanje i obrada aerofotogrametrijskih snimaka Državne geodetske uprave (DGU) za širi prostor poluotoka Metajne.
2. Intervalno snimanje šireg prostora odabranog žala primjenom bespilotne letjelice Matrice 210 RTK V2.
3. Detekcija i kvantifikacija prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih obalnom erozijom za duže (1959. – 2023.) i kraće vremensko razdoblje (studeni, 2022. – lipanj, 2023.).

3.1. Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave

Aerofotogrametrijski snimci nastaju kontinuiranim snimanjem iz zraka, svakih nekoliko godina, za cijelo područje Republike Hrvatske u analognom i digitalnom obliku (DGU, 2018). Prva zračna snimanja pojedinih dijelova Hrvatske započela su 1930-tih godina. Ipak, sustavna aerofotogrametrijska izmjera počinje nakon II. svjetskog rata (Biočić, 2014). Aerofotogrametrijski snimci prikupljaju se u različitim prostornim rezolucijama ovisno o svrsi istraživanja. Razvojem kamera sa sve kvalitetnijim tehničkim specifikacijama omogućilo se izvođenje visokorezolucijskih modela, a time i povećala mogućnost detektiranja minimalnih detalja na snimcima. Od 2009. godine podaci se prikupljaju digitalnom kamerom pričvršćenom na žiroskopski stabilizirana postolja iznad otvora u podnožju zrakoplova (DGU, 2018).

Od 2011. godine aerofotogrametrijska snimanja otoka Paga provode se digitalnim multispektralnim UltraCam kamerama. UltraCam kamere razvila je austrijska firma Vexcel Imaging GmbH. Kamerom se prikupljaju podaci visoke rezolucije u vidljivom i infracrvenom dijelu spektra. Prema Domazetović (2021) aerofotogrametrijski sustav moguće je raščlaniti na četiri ključne komponente: zrakoplov, multispektralna kamera, stabilizator kamere i promjenjivi objektiv (Slika 12).

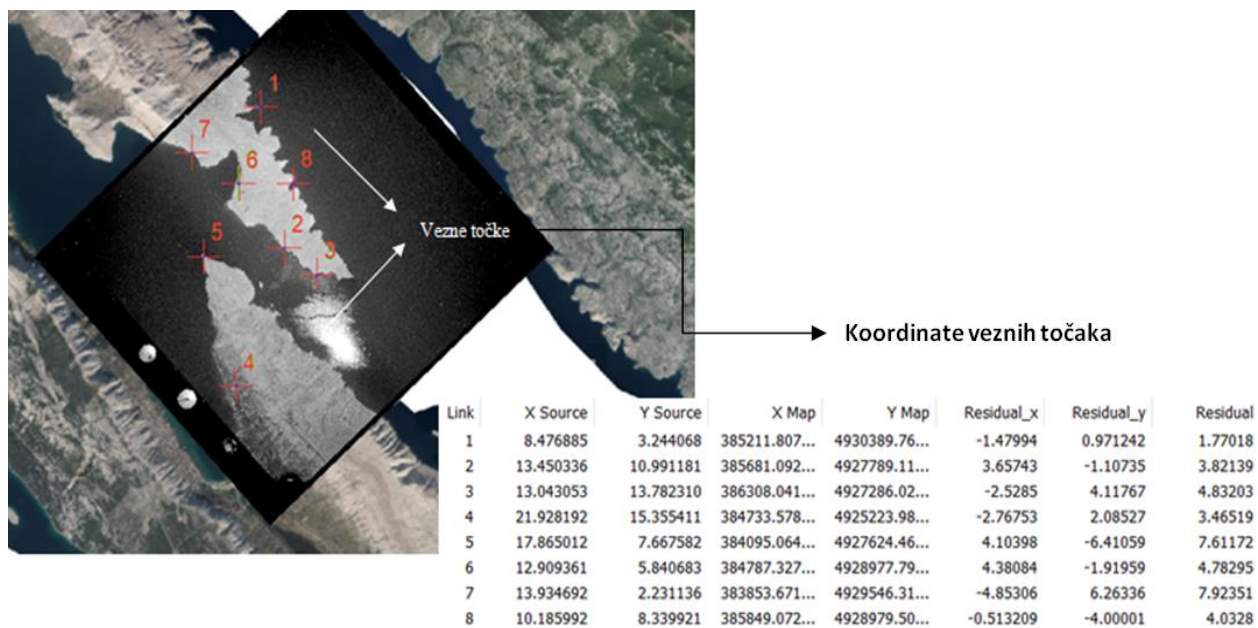


Slika 12. Komponente aerofotogrametrijskog sustava (Domazetović, 2021)

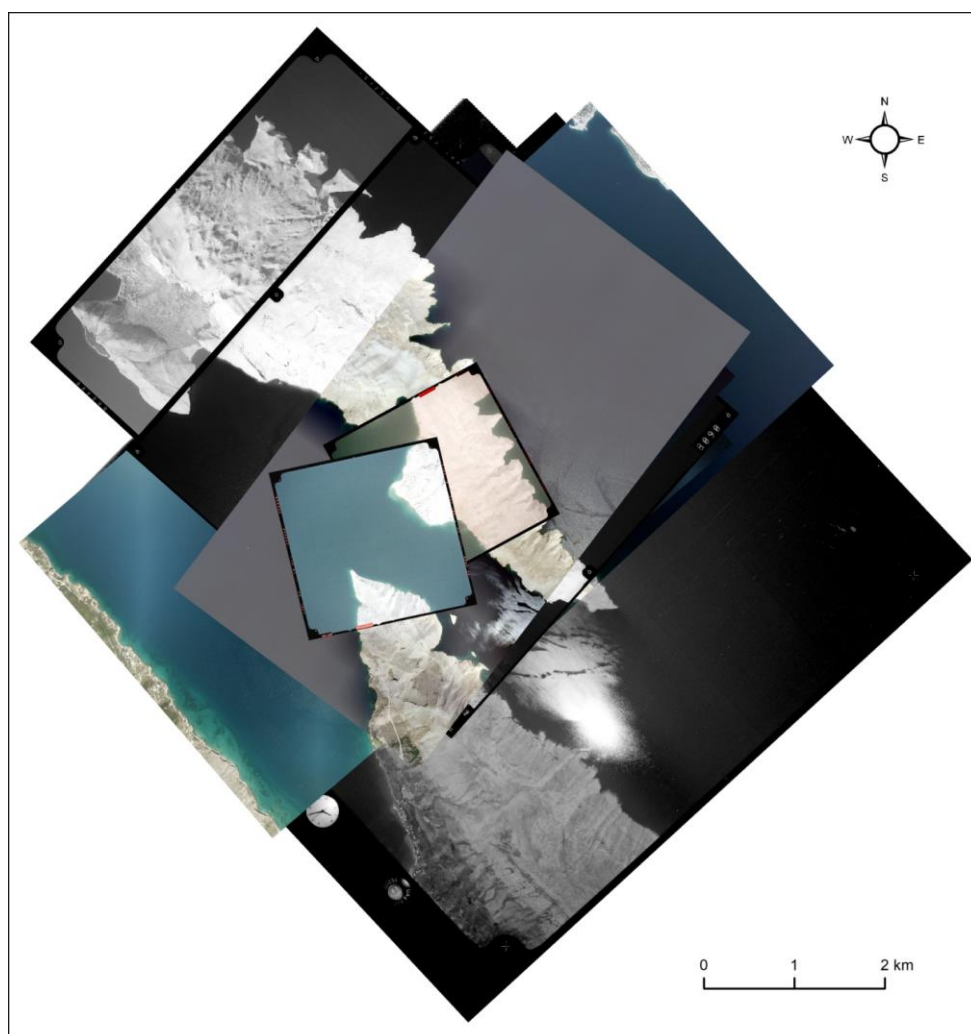
Intervalni modeli obalne linije Metajne izvedeni su na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih snimaka. Napravljeni modeli omogućili su praćenje, analizu i kvantifikaciju prostorno-vremenskih morfoloških promjena žala u razdoblju od 1959. do 2020. Važno je naglasiti da su se zbog lošije kvalitete snimaka za navedeno razdoblje kvantificirale samo linearne prostorno-vremenske promjene morfologije žala.

3.1.1. Grubo georeferenciranje

S obzirom na to da dobiveni arhivski snimci uključuju velika područja prikaza, izravno georeferenciranje na područje Metajne, odnosno obale Sušac nije bilo jednostavno. Stoga je prvi korak obrade arhivskih zračnih snimaka DGU-a (1959. – 2020.) uključivao njihovo grubo georeferenciranje, odnosno smještanje u zadani koordinatni sustav po cijeloj površini. Georeferenciranje je proces pridruživanja geografskih koordinata točkama koje nemaju prostornu dimenziju. Digitalni ortofoto DGU-a korišten je kao predložak za grubo georeferenciranje. Pomoću alata “*Georeferencing*”, unutar softvera ArcMap 10.4.1., ručno je dodan odgovarajući broj veznih točaka na onim dijelovima terena koji su prepoznati kao fiksni (Slika 13). Prilikom dodavanja veznih točaka pokušala se uzeti u obzir ravnomjerna prostorna distribucija točaka. Ovaj korak napravljen je s ciljem grubog smještanja arhivskih snimaka u prostor (Slika 14).



Slika 13. Proces ručnog dodavanja veznih točaka



Slika 14. Grubo georeferncirani snimci

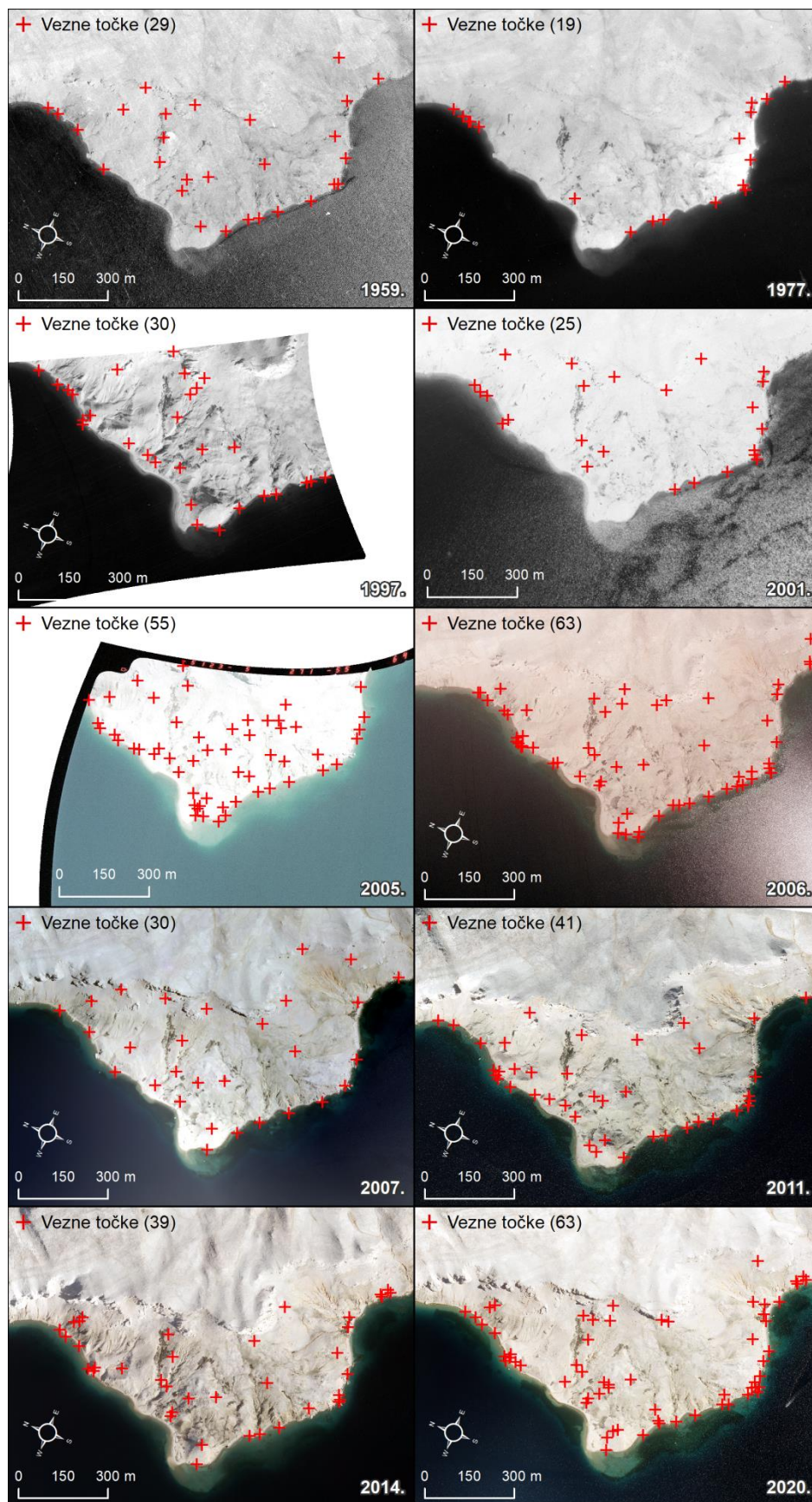
3.1.2. Fino georeferenciranje intervalnih snimaka

Nakon grubog georeferenciranja izvršeno je fino georeferenciranje snimaka s ciljem točnijeg smještaja u prostor interesa (Metajna). Kao predložak koristio se visokorezolucijski (< 5 cm) DOF (2022) snimak, izveden iz snimaka prikupljenih bespilotnom letjelicom te primjenom 12 orijentacijskih točaka. Pomoću alata *Georeferencing*, unutar softvera ArcMap 10.4.1., ručno su dodane vezne točke. Na mjestima gdje su bile prisutne veće distorzije dodano je više veznih točaka. Također, veći broj veznih točaka dodan je na fiksne elemente uz obalu s obzirom na to da je to glavni interes istraživanja (Slika 15). U Tablici 1. prikazan je broj veznih točaka korišten za geometrijsku transformaciju pojedinog snimka. Za transformaciju snimaka prema veznim točkama korištena je *Adjust* transformacija. *Adjust* transformacija temelji se na algoritmu koji kombinira polinomsku transformaciju i triangulacijsku nepravilnu mrežu (TIN) za optimizaciju te globalnu i lokalnu točnost. *Adjust* transformacija se pokazala primjerenom prilikom georeferenciranja zračnih i satelitskih snimaka s ciljem provođenja prostorno-vremenskih analiza (Kulenović, 2023). Osim navedene postoje i ostale geometrijske transformacije koje uključuju: *Zero Order Polynomial*, *1st Order Polynomial*, *2nd Order Polynomial*, *3rd Order Polynomial*, *Similarity Polynomial*, *Spline* i *Projective Transformaition*. *Zero Order Polynomial* koristi polinom nultog reda za transformaciju. Primjenjuje se kada su podaci prethodno već georeferencirani. *1st Order Polynomial* transformacija najčešće se koristi za georeferenciranje snimaka pri čemu se kvadrati i pravokutnici na rasteru mijenjaju u paralelograme. Kada je red transformacije viši tada se složenije izobličenje bolje transformira. Transformacije *2nd Order Polynomial* i *3rd Order Polynomial* uklapaju nešto kompliciraniju površinu na ulazne točke. *Similarity Polynomial* transformacija nastoji sačuvati oblik izvornog rastera pri čemu je vrijednost RMSE veća nego kod ostalih transformacija. *Projective* transformacija korisna je za kose slike i skenirane karte, iskrivljuje linije tako da ostanu ravne pri čemu može doći do toga da linije koje su nekada bile paralelne više neće biti (URL 10). Jedina iznimka napravljena je prilikom georeferenciranja snimaka iz 2011. godine za kojeg *Adjust* transformacija nije dala željeni rezultat. Naime, prilikom finog georeferenciranja na nekoliko lokacija u blizini obale bi došlo do pucanja snimka. Navedeni problem riješen je korištenjem *Spline* transformacije koja omogućava transformaciju samo užeg prostora oko svake odabrane vezne točke. Navedeno se pokazalo ključnim za rješavanje problema pucanja snimaka na određenim lokacijama. S obzirom na to da *Spline* transformira

isključivo uži prostor oko odabranih veznih točaka, bilo je potrebno osigurati jednoličnu prostornu distribuciju i što je moguće veći broj veznih točaka.

Tablica 1. Broj veznih točaka korišten za geometrijsku transformaciju intervalnih snimaka

Godina	Broj veznih točaka	Predložak
1959	29	DOF-UAV (2022)
1977	19	DOF-UAV (2022)
1997	30	DOF-UAV (2022)
2001	25	DOF-UAV (2022)
2005	55	DOF-UAV (2022)
2006	63	DOF-UAV (2022)
2007	30	DOF-UAV (2022)
2011	41	DOF-UAV (2022)
2014	39	DOF-UAV (2022)
2020	63	DOF-UAV (2022)



Slika 15. Vezne točke korištene za georeferenciranje intervalnih snimaka

3.1.3. Provjera točnosti georeferenciranih snimaka

Nakon georeferenciranja snimaka izvršena je njihova provjera pozicijske točnosti. Provjera točnosti izvedena je na temelju 20-ak točaka (Slika 16) čija su referentne koordinate utvrđene na temelju predloška visokorezolucijskog DOF-a (UAV). Proces provjere izveden je tako da su dodane nove kontrolne točke (engl. *check point*) na svaki intervalni snimak i referentni DOF-UAV iz 2022. godine. Dakle, lokacije kontrolnih točaka su bile neovisne od onih koje su služile za fino georeferenciranje snimaka. Takav način provjere točnosti omogućava izvođenje stvarne procjene točnosti modela. Međutim, ovakav pristup često se zanemaruje u procesu georeferenciranja arhivskih snimaka. Potom su se usporedile vrijednosti koordinata (XY) dodanih točaka referentnog snimka te koordinate točaka s georeferenciranog snimka. Vrijednosti koordinata oduzete se od vrijednosti referentnih koordinata iz čega su potom izračunate najčešće korištene metrike u provjeri točnosti dobivenih modela: srednja kvadratna pogreška (engl. *Root Mean Square Error* - RMSE) i srednja apsolutna pogreška (engl. *Mean Absolute Deviation* - MAD). Metrike su izračunate su za sve te samo za točke na obali.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X,Y)_{ref} - (X,Y)}{n}} \quad (1)$$

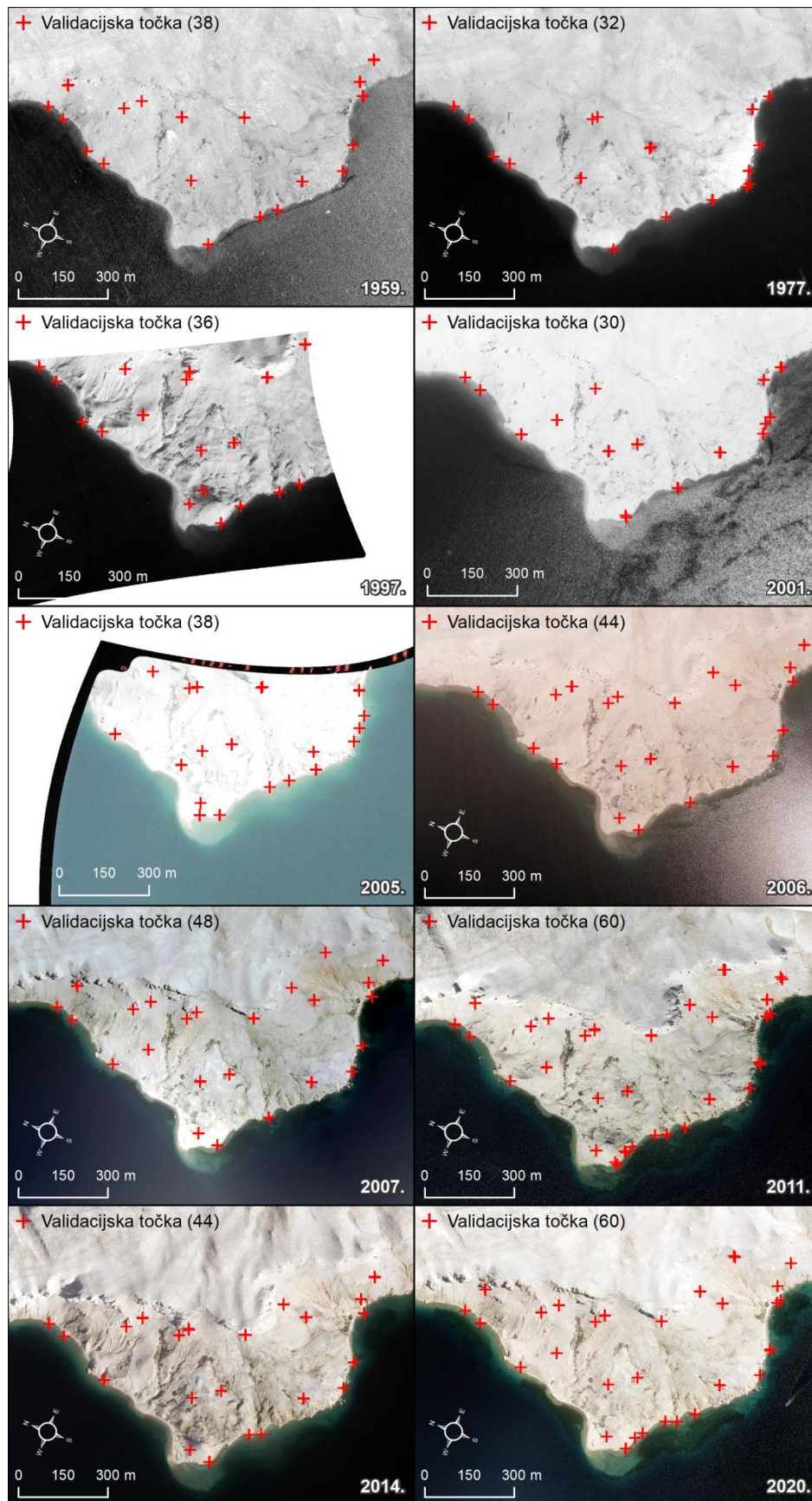
$$\text{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^n |(X,Y)_{ref} - (X,Y)|}{n} \quad (2)$$

gdje je:

$(XY)_{ref}$ – X,Y koordinate specifične točke na referentnom snimku

(XY) - koordinate specifične točke na intervalnom snimku

n - broj kontrolnih točaka



Slika 16. Prostorna distribucija točaka korištenih za provjeru modela

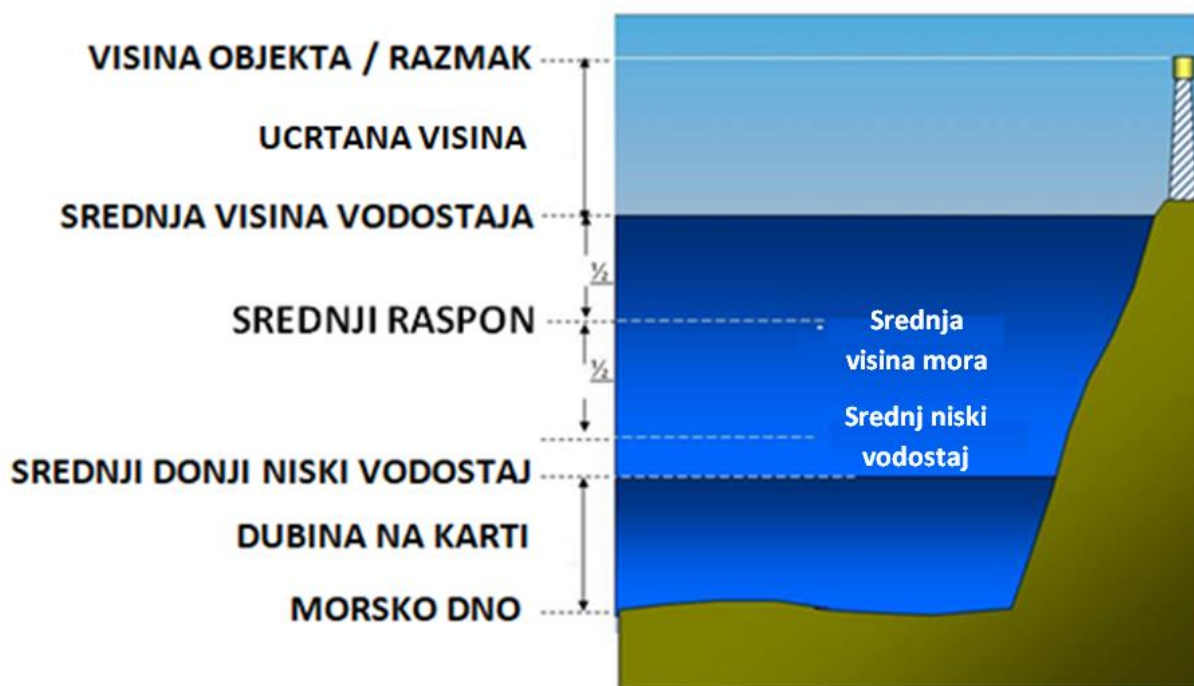
3.1.4. Određivanje obalne linije

Određivanje točne granice obalne linije izazovan je i složen zadatak zbog brojnih čimbenika koji uključuju fluktuaciju plime i oseke, eroziju i nepravilan oblik obala. Često korištena referentna točka za određivanje obalne linije je oznaka srednjeg visokog vodostaja (engl. *mean high water mark* - MHW). MHW predstavlja aritmetički prosjek visina visokih voda opaženih tijekom 18,6-godišnjeg metonskog ciklusa. To je linija koja nastaje sjecištem ravnine plime, srednje visoke plime i obale (Slika 17).

U kontekstu društvenog aspekta u nekim nadležnostima obala se definira na temelju specifičnih pravnih okvira koje mogu uzeti u obzir različite čimbenike. Oni uključuju spomenuti MHW, povijesne granice ili posebne propise/zakone koji se odnose na obalna područja. Pravne definicije imaju za cilj dati jasne i dosljedne smjernice za određivanje obalne crte u administrativne i regulatorne svrhe.

Nadalje, Međunarodna hidrografska organizacija (engl. *international hydrographic organization* - IHO) također potiče korištenje MHW-a kao primarne referentne točke i daje detaljne upute o tome kako izmjeriti i iscrtati obale koristeći različite metode.

Međutim, određivanje MHW na pješčanim žalima ima brojne izazove. Naime, pješčana žala sklona su stalnim morfološkim promjenama uslijed kretanja pijeska uzrokovanog plimama, valovima i vjetrom. Ova promjenjiva priroda pijeska može otežati uspostavljanje dosljedne referentne točke za mjerenje MHW-a. Nadalje, pješčana žala često imaju kosi profil, gdje se obala postupno spušta prema moru. Kut ove padine može varirati duž žala, što rezultira različitim razinama vode na različitim točkama. Stoga, određivanje točne lokacije MHW-a može biti zahtjevno jer ovisi o specifičnom obliku i nagibu žala. Utjecaj valova predstavlja poseban izazov. Valovi koji se razbijaju o obalu mogu podignuti razinu plime iznad prosječne razine plime. To se može dogoditi zbog energije valova, obalnih obilježja i olujnih uvjeta. Razlikovanje između naleta valova i stvarne MHW može biti izazovno, posebno tijekom specifičnih vremenskih događaja (oluje). Nadalje, dva dodatna izazova koja nisu uočena na obali Sušac, a mogu predstavljati izazov prilikom određivanja obalne linije prema MHW-u su utjecaj vegetacije i antropogeni utjecaj. Naime, pješčana žala mogu sadržavati vegetaciju te sustave dina koji mogu utjecati na mjerenja razine vode. Ove značajke mogu stvoriti prepreke, blokirati pogled na obalu ili promijeniti tok vode otežavajući točno određivanje MHW. Nadalje, antropogeni utjecaj, kao što su projekti uređenja žala ili izgradnja nasipa i prepona, mogu promijeniti prirodni profil žala i dinamiku vode. Ove izmjene mogu otežati uspostavljanje dosljednog i pouzdanog mjerenja MHW-a.



Slika 17. Različite razine plime i oseke

S obzirom na specifičnost ulaznih podataka i dostupno vrijeme za istraživanje, odabrana je metoda određivanja obalne linije koja može biti primijenjena za sve podatke (arhivski zračni snimci DGU-a i DOF izvedeni s UAV-om). Dakle, unutar određenog područja istraživanja, označenom u poglavlju 1.4., na intervalnim modelima od 1959. do 2023., obalna linija izdvojena je metodom ručne vektorizacije u mjerilu 1:500. U tom slučaju, obalnu liniju predstavljala je vizualnu granicu kopna i mora koja je u trenutku snimanja zabilježena analognom/digitalnom kamerom. Navedeno je bio jedini precizan način izdvajanja obalne linije na arhivskim zračnim snimcima. Na isti način vektorizirana je obalna linija na UAV modelima. Tako se uskladila metoda izdvajanja obalne linije sa starijim intervalnim modelima i zadržala metodološka dosljednost.

3.1.5. Analiza prostorno-vremenskih promjena u DSAS-u

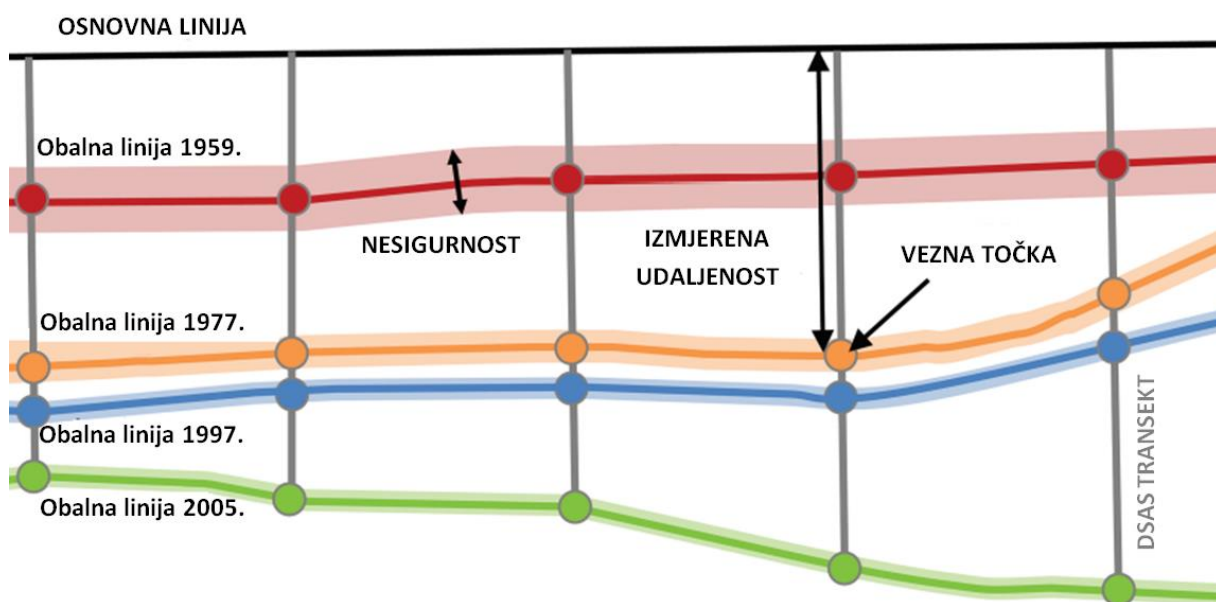
Podaci izdvojenih obalnih linija obrađeni su u DSAS ekstenziji namijenjenoj za softver *ArcGIS*. Pomoću DSAS-a obrađeni su i analizirani linearni pomaci obalne linije za razdoblje (1959. – 2023.). DSAS (engl. *digital shoreline analysis system*) često je korištena ekstenzija za analizu vremenskih promjena položaja obalne linije (Ford, 2013; Salghuna i Bharathvaj, 2015; Bheeroo i dr., 2016; Goksel i dr., 2020; Hossen, 2023). Temelji se na računanju statistike stopa promjena koristeći vremensku seriju linijskih vektorskih podataka. Prema tome, svaki vektorski podatak predstavlja položaj obalne linije u određenom vremenu.

Na temelju osnovne linije (engl. *baseline*) DSAS kreira okomite profile (engl. *transect*) u zadanom intervalu koji sijeku vektoriziranu obalnu liniju u točki sjecišta (engl. *intersect point*). Točka sjecišta sadrži informacije o datumu i lokaciji obalne linije koje DSAS koristi prilikom računanja stope promjene. Udaljenost od osnovne linije do točke sjecišta (engl. *measurement distance*) duž transektata također se koristi za izračunavanje određenih kvantitativnih pokazatelja promjena. Točnost izračunatih stopa promjena ovisi o točnosti ulaznih podataka pri čemu je važno uzeti u obzir pogrešku, odnosno nesigurnost intervalnih modela (engl. *shoreline uncertainty*) (Slika 18) (Himmelstoss i dr., 2018). Nesigurnosti intervalnih modela određeni su neovisnom provjerom točnosti georeferenciranih snimaka opisanom u poglavlju (3.1.3).

Negativne vrijednosti pomicanja obalne linije ukazuju na retrogradnu dinamiku obalne linije, također poznato kao „*povlačenje obale*“ ili obalna erozija, a odnosi se na pomicanje obale prema kopnu tijekom određenog vremena. Nastaje kada obala prolazi kroz neto gubitak sedimenta što rezultira povlačenjem obale prema kopnenim područjima. Taj proces obično pokreću prirodni čimbenici kao što su valovi, plima, morske struje i dugoročne promjene razine mora. Izraz koji se koristi za opisivanje širenja obalne linije prema moru, odnosno dobivanja pozitivnih vrijednosti u DSAS-u je „*prirastanje obale*“ ili „*progradacija obale*“. Progradacija obale odnosi se na proces nakupljanja sedimenta i posljedično širenje obale prema moru. Javlja se kada postoji neto prirast sedimenta u obalnom području što dovodi do širenja obalne crte prema moru.

Linearni pomaci obalne linije za proučavano razdoblje izvedeni su usporedbom položaja obalnih linija na dva uzastopna intervalna modela. Takav način obrade podataka omogućio je detaljan uvid linearnih pomaka na višegodišnjoj i jednogodišnjoj razini te uočavanje trendova i intenziteta promjena. Također, napravljena je i generalna usporedba za sve dostupne analizirane godine (1959. – 2023.) s ciljem određivanja općih značajki obalne dinamike za proučavano dugogodišnje razdoblje. Prilikom obrade podataka potrebno je postaviti sljedeće korisničko-definirane parametre: *baseline settings*, *shoreline settings* i *casting transect*. Unutar *baseline settings-a* određuje se *baseline placement* koji se odnosi na položaj bazne linije u odnosu na obalne linije. Parametar je važan zbog transektata koji će se generirati iz bazne linije. Može se definirati kao *onshore* (na kopnu), *offshore* (na moru) ili *mid-shore* (između). U ovom slučaju postavljen je kao *onshore*. Također, parametar koji je potrebno postaviti je *baseline orientation*, a odnosi se na orijentaciju bazne linije koja je važna zbog definiranja položaja kopna u odnosu na liniju pri čemu softver generira profile u suprotnom smjeru od kopna. Za navedeni parametar postavljena je vrijednost *right*. Nadalje,

parametri koji se odnose na obalnu liniju (*shoreline settings*) uključuju dodavanje atributa datuma prikupljanja snimaka i nepouzdanost. Postavljene vrijednosti parametra nesigurnosti odnose se na izračunatu statističku mjeru RMSE za kontrolne točke na obali na intervalnim fino georeferenciranim modelima (tablica 5) te na točnost izrađenog UAV DOF-a. Parametri koji se odnose na kreirane transekte važni su za generiranje transekta i izračun promjena pri čemu je bitno da budu definirani na isti način kod svih usporedbi. Prema tome, *maximum search distance from baseline*, koji se odnosi na maksimalnu udaljenost na kojoj će softver tražiti obalnu liniju, postavljen je na 100 m. Nadalje, *transect spacing* postavljen je na 1 m, a odnosi se na razmak na kojem će se generirati transekti. Parametar koji utječe na izgled transekta, ovisno o zakrivljenosti obalne linije i koji kontrolira da se transekti ne preklapaju je *smoothing distance* te je postavljen na 50. Mijenjanjem vrijednosti postiže se drugačiji kut kreiranja transekta iz osnovne linije. Navedeni parametar je izrazito važan prilikom obrade podataka jer kontrolira da transekti budu okomiti na obalne linije. Nakon postavljenih korisničko-definiranih parametara izračunale su se kvantitativne mjere linearnih pomaka obalne linije (NSM, EPR i SCE) opisane u poglavlju 2.5.



Slika 18. Princip rada DSAS ekstenzije (modificirano prema Himmelstoss i dr., 2018.)

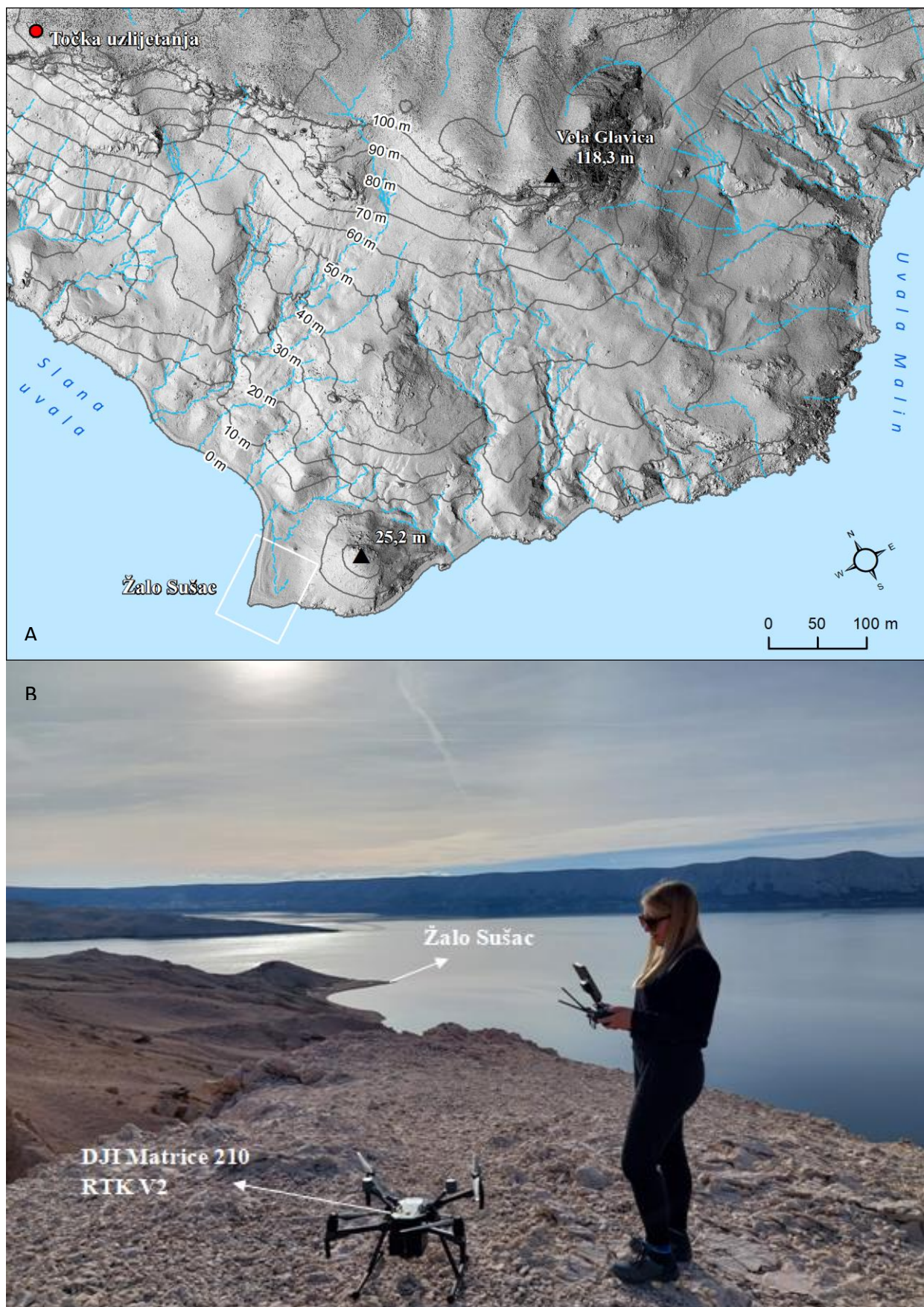
3.2. Aerofotogrametrijska izmjera šireg područja istraživanja

Terenska istraživanja uključivala su primjenu intervalne UAV fotogrametrije za snimanje šireg prostora područja istraživanja (Slika 19A). Iako su prostorno-vremenske promjene obalne linije žala Sušac proučavane unutar manjeg područja definiranog u poglavlju

(1.4.), odlučeno je da se snimi šire područje istraživanja, površine oko 100 ha. Razlog za to su prikupljanje podataka za buduća istraživanja koja će biti usmjerena prema:

- a) testiranju točnosti izravnog georeferenciranja na vertikalno raščlanjenom terenu veće površine
- b) izradu detaljnije strukturno-geomorfološke karte šireg područja istraživanja
- c) kvantifikaciji stopa erozije i akumulacije u odabranim jarugama
- d) analizi prostorno-vremenskih promjena morfologije preostalih žala

Prvo aerofotogrametrijsko snimanje provedeno je 28. studenog 2022. godine, a drugo 4. lipnja 2023. godine. Podaci prikupljeni terenskim istraživanjem omogućili su analizu linearnih i volumetrijskih promjena žala u razdoblju od šest mjeseci. Područje istraživanja snimljeno je bespilotnom letjelicom *DJI Matrice 210 RTK V2*, kineske tvrtke DJI i kamerom *DJI Zenmuse x7 (16 mm)*. Zbog izrazite vertikalne raščlanjenosti terena UAV snimanje izvršeno je s najviše točke vapnenačkog grebena na oko 100 m nadmorske visine (Slika 19B).



Slika 19. (A) Šire područje istraživanja; (B) lokacija uzlijetanja UAV-a

Planiranje UAV misija

Aerofotogrametrijska snimanja isplanirana su u aplikaciji *DJI Pilot*. U svakom snimanju isplanirane su dvije *single grid* misije s obzirom na to da aplikacija ne podržava kreiranje *double grid* misija. S obzirom na dostupna četiri seta baterija, nemogućnost ponovnog punjenja baterija te izrazito nedostupnog terena za ponovni dolazak do točke uzlijetanja (*home point*), odlučeno je da se postavke misija odrede na način koji bi prije svega omogućio sigurno snimanje šireg područja istraživanja. Postavke misija leta prikazane su u tablici 2. Dakle, navedene postavke snimanja su omogućile da se svaka *single grid* misija snimi s dvije baterije, odnosno jednim setom baterija. Navedeno je uvjetovalo to da UAV ne prati konfiguraciju terena. Naime, u slučaju snimanja na manjim visinama ili praćenja konfiguracije reljefa kroz konstantno podešavanje visine i brzine leta potrošnja baterije bi bila veća čime bi se povećala i nesigurnost snimanja. Nadalje, *home point* s kojeg je UAV poslan u misiju je jedina točka do koje se moglo doći bez dodatnog ugrožavanja sigurnosti ljudi i opreme. Dakle, glavni razlozi odabira navedenih postavki snimanja, s obzirom na to da se htjelo snimiti šire područje istraživanja, bili su logistički.

Tablica 2. Postavke misija leta

ID	Parametar	Vrijednost
1	Brzina leta (m/s)	8
2	Visina leta (m)	120
3	Bočno preklapanje (%)	80
4	Prednje preklapanje (%)	80
5	Očekivani GSD (cm)	4.76
6	Tip misije	<i>single grid</i>

Odabir postavki kamere

Postavke kamere definirane su prema primjerima dobre prakse UAV snimanja. S obzirom na postavljenu visinu leta UAV-a i brzinu kretanja od 8 m/s odabran je *shutter priority* (S) način snimanja. Odabrani način snimanja omogućava određivanje vrijednosti brzine zatvarača dok se otvor blende i ISO mogu automatski postaviti kako bi se održala vrijednost ekspozicije (0,0) i osigurala dovoljna količina svjetlosti (O'Connor i dr., 2017; URL 11). Ekspoziciju fotografije određuju tri glavne postavke: ISO, brzina zatvarača i otvor blende (O'Connor i dr., 2017). Stoga, ISO vrijednost snimanja automatski je prilagođavana pri čemu je minimalna vrijednost iznosila 100, a maksimalna 250. Brzina zatvarača (engl. *shutter speed*) bila je fiksirana na 1/800. Otvor blende (engl. *aperture ili f-stop*) automatski je

postavljen na maksimalno $f/5$ i minimalno $f/2.8$. Posljednja postavka kamere koja se po pravilu postavlja je fokus (O'Connor i dr., 2017). Prilikom snimanja koristilo se ručno fokusiranje (engl. *manual focus*) koje je slijedom dobre prakse (O'Connor i dr., 2017; URL 12) postavljeno na način da se UAV podigao na željenu visinu te u trenutku kad je ušao u prvi *waypoint* (točku interesa) iznad obalne linije, snimanje je pauzirano. Potom je uključeno automatsko fokusiranje klikom na ekran upravljača, nakon toga fokus je zaključan prebacivanjem na ručno (manual) fokusiranje, čime je fokus bio „zaključan“ tijekom cijelog leta.

Kvaliteta snimljenih fotografija provjerena je u *Agisoftu* pomoću opcije *image quality*. Najniža vrijednost kvalitete fotografija, u obadva snimanja, iznosila je 0.75 dok je najviša iznosila 0.92. Dominirale su vrijednosti od 0.86 do 0.90 što predstavlja izrazito visoku kvalitetu snimljenih fotografija.

Označavanje i prikupljanje orijentacijskih i kontrolnih točaka

Za dobivanje što bolje apsolutne točnosti modela prikupljeno je 12 orijentacijskih točaka (Slika 21). Ovisno o scenariju obrade fotografije, prikupljene točke korištene su kao zemaljske kontrolne točke (engl. *ground control point* - GCP) i točke za provjeru (engl. *check point* - CP). Naime, iz intervalnih snimaka izvedeni su DOF modeli kroz tri scenarija:

1) DOF s 12 GCP - referentni model potreban za izvođenje finog georeferenciranja arhivskih snimaka te za izdvajanje obalne linije. Razlog za izradu ovog modela je dobivanje najveće pozicijske točnosti u odnosu na ostala dva scenarija.

2) DOF s 9 GCP i 3 CP - referentni model potreban za izračun stopa volumetrijske promjene. Ovaj scenarij je korišten s ciljem utvrđivanja pogreške intervalnih modela koji se potom kao nesigurnost, odnosno korisničko-definirani parametar, integrira u DSAS program.

3) DOF 11 CP - modeli izvedeni izravnim georeferenciranjem gdje su sve prikupljene točke služile za utvrđivanje točnosti modela. U budućim istraživanjima ispitat će se primjenjivost ovog pristupa u kvantificiranju prostorno-vremenskih promjena na širem području istraživanja.

Točke su označene crvenom bojom koja se ističe na svijetloj karbonatnoj podlozi te su prikupljene *Trimble R12i* GNSS-om (Slika 20). Koordinate označenih točaka prikupljene su u HTRS96 koordinatnom sustavu pri čemu je nadmorska visina prikupljena kao geoidna visina (Tablica 3). Prilikom izvoza točaka (*export*) omogućena je njihova konverzija u WGS84 koordinatni sustav te u elipsoidnu visinu (uključivanje geoidne undulacija). Navedeno je

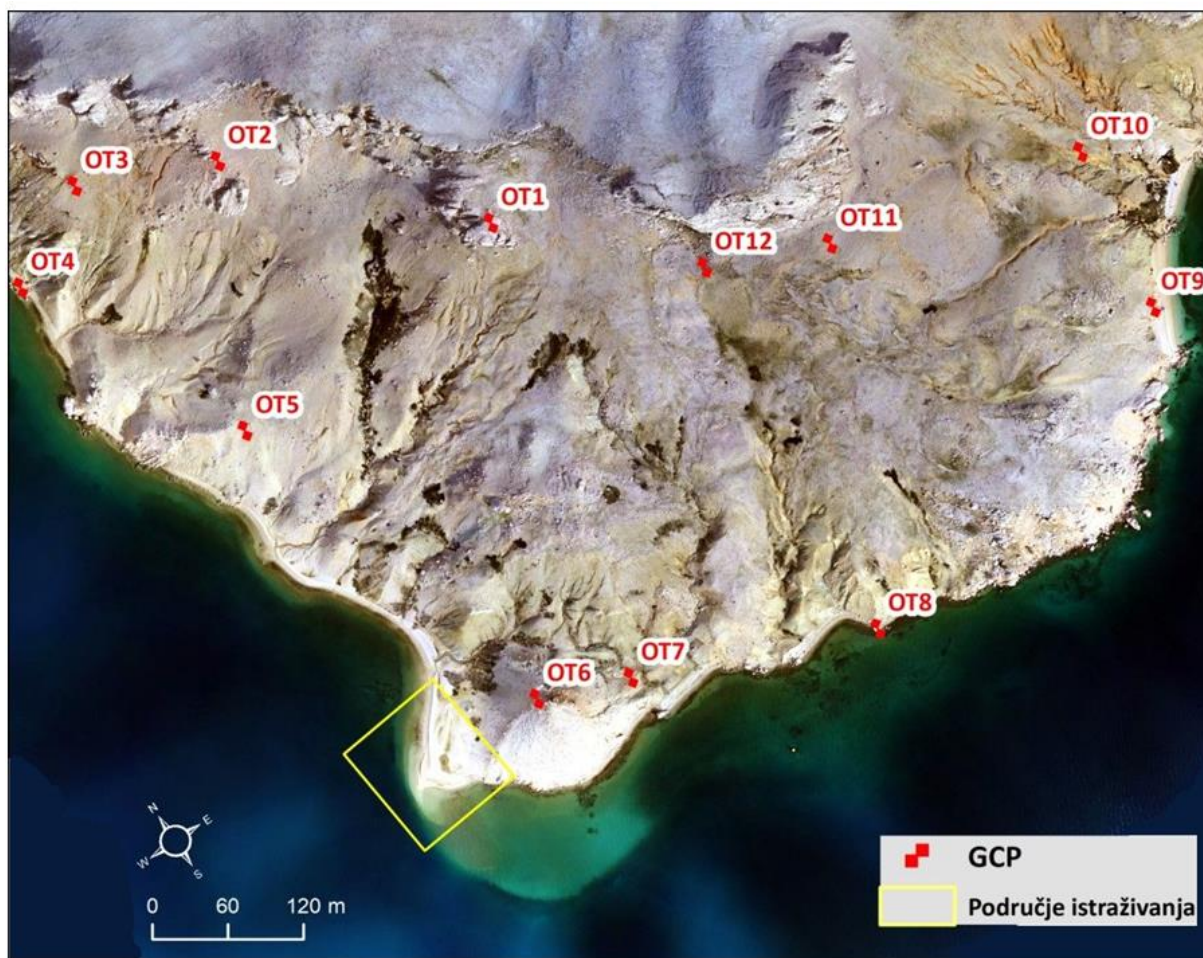
omogućilo usklađivanje koordinata orijentacijskih točaka s koordinatama prikupljenih fotografija.



Slika 20. Označavanje i prikupljanje orijentacijskih točaka

Tablica 3. Koordinate prikupljenih točaka u HTRS96TM i WGS84 koordinatnom sustavu

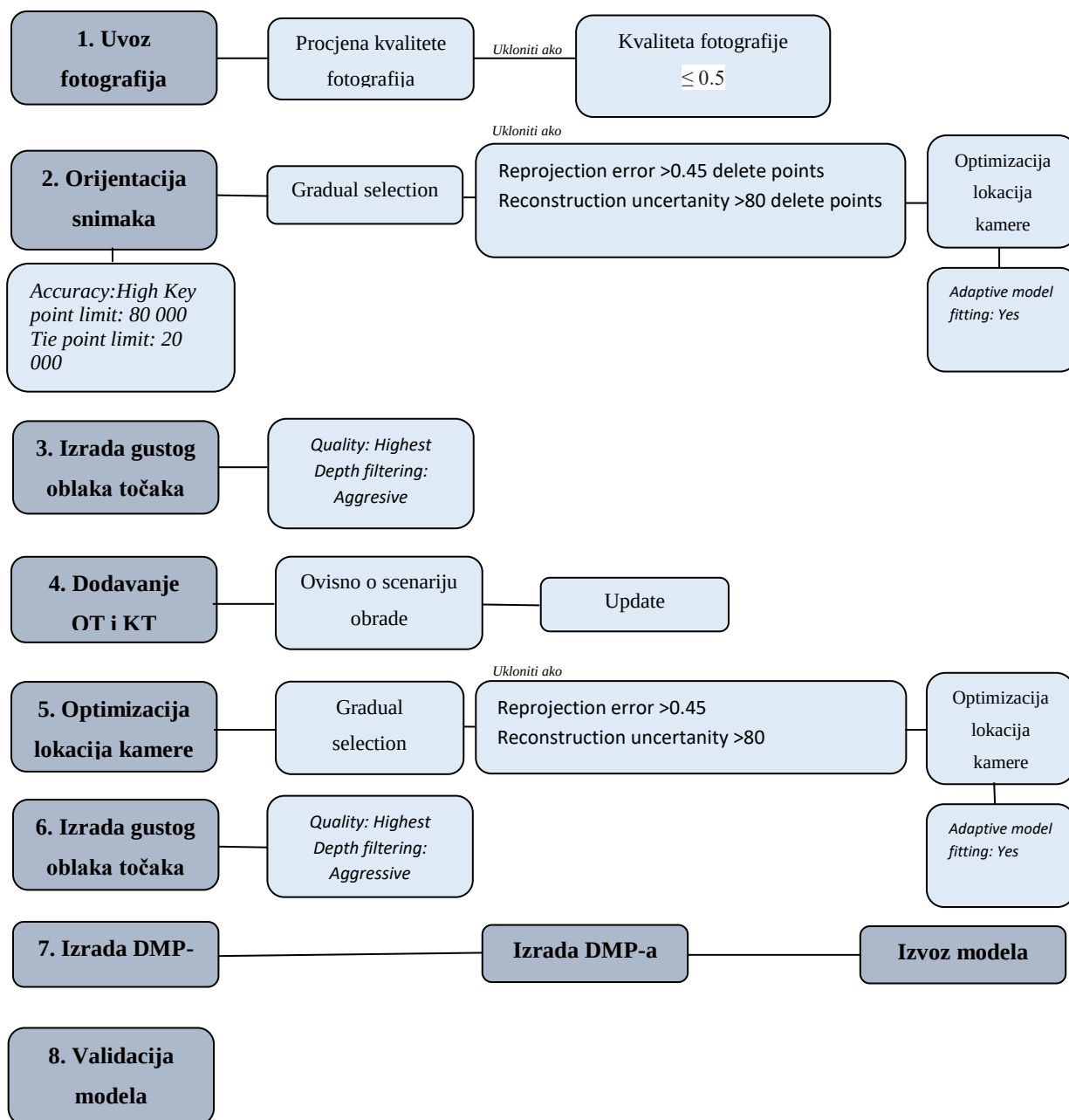
ID	Naziv	HTRS96TM (geoidna visina)			WGS84 (elipsoidna visina)		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	X (°)	Y (°)	Z (m)
1	OT1	385025,71	4928725,11	87,14	15,054441	44,489385	130,66
2	OT2	384995,00	4928945,40	79,75	15,054006	44,491363	123,27
3	OT3	384936,06	4929044,83	48,42	15,053243	44,492248	91,96
4	OT4	384845,39	4929056,53	0,75	15,052101	44,492339	44,26
5	OT5	384802,19	4928849,26	22,31	15,051604	44,490467	65,79
6	OT6	384685,15	4928557,04	20,90	15,050198	44,487819	64,38
7	OT7	384727,24	4928493,34	4,52	15,050741	44,487253	48,03
8	OT8	384833,16	4928323,58	2,27	15,052110	44,485742	45,77
9	OT9	385149,55	4928209,13	4,25	15,056112	44,484763	47,72
10	OT10	385244,47	4928307,24	22,25	15,057283	44,485661	65,75
11	OT11	385105,93	4928467,31	62,59	15,055506	44,487079	106,08
12	OT12	385052,70	4928554,00	75,30	15,054818	44,487850	118,78



Slika 21. Prostorni raspored orijentacijskih točaka

Obrada UAV snimki

UAV snimke obrađene su u najnovijoj verziji *Agisoft Metashape Professional 2.0.1*. Agisoft Metashape napredni je program koji na temelju preklapajućih fotografija stvara visokokvalitetne 3D modele, digitalne modele površina (DMP) (engl. *digital elevation model* - DEM) i digitalni ortofoto (DOF) pri čemu je cijeli proces automatiziran (Agisoft, 2019). Proces obrade snimaka uključivao je osam ključnih koraka (Slika 22).



Slika 22. Koraci u procesu obrade podataka u Agisoft Metashape-u
(modificirano prema Marić, 2020.; Domazetović, 2021.)

Prije obrade prikupljenih fotografija bilo je potrebno provjeriti postavke koje se odnose na učitavanje podataka kamere (preciznost lokacije, kalibracija, orijentacija) iz XMP meta podataka u *Tools/Preference/Advanced*.

Prvi korak obrade fotografija odnosio se na dodavanje snimljenih fotografija i automatsku provjeru njihove kvalitete (engl. *image quality*). Procjena kvalitete fotografija ključan je korak fotogrametrijskog procesa jer mutne i loše fokusirane fotografije negativno utječu na povezivanje (Marić, 2020). Preporučuje se uklanjanje fotografija s kvalitetom

manjom od 0.5 (Agisoft, 2019). Procijenjena je kvaliteta za svaku snimljenu fotografiju pri čemu je za oba UAV snimanja najniža vrijednost iznosila 0.75, a najviša 0.92.

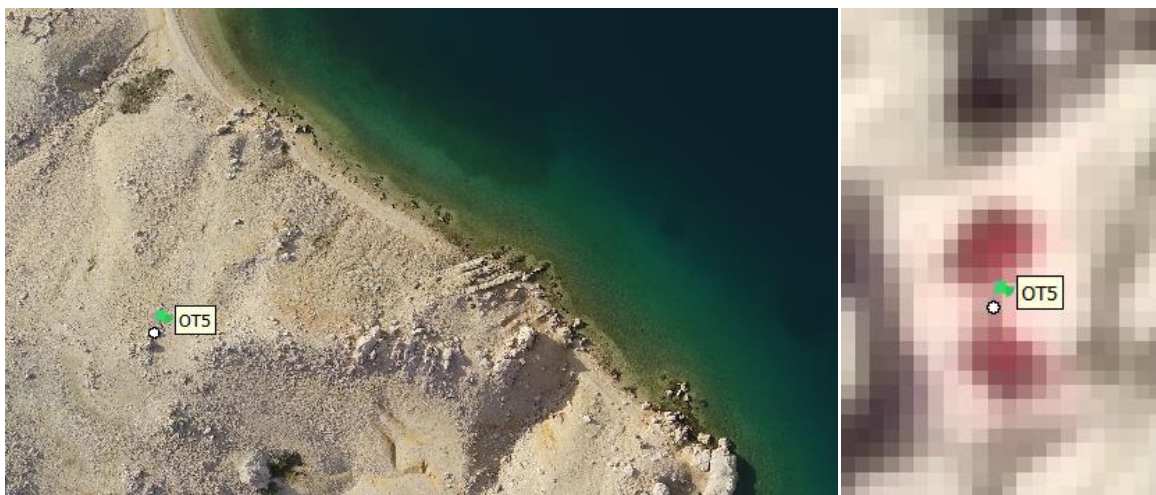
Nakon procjene kvalitete fotografija slijedilo je rješavanje problema relativne orijentacije, odnosno povezivanje fotografija (engl. *align photos*). Ovaj korak odnosi se na utvrđivanje lokacije i orijentacije fotografija pri čemu se kreira rijetki oblak točaka koji predstavlja vezne točke (Marić, 2020). Parametri u ovom koraku su: *accuracy*, *key point limit* i *tie point limit*. Postavljanje veće točnosti omogućava preciznije određivanje položaja kamere u prostoru. Stoga je, vrijednost postavljena za *accuracy* bila *high*. *Key point limit* odnosi se na gornju granicu broja veznih točaka na svakoj fotografiji pri relativnoj orijentaciji. Postavljanje nule omogućuje pronalazak maksimalnog broja veznih točaka što se može negativno odraziti na pouzdanost točaka. Vrijednost postavljena za *key point limit* iznosila je 80 000. Posljednji parametar koji je bilo potrebno postaviti u ovom koraku je *tie point limit*. Postavljena vrijednost iznosila je 20 000, a predstavlja gornju granicu točaka koje se mogu identificirati na najmanje dvije fotografije (Agisoft, 2019). U ovom koraku, u oba intervalna modela, izvedeno je oko 800 000 veznih točaka (Slika 23).



Slika 23. Izvedeni rijetki oblak točaka (studeni, 2022.)

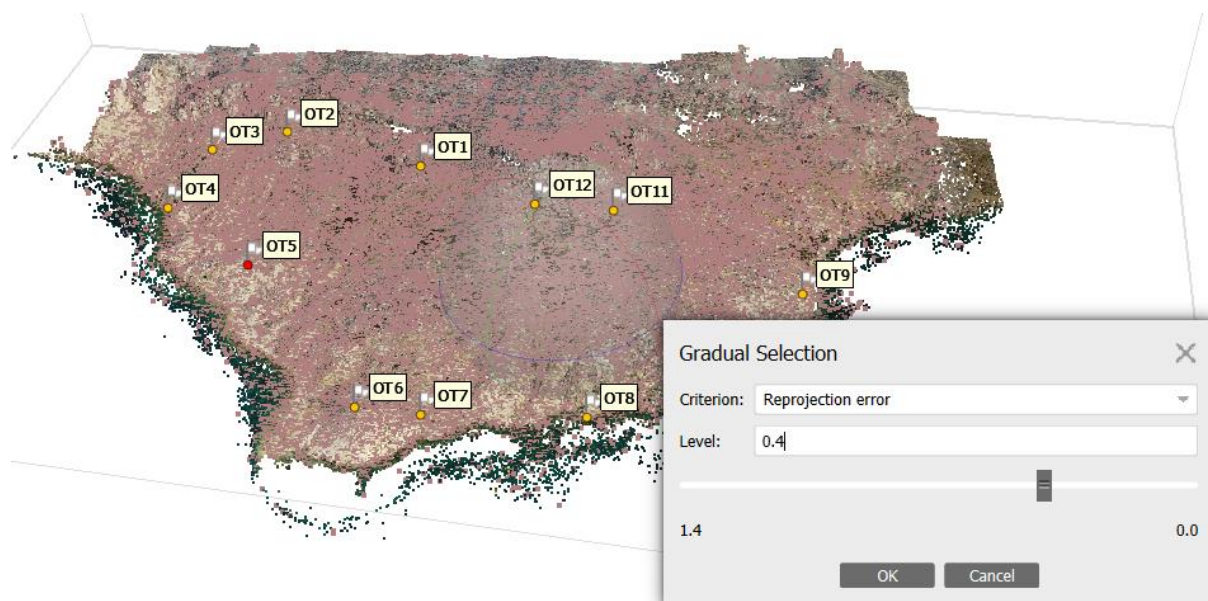
Nadalje, korištenjem alata gradualne selekcije (engl. *gradual selection*) smanjena je reprojekcijska pogreška (engl. *reprojection error*). Postavljene su odabrane vrijednosti za parametar nesigurnosti rekonstrukcije (engl. *reconstruction uncertainty*) i pogreške reprojekcije (engl. *reprojection error*). Filtrirane su i uklonjene vezne točke s reprojekcijskom pogreškom većom od 0,45 i nesigurnosti rekonstrukcije većom od 80. Nakon uklanjanja točaka napravljena je optimizacija kamere (engl. *optimize camera*).

Potom su dodane orijentacijske točke (GCP i CP), ovisno o scenariju obrade (Slika 24). GCP služe za apsolutnu orijentaciju modela dok CP za provjeru točnosti dobivenih modela. Prilikom dodavanja markera, primijenjena je opcija *Filter Photos by Marker*. Pri obradi intervalnih fotografija korištene su iste koordinate orijentacijskih točaka kako bi se zadržala ujednačenost i točnost apsolutne orijentacije modela.



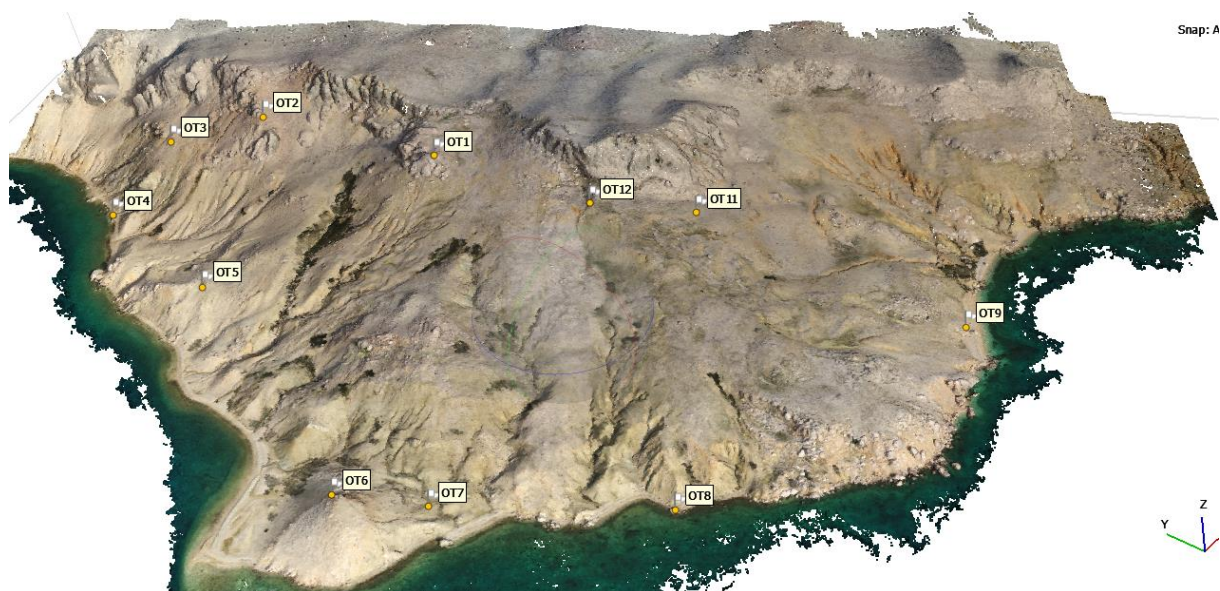
Slika 24. Primjer označavanja markera

Nakon dodavanja svih markera napravljeno je ažuriranje (engl. *update*) položaja rijetkog oblaka točaka, odnosno smještaj u zadani globalni koordinatni sustav i optimizacija lokacija kamere. Potom su ponovno uklonjene točke s reprojekcijskom pogreškom većom od 0,45 i nesigurnosti rekonstrukcije većom od 80 (Slika 25) te je napravljena optimizacija lokacija kamere.



Slika 25. Gradualna selekcija veznih točaka

Sljedeći korak je uključivao izgradnju gustog oblaka točaka (engl. *Build Dense Cloud*) (Slika 26) i mreže poligona (engl. *arbitrary*). Za generiranje gustog oblaka točaka korišteni su parametri *highest quality* i *aggressive deep filtering*. Zatim je napravljena tekstura poligonske mreže (engl. *Build texture*).

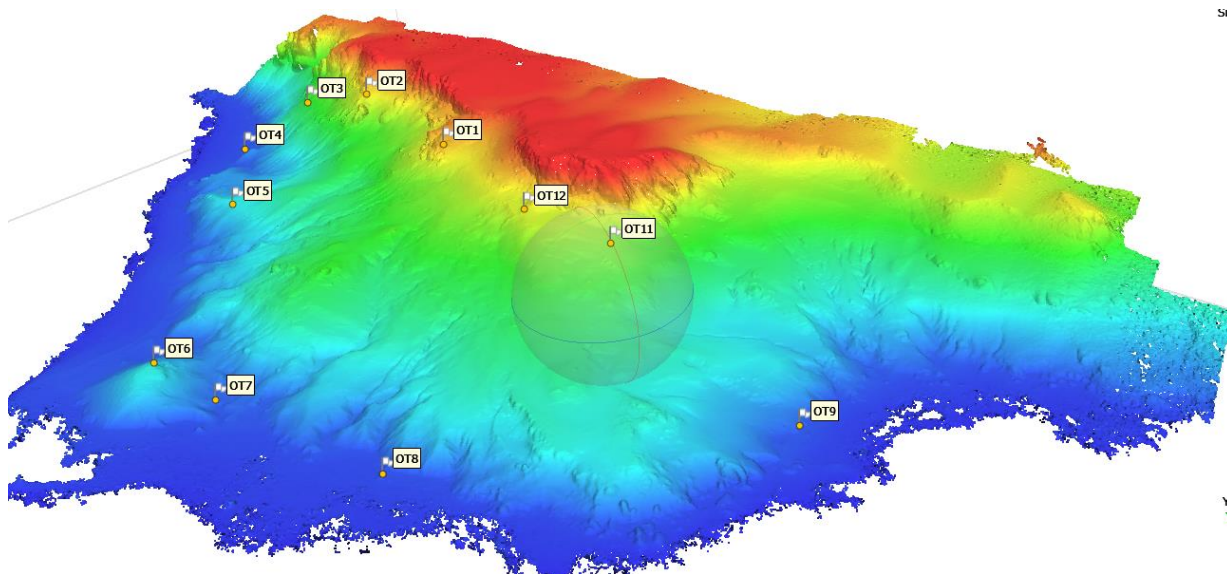


Slika 26. Primjer gustog oblaka točaka

Slijedom navedenih koraka, iz gustog oblaka točaka, generirani su digitalni modeli površina (engl. *Build DEM*) (Slika 28) i digitalni ortofoto snimci (engl. *Build orthomosaic*) (Slika 27). Modeli su zatim eksportirani u WGS84 i HTRS96 koordinatnom sustavu s ciljem daljnje analize.



Slika 27. Primjer generiranog 3D modela šireg područja



Slika 28. Primjer generiranog DMP-a

3.3. Detekcija i kvantifikacija prostorno-vremenskih promjena

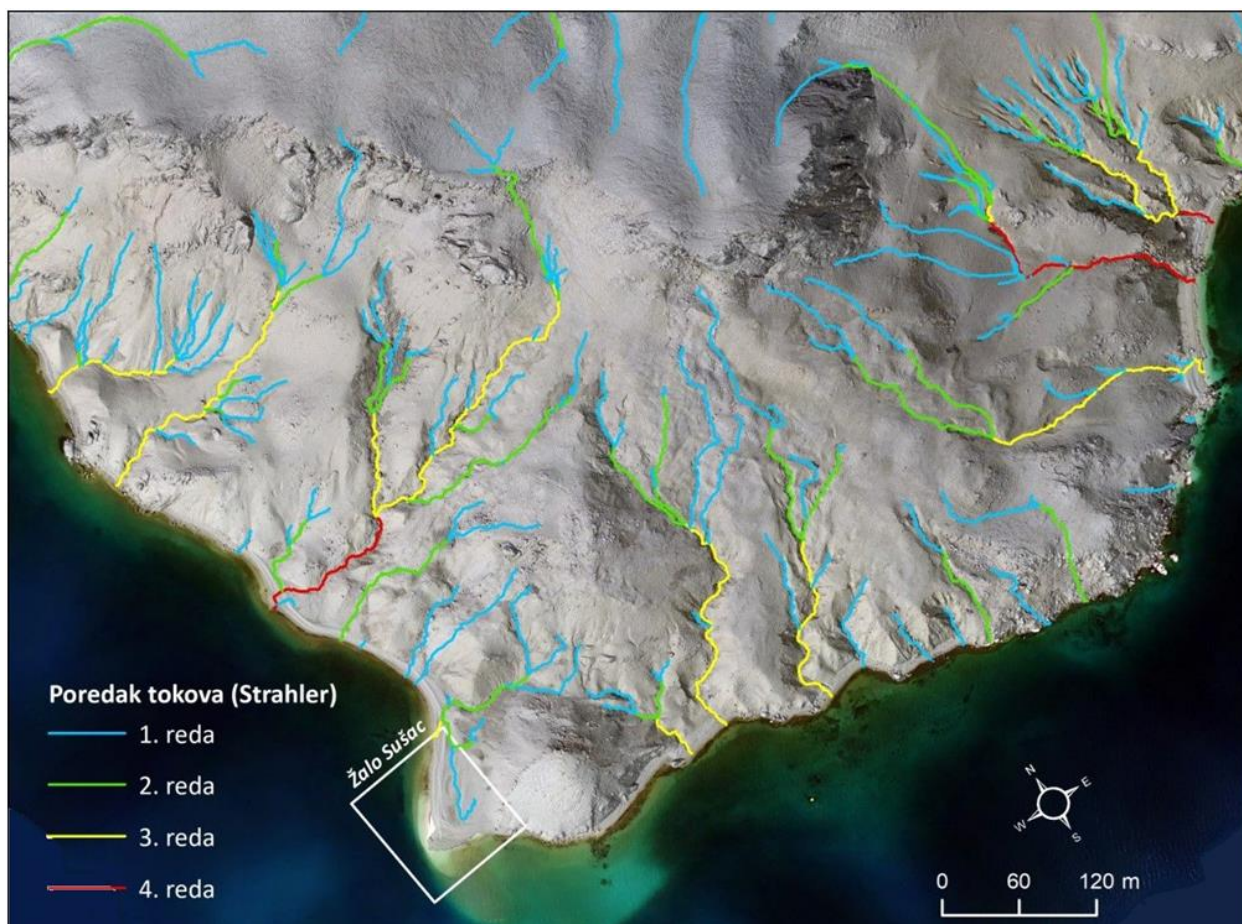
Detekcija i kvantifikacija volumetrijskih šestomjesečnih promjena izvedene je u *Geomorphic Change Detection 7* (GCD 7) nadogradnji za softver ArcGIS 10.1. Na temelju intervalnih digitalnih modela površine (DMP), izvedenih klasičnim fotogrametrijskim pristupom obrade (9 OT i 3 KT) dobiven je digitalni model diferencije (DMD). DMD omogućuje detekciju i kvantifikaciju prostorno-vremenskih promjena. Proces generiranja DMD-a ovisi o kvaliteti ulaznih modela. Prilikom utvrđivanja intenziteta promjene GCD 7 uzima u obzir nepouzdanost modela, uvjetovanu artefaktima i pogreškama u modelima. U slučaju da se nepouzdanost ne primijeni detektirana promjena može biti rezultat pogrešaka u modelu, a ne stvarnih prostorno-vremenskih promjena. Nepouzdanost u procesu detektiranja promjena odnosi se na utvrđivanje minimalnog praga detekcije (engl. *minimal level of detection threshold - minLoD*), odnosno minimalnu promjenu visine koja se može smatrati stvarnom promjenom. U sklopu diplomskog rada parametar nesigurnosti postavljen je sukladno izračunatim pogreškama modela: vrijednost 4.24 cm za DMP (2022) i 4.36 cm za DMP (2023). Nadalje, parametar nesigurnosti može se odrediti kao uniformna varijabla koja ima jedinstvenu vrijednost na intervalnom modelu ili kao prostorno promjenjiva varijabla čija se vrijednost, unutar intervalnog modela, mijenja sukladno vertikalnoj raščlanjenosti, nagibu, gustoći prikupljenih točaka, itd. GCD 7 omogućava provjeru rezultata izrađenog DMD-a na temelju praga vjerojatnosti (engl. *probabilistic thresholding*). Vrijednosti razine pouzdanosti kreću se od 0 do 1 pri čemu vrijednost 0 označava najmanju moguću pouzdanost detektiranih

promjena, a vrijednost 1 najveću. DMD generiran na temelju postavljene razine pouzdanosti 0 u pravilu sadrži sve detektirane promjene pri čemu je nemoguće razlikovati stvarne promjene od promjena koje su rezultat nesigurnosti modela (Riverscapes Consortium, 2020; Domazetović, 2021). Za detekciju i kvantifikaciju promjena u sklopu ovog rada korišten je prag vjerojatnosti od 0,95 koji je korišten i u većini analizirane literature.

3.4. Izvođenje drenažne mreže

Drenažna mreža šireg područja Metajne generirana je na temelju digitalnog modela površine (DMP) izvedenog iz zračnih snimaka prikupljenih u studenom, 2022. godine (Slika 29). Drenažna mreža šireg područja Metajne je izvedena u nekoliko koraka. Korišten je set alata *Hydrology* unutar programa ArcMap 10.8.1. U prvom koraku koristeći alat *Fill* ispunjena su udubljenja u površinskom rasteru radi uklanjanja malih pogrešaka u visinskim podacima. Potom je koristeći alat *Flow Direction* stvoren raster smjera otjecanja od svakog piksela koristeći metodu D8. Izvedeni raster smjera otjecanja služio je kao ulazni podatak u izvođenju rastera akumuliranog toka primjenom alata *Flow Accumulation*. Potencijalni prostori akumulacije vode, odnosno drenažna mreža izvedena je iz rastera akumuliranog toka metodom reklasifikacije gdje je kao granica toka odabrana vrijednost od 85 000 piksela. Potom je alatom *Stream Order* svakom izvedenom dijelu toka dodijeljena numerička vrijednost koja reprezentira hijerarhijski položaj tog segmenta u drenažnoj mreži. Odabrana je Strahlerova metoda određivanja hijerarhije toka, predložena 1952. godine, prema kojoj se hijerarhija toka povećava samo kada se spajaju tokovi istog reda. U završnom koraku drenažna mreža je transformirana u vektorski (linijski) podatak koristeći alat *Stream to Feature*. Za potrebe vizualizacije linijski podatak drenažne mreže je vizualno uglačen koristeći alat *Smooth Line*. Odabran je algoritam za uglačavanje PEAK³, a parametar tolerancije zaglađivanja je postavljen na 0.5 m. Izvođenje drenažne mreže napravljeno je s ciljem povezivanja rezultata volumetrijskih promjena šireg područja s utvrđenom hijerarhijom tokova, odnosno modelom akumulacije. Navedeno će biti tema budućih istraživanja.

³ Polynomial Approximation with Exponential Kernel



Slika 29. Drenažna mreža šireg područja Meatajne

3.5. Analiza promjene površine i oblika obalnog područja žala Sušac

Površina obalnog područja žala Sušac za proučavano razdoblje (1959. – 2023.) izvedena je iz poligona koji su vektoriziran koristeći alat *Trace tool* u *Editoru* prateći izvedene obalne linije i okvir užeg područja istraživanja.

Napravljena je usporedba po ukupnoj površini obalnog područja te srednjem indeksu oblika (engl. MSI). Srednji indeks oblika (engl. *mean shape indeks* - MSI) je geometrijski indeks koji se koristi za opisivanje oblika značajki u skupovima prostornih podataka, uglavnom poligonskih slojeva u analizama krajobrazne strukture. Mjera je složenosti lokalnog oblika koja kvantificira koliko određeno područje odstupa od kruga. Obično se koristi u morfometrijskoj analizi, posebice u području geologije i geomorfologije. Raspon MSI vrijednosti obično iznosi od 0 do pozitivne beskonačnosti. Predstavlja omjer promatranog opsega i opsega kruga s istom površinom kao promatrani oblik. Savršeni krug ima MSI vrijednost 1 jer su njegov promatrani opseg i opseg ekvivalentnog kruga isti. Za nepravilne poligone vrijednost MSI može biti veća od 1. Veći MSI označava složeniji oblik ili odstupanje od kruga. Kako se MSI vrijednost približava beskonačnosti, to sugerira oblike s

izrazito nepravilnim granicama ili izduženim obilježjima. MSI je izračunat u ArcMap ekstenziji V-LATE⁴ koja je namijenjena za vektorsku analizu krajobraza, a razvijena je u okviru SPIN projekta. V-LATE pruža odabrani skup najčešćih metrika za analizu osnovnih strukturnih obilježja elemenata. Organizirane su prema glavnim aspektima analize strukturnih uzoraka i stoga koriste metriku sedam različitih kategorija (analiza područja, oblika, unutrašnjosti, rubova, blizine, raznolikosti i podjela). Ove skupine metrika općenito opisuju oblik, konfiguraciju i sastav krajobraznog uzorka i smatra se da pokrivaju glavne aspekte strukturne procjene krajobraza.

3.6. Prikupljanje i obrada meteoroloških podataka

Za analizu utvrđenih linearnih i volumetrijskih promjena žala Sušac bilo je potrebno prikupiti meteorološke podatke. Od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) su zatraženi meteorološki podaci s ciljem njihova stavljanja u korelaciju s utvrđenim promjenama. Zatraženi su podaci za jačinu i smjer vjetra, dnevnu i mjesečnu količinu oborina, tlak zraka, stanje mora i visinu valova za sedam najbližih glavnih i automatskih meteoroloških postaja: Pag, Novalja, Metajna, Rab, Karlobag, Zadar i Mali Lošinj. Meteorološki podaci o smjeru i brzini vjetra, za postaje Rab, Mali Lošinj i Zadar obrađeni su u *Microsoft Excel 2016* softveru. Na temelju podataka napravljene su ruže vjetrova za proučavano šestomjesečno razdoblje te za zadnji mjesec. Izrađene vjetrulje pomogle su u analizi i interpretaciji detektiranih šestomjesečnih promjena obalne linije i volumena materijala.

3.6.1. Indeks zaklona od vjetra

S obzirom na uočene manjkavosti meteoroloških podataka DHMZ-a izveden je indeks zaklona od vjetra (engl. *Wind Shelter Index*) s ciljem stavljanja u odnos s utvrđenim prostorno-vremenskim promjenama. Indeks zaklona od vjetra koristi se za izračunavanje topografskog zaklona od vjetra na temelju digitalnog modela površina (DMP). Vrijednosti indeksa veće od 1 odnose se na područja koja su izložena utjecaju vjetra dok vrijednosti ispod 1 ukazuju na područja koja se nalaze u sjeni vjetra. Modeli za vjetrove buru i lebić napravljeni su iz postojećeg DMP-a prostorne rezolucije 5 m (Domazetović, 2021). Za generiranje modela korišten je Wind Shelter Indeks iz SAGA GIS-a. Za model bure korišten je azimut 45° (engl. *Wind Direction*) uz toleranciju (engl. *tolerance*) ±10 stupnjeva dok je za model lebića korišten azimut 225° uz toleranciju ±10 stupnjeva.

⁴ Vector-based Landscape Analysis Tools Extension

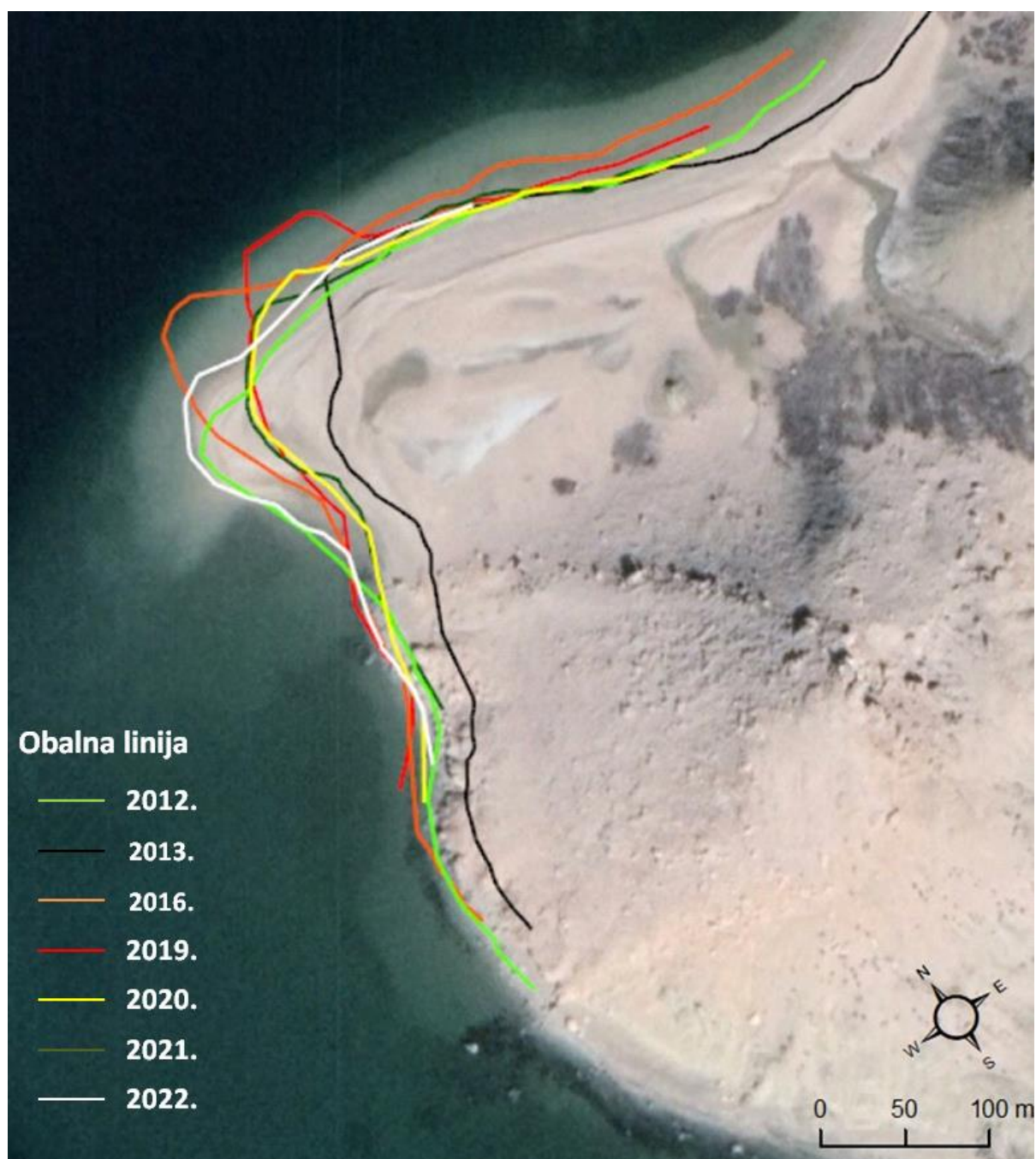
4. REZULTATI I RASPRAVA

S obzirom na sveobuhvatnost i kompleksnost provedenih istraživanja, rezultati istraživanja podijeljeni su u nekoliko odlomaka:

- 1) **Preliminarni rezultati** - linearni prostorno-vremenski pomak obalne linije detektiran na temelju dostupnih *Google Earth* satelitskih snimaka.
- 2) **Rezultati procjene apsolutne ukupne točnosti** (a) intervalnih modela izvedenih iz DGU snimaka te (b) apsolutne ukupne točnosti izravnog georeferenciranja intervalnih UAV modela.
- 3) **Detektirane prostorno-vremenske promjene vezane za praćenje obalne dinamike** (a) linearne, arealne i volumetrijske promjene detektirane unutar prostora žala Sušac tijekom višegodišnjeg razdoblja (1959. – 2023.) te (b) odabranog šestomjesečnog razdoblja (studenj, 2022. – lipanj, 2023.)
- 4) **Obrađeni meteorološki parametri** - (a) prikupljeni s obližnjih meteoroloških postaja DHMZ-a te (b) izrađeni model izloženosti vjetru

4.1. Preliminarni rezultati

Preliminarna analiza višegodišnjeg linearnog pomaka obalne linije, koja je provedena na temelju *Google Earth* satelitskih snimaka, omogućila je odabir optimalnog žala za praćenje pomaka obalne linije. Analiza je provedena na širem području poluotoka Metajne, pri čemu su na temelju *Google Earth* snimaka izrađeni modeli promjena obalne linije za nekoliko analiziranih žala. Na temelju provedene preliminarne analize utvrđeni pomak obalne linije žala Sušac mjestimice je bio iznad 10 m uz maksimalnu zabilježenu vrijednost od oko 30 m (Slika 30). Navedeno je poslužilo kao jedan od razloga zbog čega je žalo Sušac odabrano kao područje istraživanja za detaljnije praćenje višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena.



Slika 30. Preliminarni model linearnih pomaka obalne linije žala Sušac

4.2. Rezultati procjene apsolutne ukupne točnosti intervalnih modela

4.2.1. Procjena točnosti georeferenciranih snimaka DGU-a

U tablici 4. i 5. prikazani su metrički pokazatelji točnosti, odnosno pogreške (RMSE, MAE) za georeferencirane snimke DGU-a. Pogreška intervalnih modela izračunata je za sve točke te samo za točke na obali, odnosno one u blizini obalne linije. Cilj provjere bio je ispitati točnost modela s posebnim naglaskom na obalni prostor s obzirom da je ono primarno područje izvođenja prostorno-vremenskih analiza. Bolja točnost modela, ako se promatraju

točke na obali, uvjetovana je načinom određivanja veznih točaka. Naime, na obali su prisutni veći kameni blokovi koji su omogućili preciznije označavanje veznih točaka dok prema unutrašnjosti prevladava homogenija litologija i vertikalno raščlanjeniji prostor zbog čega je bilo teže odrediti vezne točke. U oba scenarija provjere najveću srednju kvadratnu pogrešku ima snimak iz 2001. godine koja iznosi 2.16 m za unutrašnjost te 2.28 m za obalni prostor. Razlog tome je lošija kvaliteta aerofotogrametrijskog snimka i prostorna rezolucija modela koja iznosi 2.998 m. Stoga, model za 2001. godinu nije korišten za analizu promjena. Procijenjena točnost intervalnih modela, na temelju točaka uz obalu, korištena je kao parametar nesigurnosti pri detekciji linearnih prostorno-vremenskih promjena obalne linije.

Tablica 4. Rezultati procjene točnosti intervalnih modela za sve točke

Godina	Broj kontrolnih točaka	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	MEAN RMSE (m)	Prostorna rezolucija (m)
1959.	19	0,85	1,00	0,93	0,53
1977.	15	1,64	1,23	1,44	0,87
1997.	18	1,30	1,14	1,22	0,74
2001.	15	1,95	2,37	2,16	3,00
2005.	19	1,26	0,65	1,00	0,21
2006.	22	0,62	0,89	0,76	0,18
2007.	24	0,89	1,10	1,00	0,76
2011.	30	1,44	1,42	1,43	0,55
2014.	22	1,06	1,00	1,03	0,58
2020.	30	0,69	0,42	0,55	0,45

Godina	Broj kontrolnih točaka	MAD X (m)	MAD Y (m)	MEAN MAD (m)	Prostorna rezolucija (m)
1959.	19	0,61	0,77	0,69	0,53
1977.	15	0,86	0,65	0,76	0,87
1997.	18	0,85	0,90	0,88	0,74
2001.	15	1,18	1,72	1,45	3,00
2005.	19	0,72	0,46	0,59	0,21
2006.	22	0,45	0,60	0,53	0,18
2007.	24	0,70	0,88	0,79	0,76
2011.	30	0,88	0,74	0,81	0,55
2014.	22	0,72	0,76	0,74	0,58
2020.	30	0,44	0,28	0,36	0,45

Tablica 5. Rezultati procjene točnosti intervalnih modela za točke na obali

Godina	Broj kontrolnih točaka	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	MEAN RMSE (m)	Prostorna rezolucija (m)
1959.	11	0,92	0,81	0,87	0,53
1977.	12	0,82	0,38	0,60	0,87
1997.	9	0,43	0,52	0,48	0,74
2001.	10	2,13	2,43	2,28	3,00
2005.	11	0,94	0,52	0,73	0,21
2006.	8	0,45	0,63	0,54	0,18
2007.	9	0,49	1,09	0,79	0,76
2011.	13	0,33	0,36	0,35	0,55
2014.	10	0,27	0,56	0,83	0,58
2020.	14	0,22	0,27	0,25	0,45

Godina	Broj kontrolnih točaka	MAD X (m)	MAD Y (m)	MEAN MAD (m)	Prostorna rezolucija (m)
1959.	11	0,62	0,60	0,61	0,53
1977.	12	0,51	0,29	0,40	0,87
1997.	9	0,36	0,45	0,41	0,74
2001.	10	1,23	1,69	1,46	3,00
2005.	11	0,55	0,40	0,48	0,21
2006.	8	0,30	0,37	0,34	0,18
2007.	9	0,43	0,93	0,68	0,76
2011.	13	0,24	0,28	0,26	0,55
2014.	10	0,32	0,47	0,40	0,58
2020.	14	0,18	0,21	0,20	0,45

4.2.2. Procjena točnosti UAV intervalnih modela

U nastavku su prikazani fotogrametrijski modeli (DOF, DMR) generirani na temelju prikupljenih aerofotogrametrijskih snimaka u studenom 2022. i lipnju 2023. Prema izvedenom izvješću površina snimljenog područja iznosila je ukupno 1,03 km². Prostorna rezolucija DMR-a i DOF-a iznosila je 4.24 cm za prvo, odnosno 4.43 cm za drugo UAV fotogrametrijsko snimanje. U konačnici su na temelju prikupljenih podataka izvedena dva scenarija obrade:

a) **Scenarij 1** - sve GNSS točke korištene su za orijentaciju modela (12 GCP) - modeli izrađeni na ovaj način korišteni su kao referentni modeli za fino georeferenciranje DGU snimaka te za izvođenje obalne linije za 2022 i 2023. godinu

b) **Scenarij 2** - devet GNSS točaka korišteno je za orijentaciju, a tri za provjeru točnosti modela (9 GCP i 3 CP) - modeli primijenjeni za volumetrijske analize užeg područja (žalo Sušac).

U nastavku su rezultati procijenjene apsolutne točnosti izrađenih intervalnih UAV modela izrađenih na temelju scenarija 2:

a) Scenarij 2 (studeni, 2022)

U ovom scenariju devet točaka korišteno je za orijentaciju modela i tri za provjeru. Točnost X koordinate iznosila je 1,88 cm, Y koordinate 2,26 cm, a Z koordinate 3,06 cm. Ukupna točnost modela izvedenog ovim načinom iznosi 4,24 cm.

Tablica 6. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (9 GCP i 3 CP) - studeni, 2022.

	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
3 CP	OT2	-3,03	1,03	-0,38	3,22	1,18
	OT5	0,50	3,62	2,93	4,68	1,17
	OT11	-1,11	-1,05	4,39	4,65	1,24
TOTAL		1,88	2,26	3,06	4,24	1,21

a) Scenarij 2 (lipanj, 2023)

Za izvođenje modela iz UAV snimaka prikupljenih u drugom UAV snimanju korišten je jednak broj orijentacijskih i kontrolnih točaka kao u prethodnom modelu. Iste točke su postavljene kao orijentacijske i kontrolne te su korištene iste koordinate točaka. Točnost X koordinate iznosila je 0,58 cm, Y koordinate 2,00 cm te Z koordinate 3,83 cm. Ukupna točnost modela nešto je manja nego u prethodnom modelu, a iznosi 4,36 cm.

Tablica 7. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (9 GCP i 3 CP) - lipanj, 2023.

	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
3 CP	OT2	-0,76	-1,20	1,97	2,43	1,81 (31)
	OT5	-0,59	-1,68	-5,40	5,68	1,10 (24)
	OT11	0,27	-2,78	3,33	4,34	0,62 (62)
TOTAL		0,58	2,00	3,83	4,36	1,15

Foogrametrijski modeli - izravno georeferenciranje

U nastavku su prikazani rezultati UAV modela izvedenih izravnim georeferenciranjem te postupnim dodavanjem orijentacijskih točaka. Testirana su četiri scenarija obrade za oba snimanja (lipanj, 2022 i studeni, 2023):

A) Jedanaest točaka korišteno je za procjenu točnosti modela (11 CP)

B) Deset točaka korišteno je za procjenu točnosti (10 CP) i jedna za orijentaciju modela (1 GCP)

C) Devet točaka korišteno je za procjenu točnosti (9 CP) i dvije za orijentaciju modela (2 GCP)

D) Osam točaka korišteno je za procjenu točnosti (8 CP) i tri za orijentaciju modela (3 GCP)

A) Model 11 CP (studenj, 2022)

U ovom scenariju jedanaest točaka korišteno je za provjeru točnosti modela. Prostorna rezolucija DMR-a i DOF-a iznosi 4,76 cm. Točnost X koordinate iznosi 3,52 cm, Y koordinate 4,78 cm i Z koordinate 7,47 cm. Ukupna točnost modela izvedenog ovim načinom iznosi 9.54 cm. Nadalje, u tablici 8. prikazani su rezultati za sve ostale scenarije u kojim se postupno smanjuje broj točaka za provjeru (CP), a povećava broj orijentacijskih točaka (GCP).

Tablica 8. Točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem (studenj, 2022.)

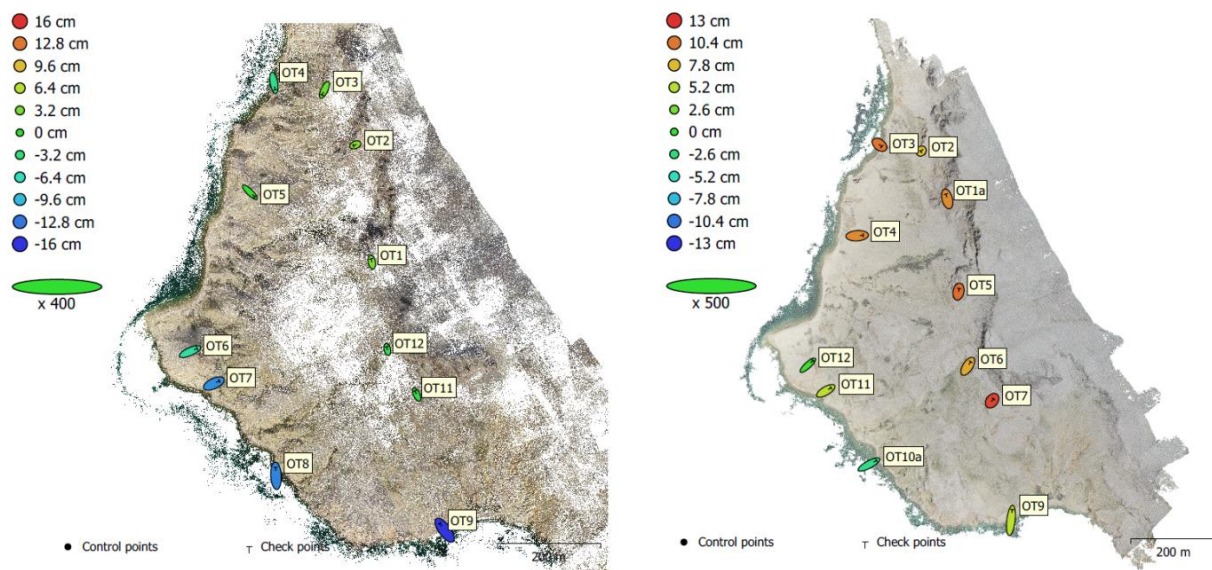
	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
(A) 11 CP	OT1	-0,65	3,15	3,41	4,69	0,67 (22)
	OT2	-1,94	-0,76	4,02	4,53	0,74 (25)
	OT3	-2,40	-5,02	2,58	6,13	0,73 (35)
	OT4	1,24	-6,84	-4,07	8,06	0,99 (50)
	OT5	4,84	-4,70	0,31	6,75	0,58 (56)
	OT6	6,81	3,02	-5,18	9,07	0,34 (49)
	OT7	5,36	2,52	-11,63	13,05	0,45 (56)
	OT8	-0,45	8,24	-12,17	14,70	0,72 (55)
	OT9	-4,79	6,57	-15,78	17,75	0,78 (48)
	OT11	-1,68	3,58	-1,15	4,12	0,37 (28)
	OT12	-0,63	2,69	-1,46	3,13	0,55 (24)
	TOTAL	3,52	4,78	7,47	9,54	0,66
(B) 10 CP 1 GCP	TOTAL	3,79	5,09	7,07	9,51	0,89
(C) 9 CP 2 GCP	TOTAL	2,51	4,11	6,37	7,99	0,94
(D) 8 CP 3 GCP	TOTAL	2,24	3,39	6,57	7,72	0,97

A) Model 11 CP (lipanj, 2023)

Model izveden izravnim georeferenciranjem na temelju UAV snimaka iz drugog UAV snimanja ima ukupnu točnost od 10,01 cm. Točnost za X koordinatu iznosi 3,65 cm, za Y 4,26 cm te za Z koordinatu 8,29 cm. Prostorna rezolucija DOF-a i DEM-a iznosi 4,89 cm. Nadalje, u tablici 9. prikazani su rezultati za sve ostale scenarije u kojim se postupno smanjuje broj točaka za provjeru (CP), a povećava broj orijentacijskih točaka (GCP).

Tablica 9. Točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem (lipanj, 2023)

	Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
(A) 11 CP	OT1	-1,18	4,47	9,61	10,66	4,05 (23)
	OT2	-0,46	-0,45	7,60	7,63	3,41 (31)
	OT3	2,13	-1,66	10,43	10,77	1,95 (51)
	OT4	5,66	0,38	9,64	11,19	0,92 (50)
	OT5	0,57	2,92	10,77	11,17	1,02 (24)
	OT6	2,71	4,23	8,48	9,85	0,77 (28)
	OT7	1,32	1,69	12,30	12,48	0,82 (31)
	OT8	1,17	10,23	5,30	11,58	0,85 (54)
	OT9	7,00	3,77	-3,16	8,56	1,87 (54)
	OT11	4,96	2,89	5,25	7,78	0,49 (62)
	OT12	4,85	4,43	0,50	6,59	0,59 (50)
	TOTAL	3,65	4,25	8,29	10,01	1,68
(B) 10 CP 1 GCP	TOTAL	3,14	3,81	8,79	10,09	1,77
(C) 9 CP 2 GCP	TOTAL	2,93	3,67	5,93	7,56	1,82
(D) 8 CP 3 GCP	TOTAL	3,08	3,79	4,39	6,57	1,86

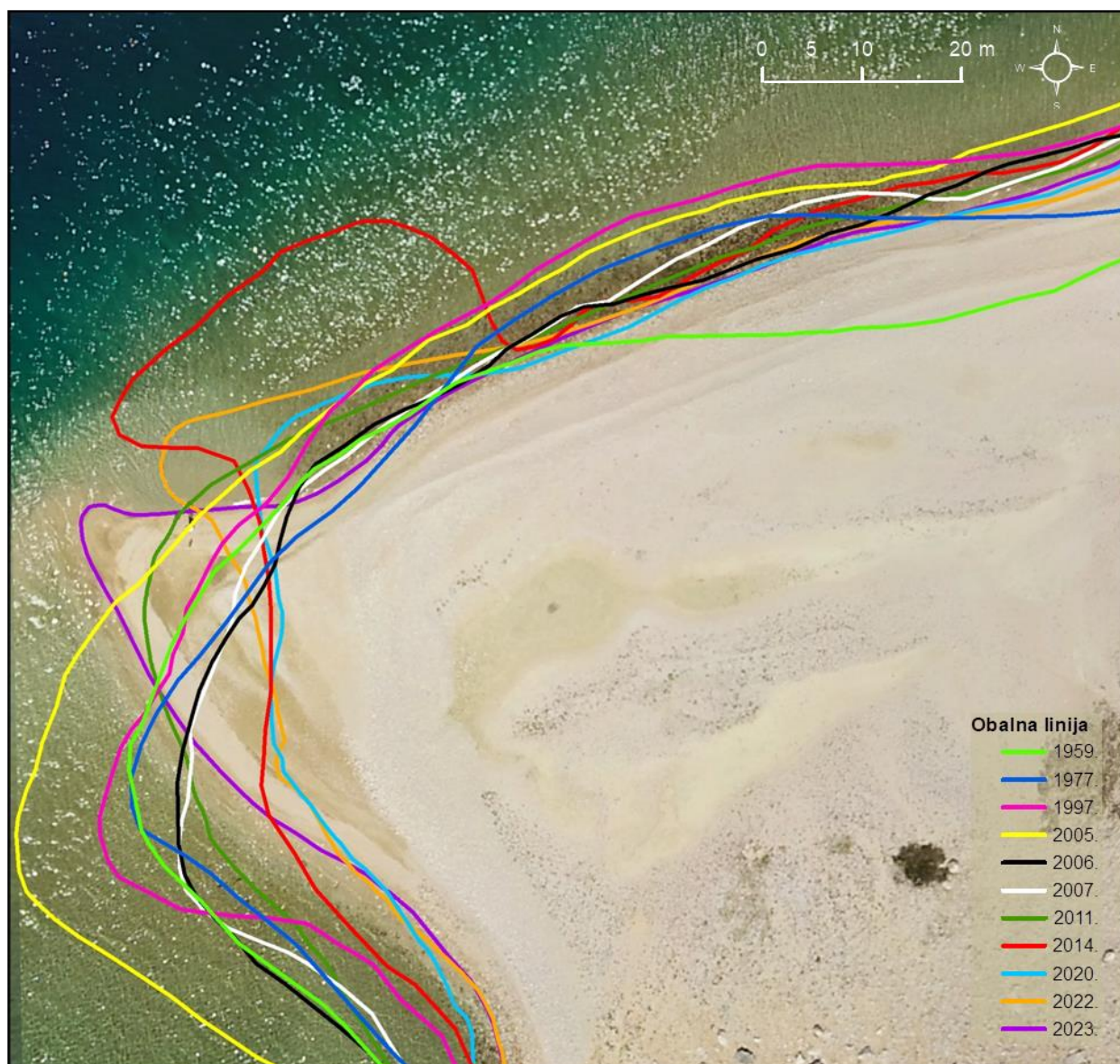


Slika 31. (A) lokacije CP-a i procijenjene pogreške za studeni, 2022 (11 CP); te (B) lokacije CP-a i procijenjene pogreške za lipanj, 2023 (11 CP)

4.3. DETEKTIRANE PROSTORNO-VREMENSKE PROMJENE

4.3.1. Modeli linearnog pomaka obalne linije (1959. – 2023.)

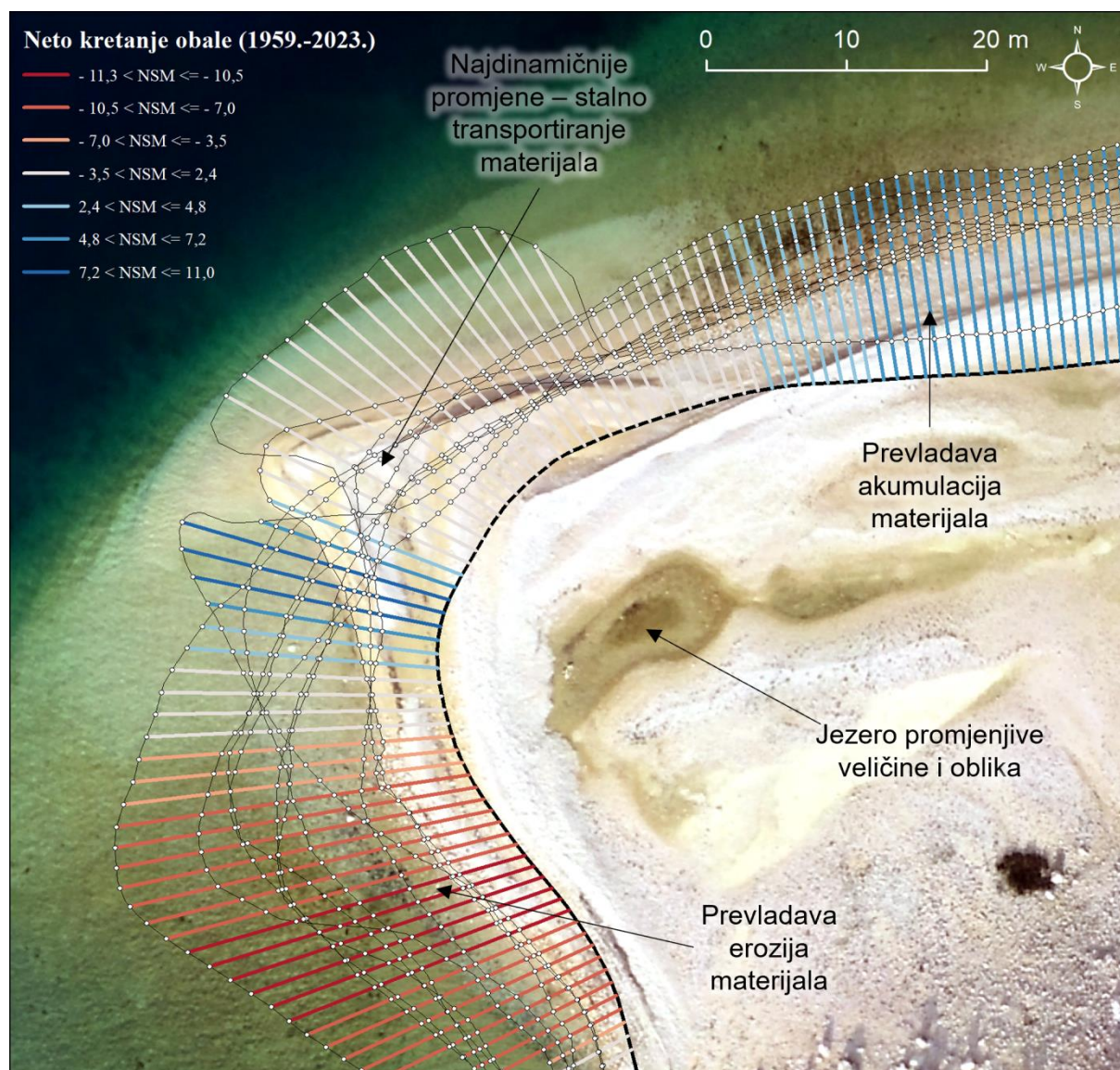
Na temelju obalnih linija izvedenih iz DGU snimaka i UAV DOF-a generirani su modeli linearnog pomaka obalne linije za proučavano višegodišnje razdoblje (1959. – 2023.). Model linearnih pomaka obalne linije ukazuje na složenu višegodišnju obalnu dinamiku užeg područja istraživanja (Slika 32).



Slika 32. Dinamika obalne linije od 1959. do 2023.

Na slici 33. prikazani su rezultati neto kretanja obale (NSM) u razdoblju od 64 godine. Najdinamičnije promjene zabilježene su na vrhu žala na kojem je prisutno kontinuirano transportiranje materijala. Razlog tome može se povezati s njegovim izbočenim položajem

zbog čega je rt Sušac izložen direktnom utjecaju različitih meteoroloških i hidrodinamičkih čimbenika. U promatranom razdoblju JZ i J dio područja istraživanja bilježi negativne vrijednosti NSM-a, odnosno uvlačenje obalne linije ili eroziju materijala. Na S i SZ dijelu detektirane su pozitivne vrijednosti NSM-a koje ukazuju na prirastanje obale ili akumulaciju materijala.



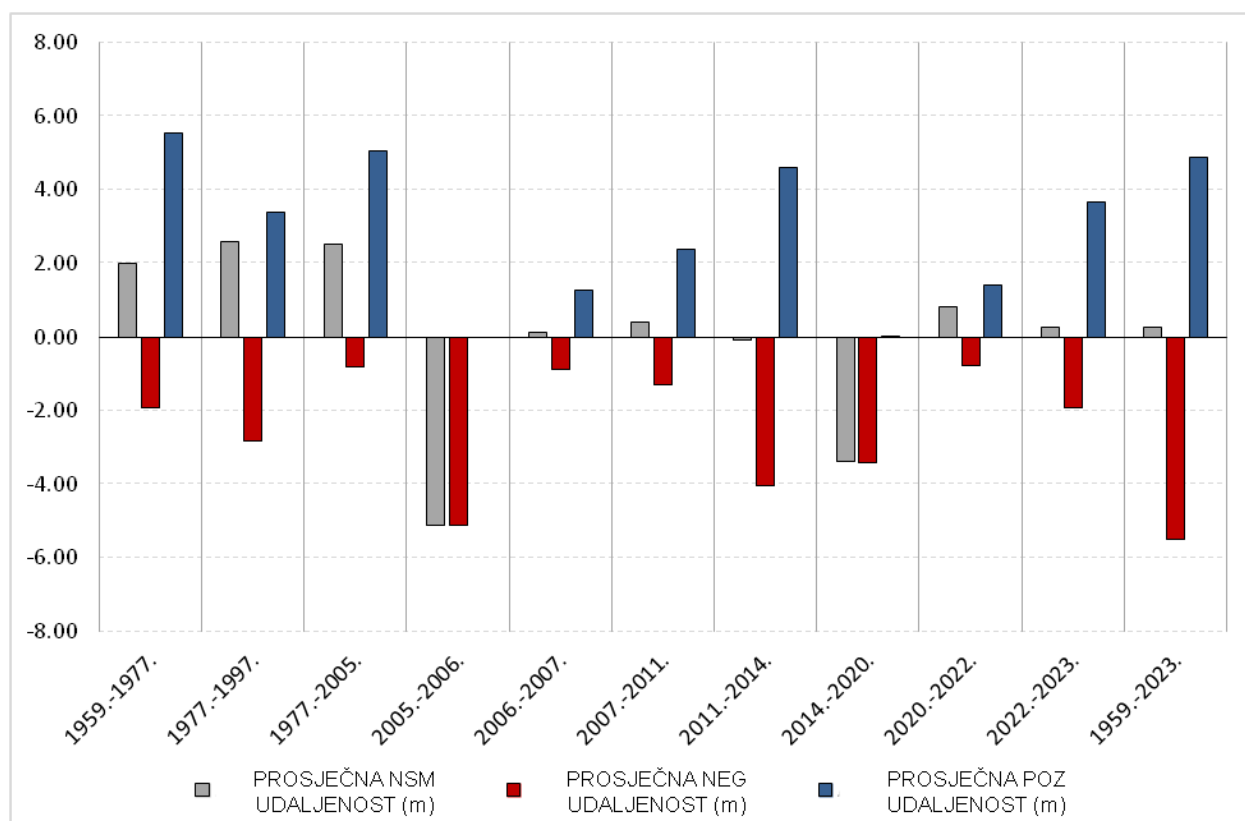
Slika 33. Linearne prostorno-vremenske promjene u razdoblju od 1959. do 2023.

Na slici 34. prikazani su rezultati neto kretanja (NSM) obalne linije za dva modela u razdoblju od 1959. do 2023. godine te ukupne promjene unutar 64 godine. Ako se promatraju pomaci obalne linije između uzastopnih razdoblja vidljiva je izmjena pozitivnih i negativnih vrijednosti pomaka, ali ako se promatra srednja neto promjena u 64-godišnjem razdoblju obalna linija bilježi blagi „prirast“.

U razdoblju od 2005. do 2006. godine srednja vrijednost NSM-a iznosi - 5,11 m što ukazuje na izrazitu retrogradaciju u odnosu na ostala razdoblja. Uz navedeno razdoblje samo je još u razdoblju od 2014. do 2020. godine zabilježena retrogradacija obale s prosječnim NSM-om od -3,37 m.

Unutar šestomjesečnog razdoblja (2022. – 2023.) srednja vrijednost NSM-a iznosi 0,27 m što ukazuje na izrazito blagu progradaciju obalne linije. Međutim, navedeni rezultati pokazuju samo horizontalne promjene te je potrebno napraviti volumetrijske analize i utvrditi događa li se i volumetrijski „prirast“.

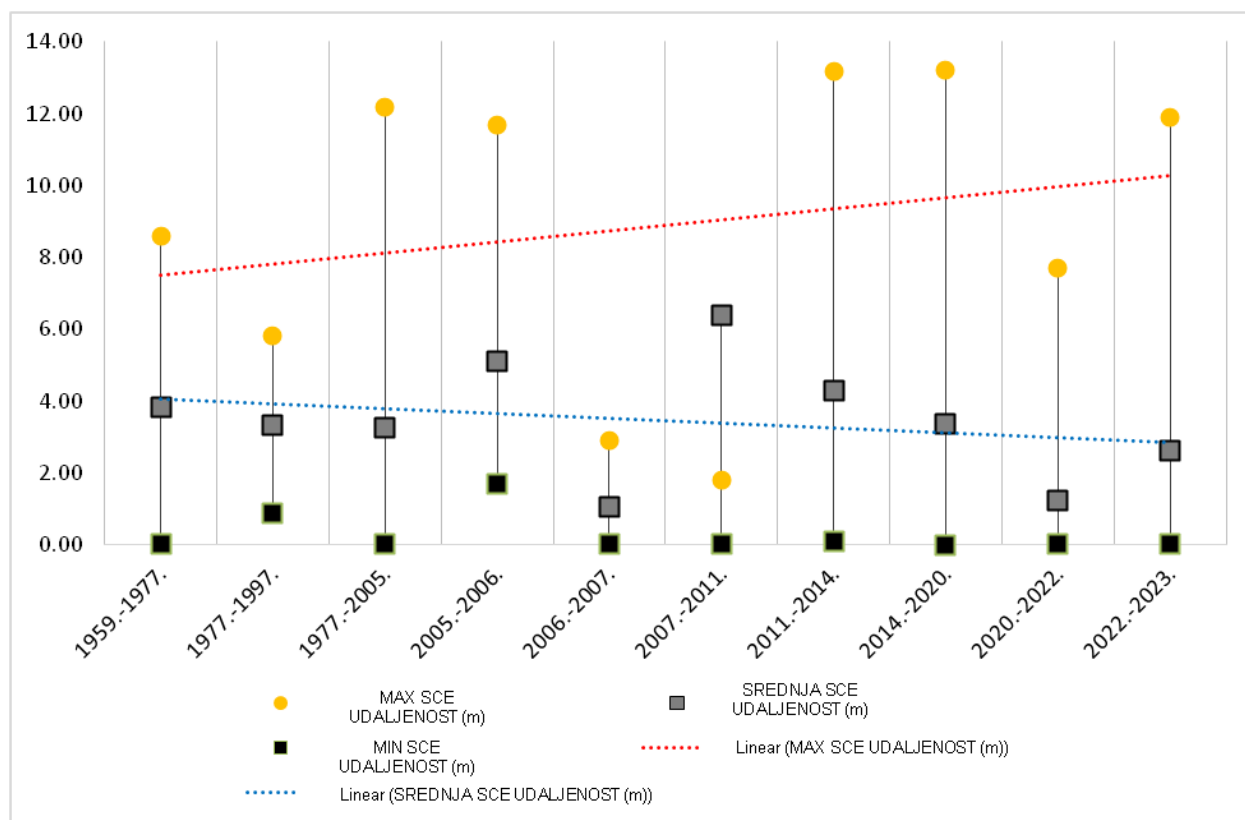
Analizom rezultata kretanja obalne linije može se vidjeti da je dinamika obale žala Sušac vrlo intenzivna, ali i da ne postoje generalni višegodišnji trendovi kretanja obalne linije već da su najveće promjene zabilježene unutar pojedinih godina.



Slika 34. Neto kretanje obalne linije u razdoblju od 1959. do 2023.

Nadalje, na slici 35. prikazani su rezultati kretanja obalne linije (SCE) za dva uzastopna intervalna modela u razdoblju od 1959. do 2023. godine. S obzirom na to da SCE predstavlja raspon promjene obalne linije opažene unutar određenog područja istraživanja njegova srednja vrijednost od 21,78 m ukazuje na to da je unutar proučavanih razdoblja došlo do značajnijih promjena u položaju obalne linije.

Ako se promatraju pojedinačna razdoblja vidljivo je da se najveće promjene događaju u kraćim proučavanim razdobljima. Unutar šestomjesečnog razdoblja (2022. – 2023.) srednja vrijednost SCE-a iznosi 2,60 m dok primjerice u razdoblju (1959. – 1977.) iznosi 3,82 m.



Slika 35. Kretanje obane linije (SCE) u razdoblju od 1959. do 2023.

4.3.2. Modeli površinskog (arealnog) pomaka

Iz poligonskog sloja obalnog područja žala Sušac definiranog prema užem prostoru interesa izvedene su površine kopna za svaku godinu (Slika 36). Prosječna površina obalnog područja žala Sušac iznosila je 3570,4 m².



Slika 36. Promjene obalne linije i obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023.

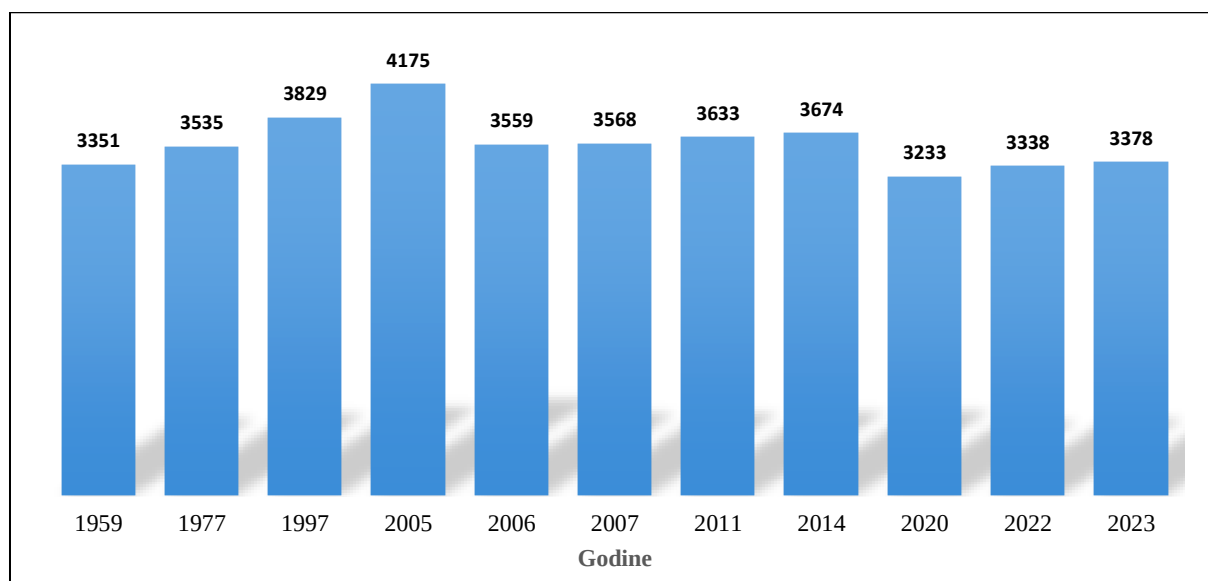
U tablici 10. i na slici 37. prikazani su rezultati deskriptivne statistike obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023. godine. Iz podataka se može uočiti nekoliko zanimljivosti:

- 1) U 64-godišnjem razdoblju došlo je do izrazito malog povećanja (27 m²) površine obalnog područja
- 2) U 2005. godini zabilježena je veća površina obalnog područja u odnosu na ostale godine
- 3) Prema MSI-u obalno područje iz 2014. godine ima najsloženiji oblik

Tablica 10. Deskriptivna statistika obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023.

Godina	Pov. (m ²)	P ¹ - srednjak	MSI ²	MSI - srednjak
1959	3351,41	-219,00	1,114	0,023
1977	3535,07	-35,34	1,103	0,034
1997	3829,23	258,82	1,124	0,013
2005	4174,84	604,43	1,128	0,009
2006	3558,91	-11,50	1,118	0,019
2007	3568,02	-2,39	1,120	0,017
2011	3633,40	62,99	1,119	0,018
2014	3673,80	103,39	1,218	-0,081
2020	3233,09	-337,32	1,132	0,005
2022	3338,39	-232,02	1,150	-0,013
2023	3378,39	-192,02	1,180	-0,043
Srednjak	3570,41		1,137	
Raspon	941,74		0,12	

¹ Površina; ² Mean Shape Indeks

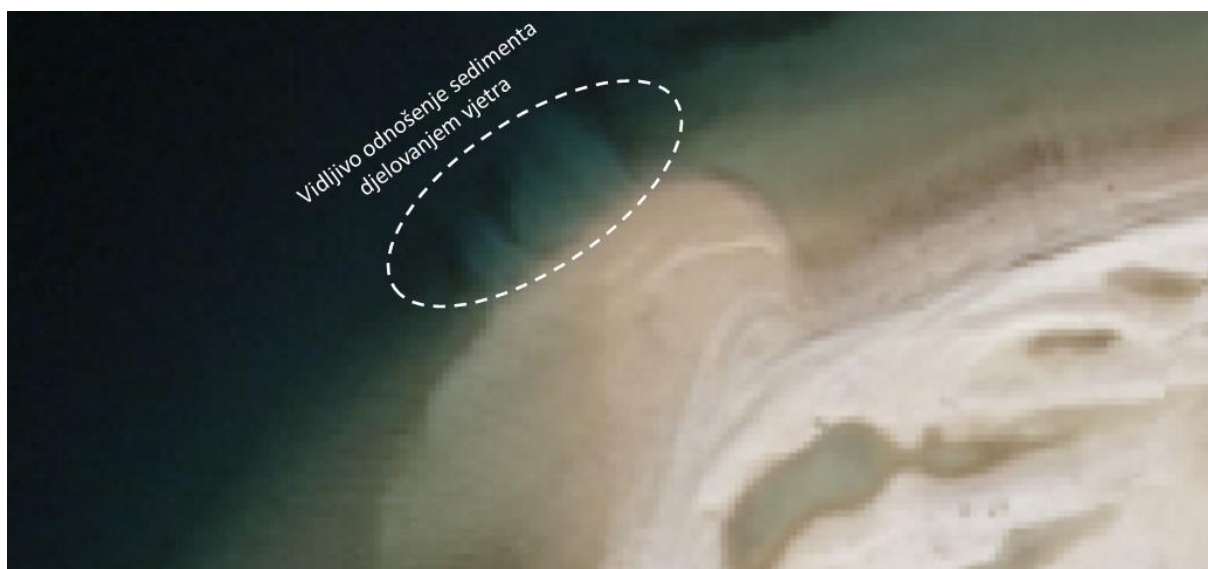


Slika 37. Kretanje površine obalnog područja u razdoblju od 1959 do 2023. godine

Dakle, u 64-godišnjem razdoblju došlo je do izrazito malog povećanja (27 m^2) površine obalnog područja, što iznosi tek oko 0,7% srednje površine obalnog područja. Iz toga se može zaključiti da nije došlo do arealnog nestanka obalnog područja. Međutim, za točno utvrđivanje mogućnosti nestanka žala arealne analize i linijski pomak nisu dovoljni, nužno je provesti i volumetrijske analize.

U 2005. godini zabilježena je veća površina obalnog područja u odnosu na ostale godine. Razlog tome može biti kombinacija hidrodinamičkih čimbenika koja je u prethodnom razdoblju utjecala na obalno područje.

Srednja vrijednosti MSI-a obalnih područja iznosi 1,137. Sve vrijednosti MSI-a iznose očekivano iznad 1 što ukazuje na oblike odstupaju od kružnog oblika. Na temelju vrijednosti MSI-a (Tablica 10), moguće je zaključiti da postoji određena varijabilnost u obliku obalnog područja predstavljenih ovim vrijednostima. Najveću vrijednost ima obalno područje iz 2014. godine (1,218) što ukazuje na složeniji oblik koji može biti izduženiji ili imati nepravilne granice. U odnosu na ostale, vrijednost od 1,218 ukazuje na to da je ovaj oblik obalnog područja rezultat složene recentne obalne dinamike, odnosno izrazito snažnog djelovanja meteoroloških i hidrodinamičkih čimbenika obalne dinamike. Detaljnijim pregledom zračnog snimka može se primijetiti utjecaj juga/lebića iz smjera J, JZ koji pomiču sediment oblikujući nepravilno obalno područje (Slika 38).



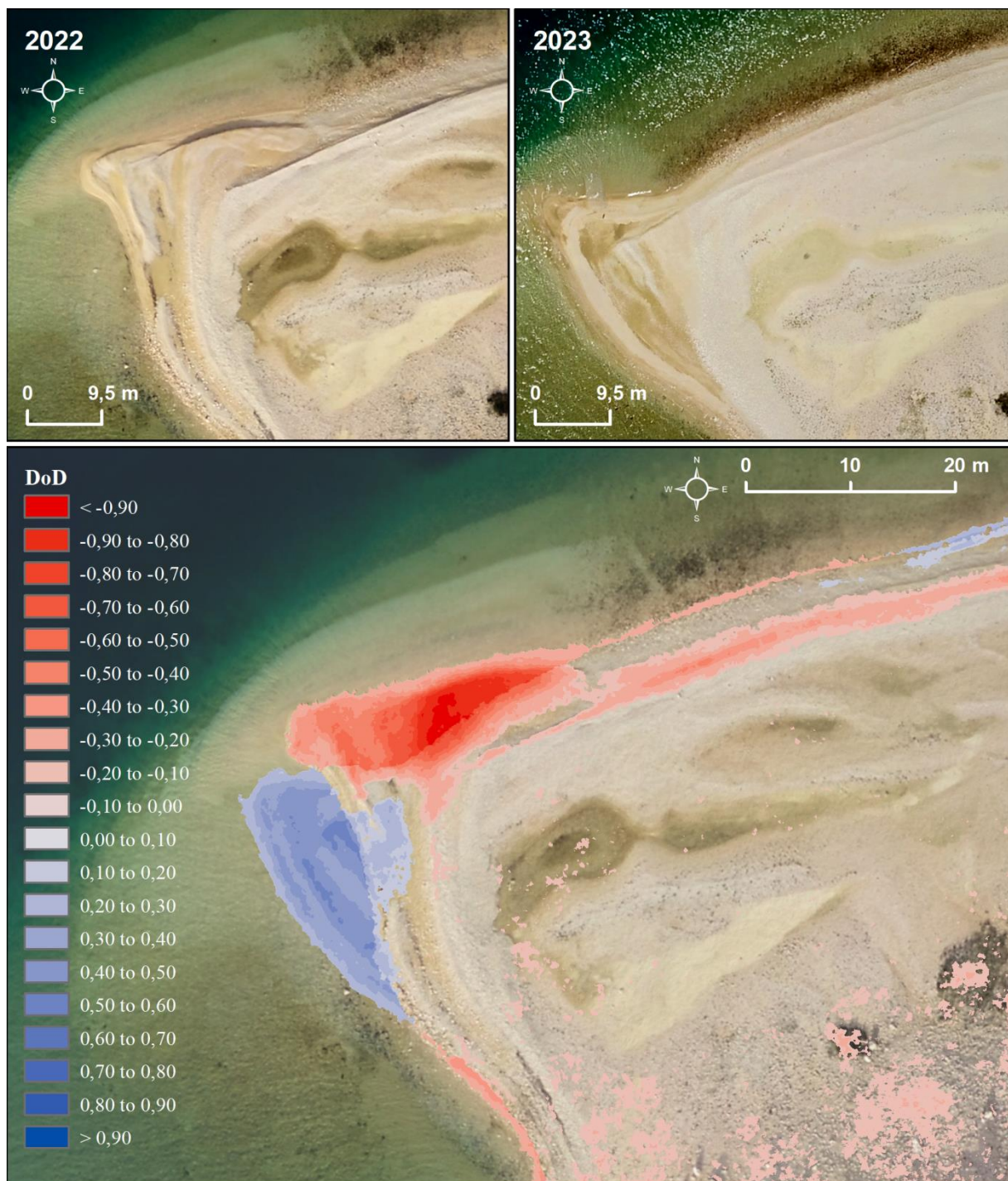
Slika 38. Razlog složenog oblika obalnog područja za 2014. godinu

Najveće odstupanje od srednje površine kopnenog djela obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023. zabilježeno je 2005. godine ($604,43 \text{ m}^2$). Kad bi se gledala prosječna površina obalnog područja žala Sušac ($3570,41 \text{ m}^2$) navedena promjena predstavlja povećanje

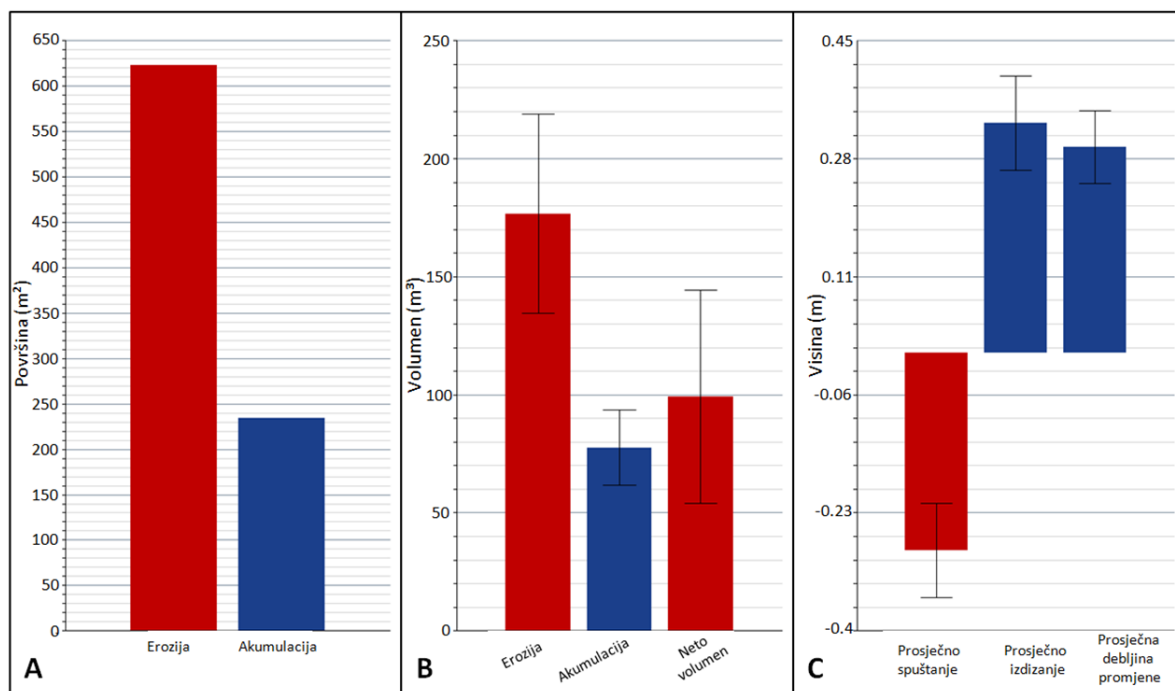
od 17%. Odnos godina na kojima je došlo do povećanja i smanjenja površine u odnosu na srednjak je gotovo podjednak. Naime, od 11 modela, na dva (2006. i 2005.) modela utvrđeno je minimalno odstupanje (gotovo ista vrijednost) od srednjaka, na pet je utvrđeno smanjenje, dok je na četiri utvrđeno povećanje. Najveće smanjenje površine se dogodilo u periodu od 2005. do 2006. godine kad se površina obalnog područja smanjila za 615,9 m², odnosno s 4174,8 m² na 3558,9 m².

4.3.3. Volumetrijske promjene

Iz digitalnih modela površina izvedenih na temelju intervalnih UAV snimanja provedena je volumetrijska analiza promjena unutar užeg područja istraživanja. Na slici 39. prikazani su šestomjesečni rezultati detektiranih i kvantificiranih volumetrijskih promjena žala Sušac. U promatranom razdoblju, uzimajući u obzir parametar nesigurnosti, odnosno pogreške modela, ukupno je detektirana promjena materijala na 857 m². Od toga erozija je detektirana na 623 m² gdje je ukupno erodirano 177 m³ materijala, dok je akumulacija zabilježena na 234 m² unutar kojeg je akumulirano 78 m³ materijala. Prema navedenim podacima šestomjesečna stopa erozije iznosi 0,284 m³ po m², a akumulacije 0,333 m³ po m². Nadalje, prosječno vertikalno spuštanje područja iznosi 0,28 m dok prosječno izdizanje iznosi 0,33 m (Slika 40). Ukupni neto volumen detektiranih promjena je negativan i iznosi 99 m³. Vidljivo je kako unutar istraživanog područja dominira obalna erozija (70% svih detektiranih promjena). Količina erodiranog materijala dvostruko je veća od akumuliranog te se može pretpostaviti kako je dio materijala pod utjecajem različitih morfodinamičkih faktora izgubljen.



Slika 39. Detektirane volumetrijske promjene žala Sušac



Slika 40. Površinski (A); volumetrijski (B) i visinski (C) pokazatelji prostorno-vremenskih promjena žala

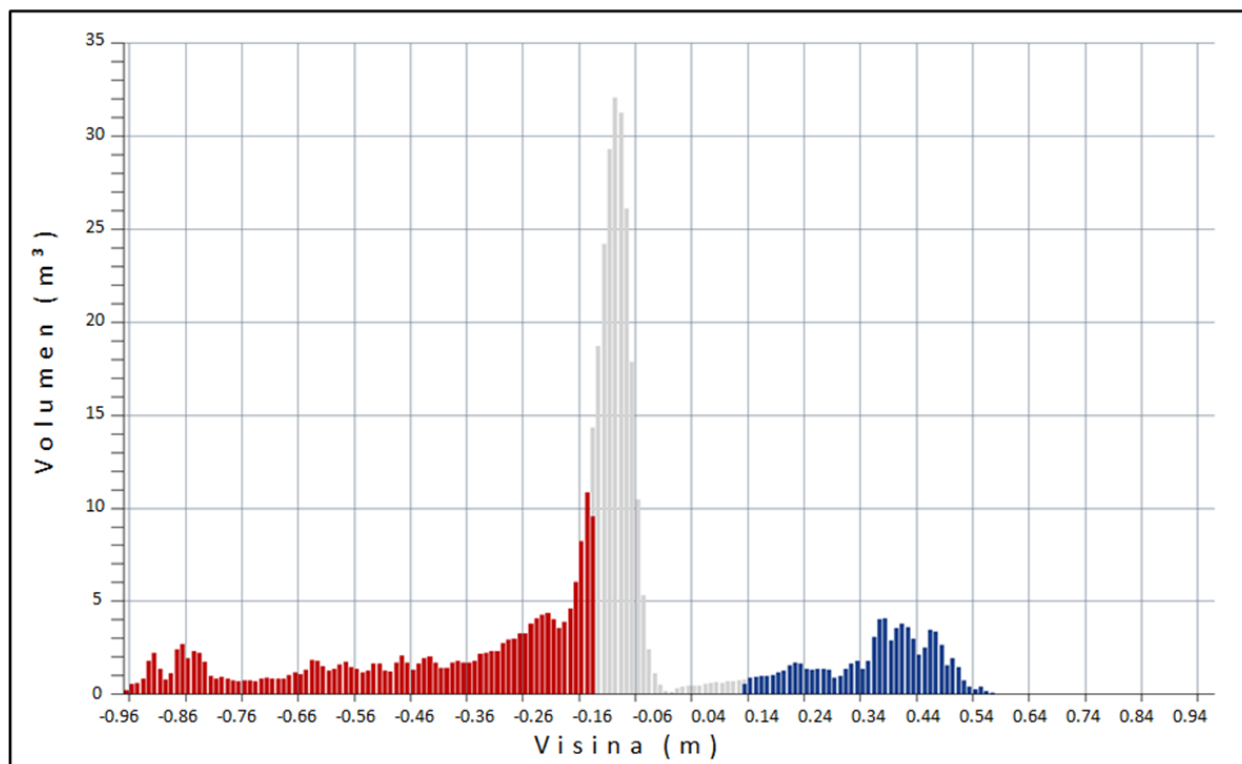
Detektirana akumulacija na SI dijelu žala, koja prekida površinu koja bilježi eroziju, može se povezati s prisutnim površinskim tokom koji se aktivirao za vrijeme intenzivnih oborina, unutar promatranog šestomjesečnog razdoblja. Kao posljedica toga dio materijala akumulirao se i unutar istraživanog područja (Slika 41).



Slika 41. Utjecaj povremenog površinskog toka na preoblikovanje materijala uz područje istraživanja

Nadalje, histogram prostorno-vremenskih volumetrijskih i visinskih promjena (Slika 42) pokazuje da je unutar šestomjesečnog razdoblja proces erozije dominirao. Važno je

naglasiti da su sivom bojom označene promjene koje nisu detektirane kao erozija ili akumulacija. Navedeno je posljedica postavljanja parametra nesigurnosti, odnosno pogreške korištenih modela u procesu obrade podataka, pri čemu su sivom bojom označene detektirane promjene, koje su unutar nesigurnosti modela, zbog čega su zanemarene pri izračunu intenziteta erozije i akumulacije materijala.



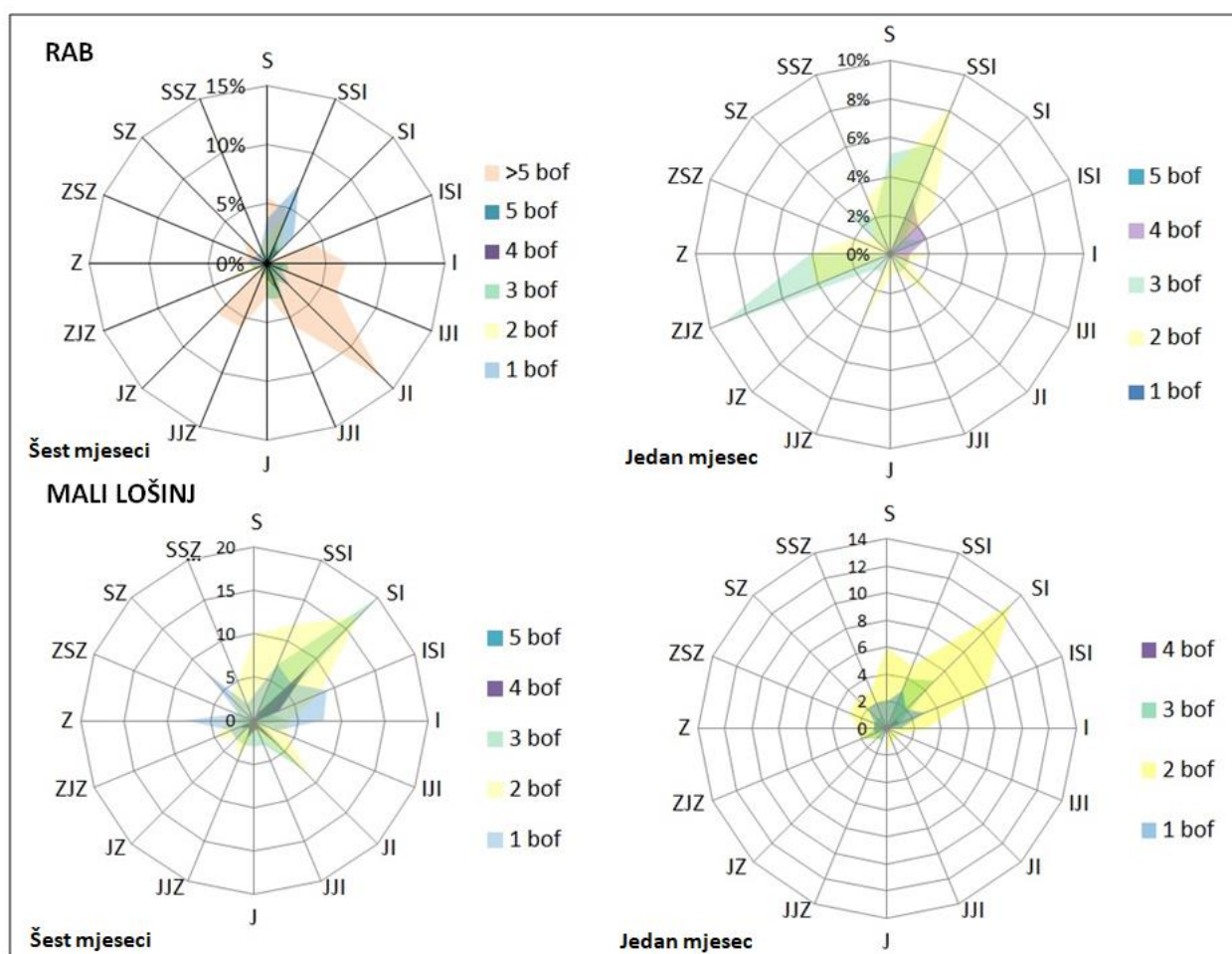
Slika 42. Histogram šestomjesečnih prostorno-vremenskih promjena

4.4. OBRAĐENI METEOROLOŠKI PODACI

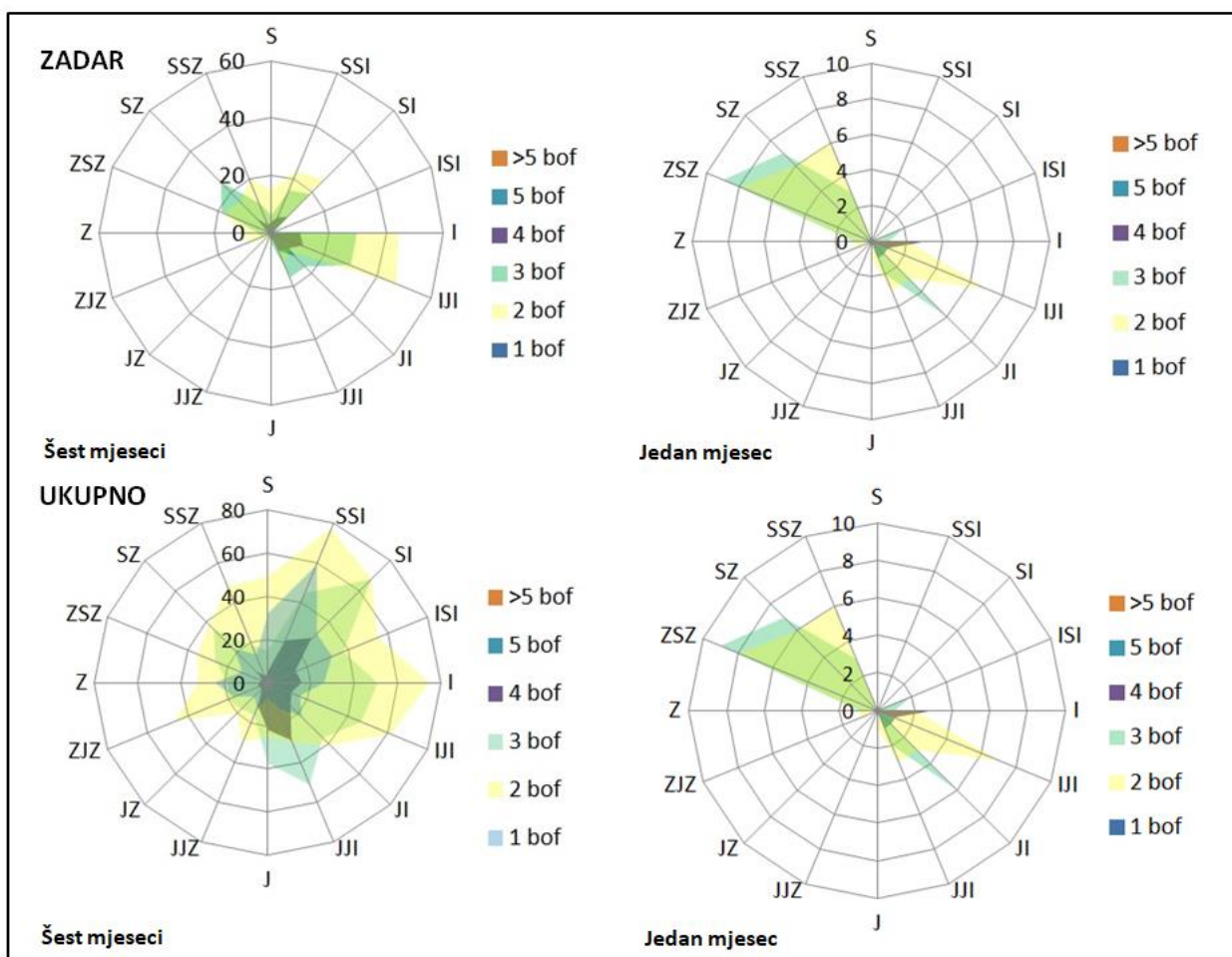
4.4.1. Meteorološki podaci DHMZ-a

Od zatraženih meteoroloških podataka DHMZ-a dobiveni su podaci za pet najbližih meteoroloških postaja: Pag, Novalja, Rab, Mali Lošinj i Zadar. Meteorološki podaci za postaju Novalja gotovo da ne postoje, odnosno dostavljeni su podaci samo za dnevnu količinu oborina za prva dva mjeseca. Meteorološka postaja Karlobag nije bilježila podatke za traženo razdoblje. Za postaju Pag dostavljeni su podaci o temperaturi zraka, smjeru i jačini vjetera i količini oborina, ali za samo prva četiri mjeseca. Zbog nepotpunosti podataka nisu korišteni u analizama. Zbog svih navedenih ograničenja i manjkavosti podaci se nisu mogli detaljnije dovesti u korelaciju s utvrđenim šestomjesečnim morfološkim promjenama žala Sušac. Meteorološke postaje Rab, Zadar i Mali Lošinj bile su jedine postaje, od zatraženih sedam, koje su imale podatke o smjeru i jačini vjetera za traženo razdoblje.

Na slikama 43. i 44. prikazane su generirane vjetrulje za navedene postaje. Vjetrulje su izvedene za ukupno šestomjesečno razdoblje i za posljednji mjesec. Navedeno je napravljeno s ciljem utvrđivanja dominantnog vjetra jer na višemjesečnoj razini promjene mogu biti odraz zadnjeg dominantnog olujnog vjetra. Za meteorološku postaju Rab dominantan vjetar unutar šest mjeseci je jugo jačine iznad 5 bofora dok je za posljednji proučavani mjesec dominantan vjetar lebić jačine 3 bofora. Nadalje, za meteorološku postaju Mali Lošinj dominantan vjetar unutar šest mjeseci te za posljednji mjesec je bura. Dominantan vjetar unutar šest mjeseci za meteorološku postaju Zadar je istočnjak dok za posljednji mjesec pulenat. Sagleda li se ruža vjetrova generirana na temelju ukupnih podataka za sve tri postaje unutar šest mjeseci dominantan vjetar je bura s prosječnom jačinom od 3 bofora.



Slika 43. Ruža vjetrova za meteorološke postaje Rab i Mali Lošinj



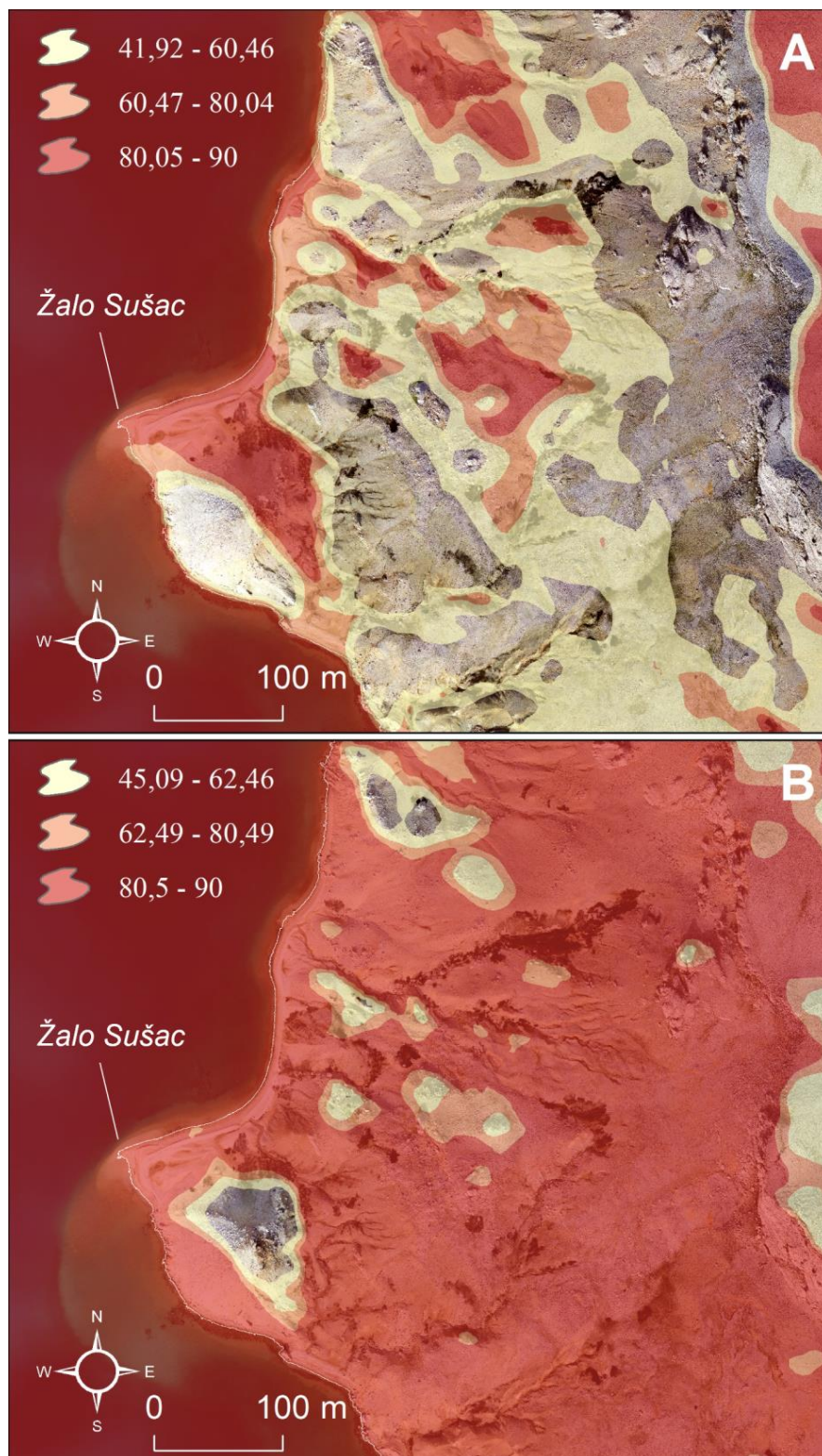
Slika 44. Ruža vjetrova za meteorološku postaju Zadar te ukupno

4.4.2. Indeks zaklona od vjetra

S obzirom da je na temelju izrađenih vjetrulja utvrđeno da je dominantan vjetar u šest mjeseci bura te da je za najbližu meteorološku postaju Rab, za posljednji mjesec, dominantan vjetar lebić izveden je model indeksa zaklona vjetra za navedene vjetrove. Na slici 45. prikazani su modeli indeksa zaklona od vjetra za buru i lebić.

Analizom izvedenih modela vidljivo je da gotovo cijelo područje žala Sušac pripada klasi koja označava visoke vrijednosti indeksa od 80,05 do 90, što ujedno spada u veliku izloženost područja utjecajima bure. Cijeli SZ dio žala izložen je direktnom utjecaju bure, koja transportira materijal prema jugozapadu, što se može povezati s detektiranom i kvantificiranom intenzivnom obalnom erozijom na tom dijelu u razdoblju od šest mjeseci. Može se pretpostaviti da je pod utjecajem valova, pojačanih burom, unutar proučavanog razdoblja, erodirao S, SZ dio žala, a da je na J i II dijelu došlo do akumulacije materijala. Za lebić je situacija obrnuta. To je teško predvidljivi jugozapadnjak koji dolazi potkraj juga, ispred hladne fronte. Pod njegovim utjecajem može doći do erodiranja, odnosno uvlačenja

obalne linije na J i JZ, možda i formiranja manjih obalnih dina, a na S, SI dijelu do akumulacije, odnosno prirasta obalne linije. Također, gotovo cijelo snimljeno područje ima izrazito visoke vrijednosti (80-90) indeksa zaklona od vjetra za lebić, odnosno izrazito je izloženo utjecaju lebića koji uzrokuje transportiranje materijala prema sjeveroistoku.



Slika 45. Indeks zaklona od vjetra (A) bura i (B) lebić

5. RASPRAVA

Rezultati linearnih pomaka obalne linije u razdoblju od 64 godine ukazuju na to da ne postoje pravilni trendovi pomaka obalne linije. Naime, u razdoblju od 1959. do 2005. godine uočena je kontinuirana progradacija obalne linije dok je u razdoblju od 2005. do 2006. detektirana najintenzivnija retrogradacija obalne linije u odnosu na ostale godine. Nakon toga, dolazi do ponovnog kontinuiranog blagog prirasta do 2023. s izuzetkom u razdoblju od 2014. do 2020. kada je zabilježena retrogradacija obale. Usporede li se linearni pomaci s rezultatima arealnih promjena nameće se zaključak da je žalo Sušac linijski relativno stabilno i da nije zabilježeno arealno nestajanje žala, ali ipak bilježi intenzivnu dinamiku obalne linije kao rezultat utjecaja čimbenika obalne dinamike. Najintenzivnije morfološke promjene zabilježene su na vrhu žala koje je podložno direktnom utjecaju kompleksnih hidrodinamičkih čimbenika pod čijim utjecajem dolazi do neprestanog kretanja sedimenta. U razdoblju od 64 godine prosječno neto kretanje obalne linije iznosi 0.27 m što se u potpunosti poklapa s utvrđenim izrazito malim povećanjem površine obalnog područja, točnije 0.7% srednje površine obalnog područja. Na temelju rezultata linearnog pomaka i arealnih promjena može se zaključiti da nije došlo do arealnog nestanka žala.

Utvrđene šestomjesečne volumetrijske promjene ukazuju da je erozija materijala dominantan proces na žalu Sušac. Može se pretpostaviti kako je dio erodiranog materijala na S i SZ dijelu akumuliran na J i JI strani žala, no ipak količina erodiranog materijala prednjači u odnosu na količinu akumuliranog te je dio materijala izgubljen. Volumetrijske promjene stavljene su u korelaciju s dominantnim vjetrom u razdoblju od šest te za posljednji mjesec. Može se pretpostaviti kako su na intenzitet detektirane erozije utjecali valovi pojačani burom. Navedeno je sukladno prethodnim istraživanjima u kojima su valovi značajni modifikatori kratkotrajnih promjena morfologije žala (Nyandwi, 2001; Labuz, 2015; Casella i dr., 2016; Bheeroo i dr., 2016; Hossen, 2023). Nadalje, uspoređi li se morfologija vrha žala Sušac u promatranim razdobljima može se pretpostaviti kako je u razdoblju prije prvog UAV snimanja dominantan vjetar bio jugo i lebić koji su uvjetovali detektiranu morfologiju žala. Nakon šest mjeseci dominantan vjetar bio je bura koji je uzrokovao značajnije morfološke promjene žala Sušac. Nadalje, potrebno je istaknuti kako je morfologija žala Sušac na snimku iz 2014. godine rezultat djelovanja intenzivnih čimbenika obalne dinamike te se može primijetiti utjecaj juga i lebića iz smjera J i JZ koji su pomaknuli sediment prema S i SI uvjetujući nepravilnu morfologiju žala.

Izvedenim modelom indeksa zaklona od vjetra uočena je izrazita izloženost područja istraživanja utjecajima bure i lebića koji mogu biti ključni za promjene morfologije žala. Lebić dolazi praćen vrlo visokim valovima, osobito na otvorenom moru i zapadnoj obali kopna. Pod njihovim utjecajem moguća je pojava efekta koji se naziva *cross sea* ili križanje valova (Slika 46), koja je uzrokovana ranijim puhanjem juga i podizanjem valova s JI dok ih lebić tjera JZ.



Slika 46. Primjer efekta križanja valova

Ako se promatraju utjecaji navedena dva vjetra moguće je zaključiti da u dužim razdobljima nije moguće primijetiti intenzivne utjecaje bure i lebića jer se radi o vjetrovima koji pušu iz smjerova SI i JZ i transportiraju sediment na JZ odnosno SI. Kao posljedica toga dolazi do poništavanja njihovih učinaka i neprestanog kretanja sedimenta na žalu. Zbog toga, za potpuno razumijevanje obalne dinamike nisu dovoljna godišnja ili mjesečna praćenja morfoloških promjena žala već je jedini relevantni izvor podataka dnevna rezolucija detektiranih promjena.

Odabrane promjene na širem prostoru Metajne

Iz izvedenih rezultata izdvojeni su najzanimljiviji primjeri uočenih promjena koji su potom preklopljani s generiranom drenažnom mrežom šireg područja istraživanja. Naime, i vizualnom analizom visokorezolucijskih DOF-ova mogu se uočiti značajnije morfološke

promjene žala na širem prostoru Metajne. Na promjene drugih žala utjecala je razgranata drenažna mreža, koji na žalu, u blizini područja istraživanja formiraju tok 4. reda prema Strahleru. Na slici 47. vidljivo je djelovanje površinskog toka koji se aktivirao za vrijeme intenzivnih padalina, probio žalo i uklonio nakupljeni sediment. Na DOF-u iz studenog vidljiva je veća količina sedimenta na žalu. Nadalje, kamen na žalu gotovo je prekriven sedimentom u studenom 2022. godine, dok je nakon šest mjeseci taj sediment transportiran i kamen postaje u potpunosti vidljiv. Također, na snimku iz studenog 2022. godine može se primijetiti konstruktivni utjecaj valova koji su nagurali sediment na žalo pri čemu su se formirale obalne dine. Može se pretpostaviti kako se u razdoblju od šest mjeseci sediment sa žala transportirao u ponovno u more.



Slika 47. Promjena morfologije žala uvjetovana površinskim otjecanjem

U nastavku je prikazan još jedan primjer žala čije se morfološke promjene mogu povezati s intenzivnijim površinskim otjecanjem detektiranim unutar šest mjeseci. Površinskim otjecanjem sediment se transportirao prema moru te se dio sedimenta akumulirao na žalo. Unutar šestomjesečnog razdoblja žalo je dobilo sasvim novi oblik (Slika 48).

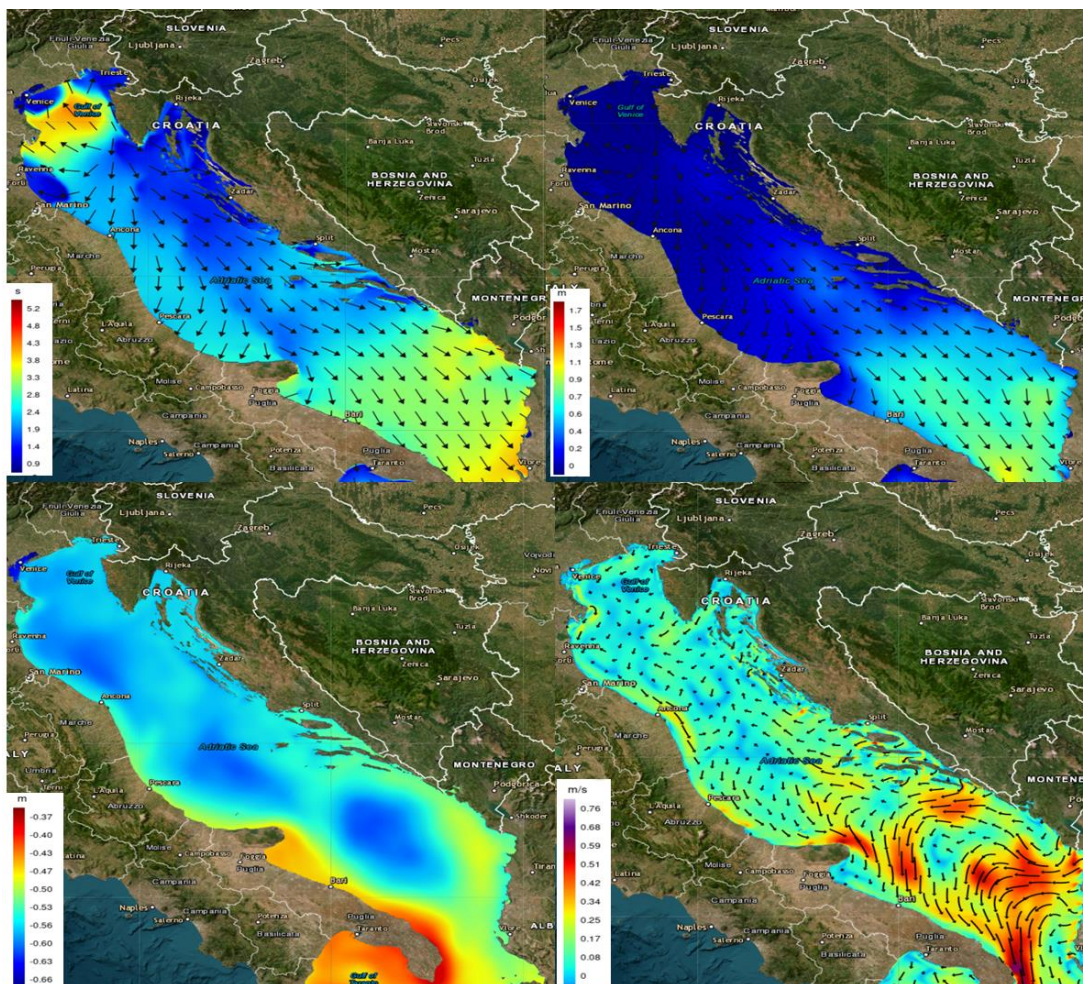


Slika 48. Primjer morfoloških promjena žala uzrokovanih površinskim otjecanje

Generirana drenažna mreža ukazala je na ovisnost morfoloških promjena o prisutnosti povremenih površinskih tokova. Stoga, dva su moguća procesa vezana za pojavnost povremenih površinskih tokova. U navedenim primjerima može se pretpostaviti kako je tok bio vrlo intenzivan je pod njihovim utjecajem erodirao materijal na žalu dok se u slučaju žala Sušac tok uz uže područje istraživanja aktivirao i nagurao sediment na žalo.

S obzirom na utvrđene i kvantificirane prostorno-vremenske promjene žala Sušac te na utvrđenu dinamiku obalne linije koja mijenja morfologiju žala, potrebno je provoditi daljnja istraživanja u kojima je poželjno postaviti intervalne kamere ili povećati učestalost snimanja te postaviti senzore za detekciju intenziteta čimbenika obalne dinamike (meteorološki uvjeti, amplituda morskih mijena, intenzitet valova, kretanje i brzina morskih struja, itd.). Jedino na taj način bi se mogla u potpunosti razumjeti obalna dinamika te bi se detektirane i kvantificirane promjene mogle detaljnije interpretirati stavljanjem u odnos s intenzitetom čimbenika obalne dinamike. Nadalje, iako žala predstavljaju dinamična geomorfološka područja izložena neprestanim morfološkim promjena pod utjecajem prirodnih i antropogenih čimbenika u Hrvatskoj ne postoje sustavna mjerenja i platforme za pružanje cjelovitih i dostupnih podataka o morskim strujama, valovima, morskim mijenama i ostalim morfodinamičkim faktorima koji bi pomogli u detaljnijoj interpretaciji utvrđenih promjena. Navedene podatke bilježi DHMZ, ali u ovom istraživanju uočena je manjkavost podataka za najbliže meteorološke postaje, Novalja, Pag, Metajna i Karlobag, koji bi pomogli u interpretaciji detektiranih promjena. S obzirom na navedeni nedostatak u prikupljanju i obradi meteoroloških podataka nemoguće je sa sigurnošću govoriti o intenzitetu čimbenika obalne dinamike i njihovom utjecaju na morfološke promjene žala Sušac.

Izvrstan primjer sustava za praćenje morfodinamike Jadranskog mora je *Adriatic coastal Forecasting System (AdriFS)* razvijen od strane Talijanske grupe za operativnu oceanografiju. *AdriFS* numerički je sustav za predviđanje kratkoročnih hidrodinamičkih prognoza za cijelo Jadransko more. Razvijen je od strane Talijanske grupe za operativnu oceanografiju (GNOO) 2003. godine. Model hidrodinamičkih prognoza implementira *OPA Division*, a obuhvaća podatke o kretanju i brzini morskih struja, periodu i visini valova, razini mora, salinitetu i temperaturi mora. *OPA Division* razvija metode i modele za interdisciplinarna istraživanja u području obalnog okoliša, pomorstva, pomorskog gospodarstva, interakcije između obalnog okoliša i oceana, klimatskih promjena, upravljanja obalnim područjima itd (URL 13; URL 14). Svi navedeni prediktivni podaci mogu se koristiti za predviđanje morfoloških promjena žala i analizu utjecaja morfodinamičkih faktora. U nastavku su dani primjeri podataka koji se prikupljaju na dnevnoj razini (Slika 49).



Slika 49. Primjer podataka o (A) periodu vala; (B) visini vala; (C) razini mora te (D) kretanju i brzini morskih struja u Jadranskom moru

Izvor: URL 15

Poteškoće prilikom istraživanja

1) Antropogeni utjecaj

Iako se radi o relativno zabačenom prostoru, jedan od problema koji se javio kod UAV snimanja šireg područja istraživanja vezan je za sidrenje gumenjaka na vrh žala (Slika 45). Točka (*home point*) odakle je dron krenuo u misiju i koje je bilo ujedno i naše stajalište nalazi se na grebenu udaljenom oko 800 m od područja istraživanja. Razlog odabira lokacije je nedostupnost terena te je greben predstavljao jedinu točku do koje se moglo doći bez ugrožavanja opreme i ljudi. Iz navedenih razloga teško je bilo kontrolirati da snimanje prođe neometano od strane ljudi. Međutim, u procesu generiranja DOF i DEM-a korištene su snimke na kojima se gumenjak nije nalazio.



Slika 50. Poteškoće prilikom UAV snimanja

2) Nepotpuni podaci DHMZ-a

Detektirane i kvantificirane prostorno-vremenske promjene nastojale su se dovesti u odnos s meteorološkim podacima o smjeru i jačini vjetera, količini oborina, stanju mora itd. U interpretaciji promjena glavni problem bila je nepotpunost zatraženih meteoroloških podataka. Podaci o količini oborina stavili bi se u odnos s generiranom drenažnom mrežom šireg

područja istraživanja. Time bi se intenzitet oborina povezao s generiranom drenažnom mrežom i stavio u korelaciju s utvrđenim prostorno-vremenskim promjenama. Iako je navedeno da meteorološka postaja Novalja bilježi podatke o količini oborina na mjesečnoj razini, dostavljeni podaci nisu bili potpuni niti su se kontinuirano bilježili. S obzirom da su podaci obrađeni za meteorološke postaje koje se nalaze na velikim udaljenostima, nemoguće je sa sigurnošću govoriti o temeljnim uzrocima morfoloških promjena žala Sušac.

6. ZAKLJUČAK

U sklopu diplomskog rada detektirana je i kvantificirana višegodišnja promjena morfologije žala Sušac u razdoblju od 1959. do 2023. godine. Višegodišnja detekcija i kvantifikacija linearnog pomaka i arealnih promjena žala napravljena je na temelju intervalnih aerofotogrametrijskih snimaka DGU-a (1959. – 2020.). Nadalje, u razdoblju od šest mjeseci (studeni, 2022. – lipanj, 2023) provedena su dva UAV snimanja te su na temelju izvedenih modela utvrđene linearne, arealne i volumetrijske promjene žala.

Linearni pomaci obalne linije napravljeni su na temelju usporedbe obalnih linija za dva uzastopna intervalna snimka te ukupni linearni pomak u razdoblju od 64. godine. Analizom linearnih pomaka utvrđena je relativna linijska stabilnost te intenzivna obalna. Najdinamičnije promjene zabilježene su na rtu žala Sušac na kojem je detektirano kontinuirano kretanje materijala. Razlog tome je izbočeni položaj žala zbog čega je žalo izloženo direktnom utjecaju hidrodinamičkih faktora. Nadalje, na temelju linearnih pomaka obalne linije utvrđeno je kako ne postoje generalni višegodišnji trendovi kretanja obalne linije te su najveće promjene detektirane unutar kraćih razdoblja.

Arealne promjene napravljene su na temelju poligonskog sloja žala Sušac pri čemu su izvedene površine žala za svaki snimak. Analizom arealnih promjena žala utvrđeno je kako u razdoblju od 1959. do 2023. godine nije došlo do arealnog nestanka žala.

Nadalje, volumetrijske promjene detektirane su na temelju generiranog DMD-a te je detektirana erozija materijala na J i JZ dijelu žala. Analizom rezultata volumetrijskih promjena može se zaključiti da je unutar šestomjesečnog razdoblja dominantan proces erozija materijala. Utvrđene volumetrijske promjene dovedene su u vezu s obrađenim meteorološkim podacima o smjeru i brzini vjetrova za tri najbliže postaje. Dominantan vjetrov unutar šest mjeseci je bura koja je utjecala na utvrđenu eroziju materijala na SZ, J i JZ dijelu žala. Također, izrađeni model indeksa zaklona od vjetrova za vjetrove bure i lebića ukazao je da je veći dio istraživanog područja podložan utjecaju bure i lebića.

Nadalje, izrađena drenažna mreža šireg prostora Metajne omogućila je interpretaciju detektiranih promjena na širem području. Detaljnom analizom DOF-ova uvidjelo se da površinski tokovi različitog reda prema Strahleru imaju različite utjecaje na morfološke promjene žala. Na nekoliko susjednih žala vidljiv je intenzivan utjecaj površinskog toka koji je u vrijeme jakih oborina probio žalo pri čemu je sediment erodirao te se može pretpostaviti kako je određena količina sedimenta izgubljena.

Utvrđene prostorno-vremenske promjene žala Sušac čine osnovu za buduća istraživanja. Za potpuno shvaćanje obalne dinamike nisu dovoljna višegodišnja i mjesečna praćenja već je jedina relevantna dnevna rezolucija detekcija promjena. S obzirom na to da žala spadaju u najosjetljiviji dio obalnog područja, a njihove morfološke promjene rezultat su interakcije kompleksnih prirodnih i antropogenih čimbenika potrebno je provoditi daljnja istraživanja pri čemu je potrebno uključiti dodatne senzore pomoću kojih će se pratiti intenzitet morfodinamičkih čimbenika. Na taj način, detektirane i kvantificirane promjene mogle bi se detaljnije interpretirati stavljanjem u odnos s intenzitetom čimbenika obalne dinamike (meteorološki uvjeti, amplituda morskih mijena, intenzitet valova, kretanje i brzina morskih struja). U nastavku je dan pregled hipoteza istraživanja.

H1 Maksimalni linearni pomak obalne linije žala unutar 64 godišnjeg razdoblja (1959. – 2023.) bit će veći od 30 m.

Navedena hipoteza je odbačena. Maksimalni linearni pomak u razdoblju od 64 godine iznosi 21,78 m.

H2 U proučavanom šestomjesečnom razdoblju odnos (količina) akumuliranog i odnesenog materijala bit će podjednak.

Navedena hipoteza je **odbačena**. Unutar proučavanog razdoblja veća količina materijala je erodirana od količine akumuliranog. Ukupno je erodiralo 177 m^3 te je akumulirano 78 m^3 materijala. Količina erodiranog materijala 2,3 puta veća od akumuliranog te se može pretpostaviti kako je dio materijala izgubljen.

H3 Ukupna točnost modela dobivenih metodom izravnog georeferenciranja bit će ispod 30 cm.

Navedena hipoteza je **potvrđena**. Testirana su četiri scenarija obrade za oba snimanja postupnim dodavanjem GCP-ova. Ukupna točnost modela izvedenih izravnim georeferenciranjem korištenjem 11 CP (studeni, 2022.) iznosi 9,54 cm te 10,01 cm za modele iz drugog UAV snimanja (lipanj, 2023.). Postupnim dodavanjem GCP-ova ukupna točnost modela se povećava.

H4 Maksimalni linearni pomak obalne linije žala unutar proučavanog šestomjesečnog razdoblja bit će veći od jednog metra.

Navedena hipoteza je **potvrđena**. Maksimalni linearni pomak obalne linije žala u proučavanom šestomjesečnom razdoblju iznosi 11,90 m.

7. LITERATURA

1. Agisoft Metashape (2019). User Manual. Professional Edition, Version 1.5.
2. Alexandrakis, G., Manasakis, C., & Kampanis, N. A. (2015). Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management*, 111, 1-11.
3. Arockiaraj, S., Kankara, R. S., Udhaba Dora, G., & Sathish, S. (2018). Estimation of seasonal morpho-sedimentary changes at headland bound and exposed beaches along south Maharashtra, west coast of India. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 1-16.
1. Asokan, A., & Anitha, J. J. E. S. I. (2019). Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. *Earth Science Informatics*, 12(2), 143-160.
2. Balasubramanian, G., Suresh, S., Goswami, S., Swaminathan, B., & Pereira, G. F. (2022). Delineation of sensitive coastal zone of northern ramanathapuram coast, tamilnadu, india, using a gis approach. *Geodesy and Geodynamics*, 13(5), 456-463.
3. Barnes, A. T. (2013). *Using terrestrial laser scanning to investigate changes in beach morphology during swell events* (Doctoral dissertation, [Honolulu]:[University of Hawaii at Manoa],[December 2013]).
4. Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26(4), 361-376.
5. Benac, Č. (1992). Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva. *Hrvatski geografski glasnik*, 54. (1.), 1-17. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/63746>
6. 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.
7. Benac, Č. (2016). Riječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji. Građevinski fakultet u Rijeci, Hrvatska.
8. Benac, Č., Tadić, A., Petrović, V., Jakupović, D., Ljubičić, G., Krvavica, N., & Ružić, I. (2021). Ranjivost obala otoka Krka. *Hrvatske vode*, 29(117), 187-200.

9. Benassai, G., Aucelli, P., Budillon, G., De Stefano, M., Di Luccio, D., Di Paola, G., ... & Pennetta, M. (2017). Rip current evidence by hydrodynamic simulations, bathymetric surveys and UAV observation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(9), 1493-1503.
10. Bertin, S., Levy, B., Gee, T., & Delmas, P. (2020). Geomorphic change detection using cost-effective structure-from-motion photogrammetry: Evaluation of direct georeferencing from consumer-grade UAS at Orewa beach (New Zealand). *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 86, 289-298.
11. Bheeroo, R. A., Chandrasekar, N., Kaliraj, S., & Magesh, N. S. (2016). Shoreline change rate and erosion risk assessment along the Trou Aux Biches–Mont Choisy beach on the northwest coast of Mauritius using GIS-DSAS technique. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-12.
12. Biočić, M. (2014). Prikupljanje podataka novim i pristupačnim metodama izmjere korištenjem letjelica. *Diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb*.
13. Birkemeier, W. A. (1981). *Fast, Accurate Two-Person Beach Surveys*. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER FORT BELVOIR VA.
14. Brand, E., De Sloover, L., De Wulf, A., Montreuil, A. L., Vos, S., & Chen, M. (2019). Cross-shore suspended sediment transport in relation to topographic changes in the intertidal zone of a macro-tidal beach (Mariakerke, Belgium). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 172.
15. Bryant, E. A. (1985). Rainfall and beach erosion relationships, Stanwell Park, Australia, 1895-1980: worldwide implications for coastal erosion.
16. Caldwell, J. M. (1967). *Coastal processes and beach erosion* (Vol. 1). US Army Coastal Engineering Research Center.
17. Carbonneau, P. E., & Dietrich, J. T. (2017). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*, 42(3), 473-486.
18. Carvalho, R. C., Kennedy, D. M., Niyazi, Y., Leach, C., Konlechner, T. M., & Ierodiaconou, D. (2020). Structure-from-motion photogrammetry analysis of historical aerial photography: Determining beach volumetric change over decadal scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(11), 2540-2555.
19. Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Stark, C. P., Casella, M., Ferrari, M., & Firpo, M. (2016). Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 36, 151-163.

20. Cook, K. L. (2017). An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, 195-208.
21. Cracknell, A. P. (2007). *Introduction to remote sensing*. CRC press.
22. de Andrade, T. S., de Oliveira Sousa, P. H. G., & Siegle, E. (2019). Vulnerability to beach erosion based on a coastal processes approach. *Applied Geography*, 102, 12-19
23. Davidson, M., Van Koningsveld, M., de Kruif, A., Rawson, J., Holman, R., Lamberti, A., ... & Aarninkhof, S. (2007). The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 463-475.
24. Dean, R. G., & Galvin Jr, C. J. (1976). Beach erosion: causes, processes, and remedial measures. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 6(3), 259-296.
25. Dinkov, D., & Kitev, A. (2020, June). Advantages, disadvantages and applicability of GNSS post-processing kinematic (PPK) method for direct georeferencing of UAV images. In *Proceedings of the 8th International Conference on Cartography and GIS, Nessebar, Bulgaria* (pp. 15-20).
26. Ding, J., Wang, G., Xiong, L., Zhou, X., & England, E. (2017, December). Rapid Topographic Mapping Using TLS and UAV in a Beach-dune-wetland Environment: Case Study in Freeport, Texas, USA. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2017, pp. NH31A-0197).
27. Domazetović, F. (2021). *Višerezolucijsko modeliranje erozije tla korištenjem geoprostornih tehnologija* (Doctoral dissertation, University of Zadar).
28. Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., Faričić, J., Vassilakis, E., & Panda, L. (2021). Automated Coastline Extraction Using the Very High Resolution WorldView (WV) Satellite Imagery and Developed Coastline Extraction Tool (CET). *Applied Sciences*, 11(20), 9482.
29. Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., Faričić, J., Vassilakis, E., & Panda, L. (2021). Automated Coastline Extraction Using the Very High Resolution WorldView (WV) Satellite Imagery and Developed Coastline Extraction Tool (CET). *Applied Sciences*, 11(20), 9482.
30. Dornbusch, U., Williams, R. B. G., Moses, C., & Robinson, D. A. (2002). Life expectancy of shingle beaches: measuring in situ abrasion. *Journal of Coastal Research*, (36 (10036)), 249-255.

31. dos Santos, A. L. S., Amaro, V. E., & Santos, M. S. T. (2014). Terrestrial laser scanner applied to monitoring beach morphological changes in a high energy coastal zone in northeast Brazil. *MST: Rome, Italy*.
32. Državna geodetska uprava (2018). Katalog podataka (verzija 1.11). Preuzeto sa https://dgu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Pristup%20informacijama/Zakoni%20i%20ostali%20propisi/Ostalo/Katalog_podataka_DGU_2018_v11.pdf (5.1.2023.)
33. Duo, E., Trembanis, A. C., Dohner, S., Grottoli, E., & Ciavola, P. (2018). Local-scale post-event assessments with GPS and UAV-based quick-response surveys: a pilot case from the Emilia–Romagna (Italy) coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 2969-2989.
34. Emery, K. O. (1961). A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, 6(1), 90-93.
35. Farris, A. S., & List, J. H. (2007). Shoreline change as a proxy for subaerial beach volume change. *Journal of Coastal Research*, 23(3), 740-748.
36. Faivre, S. i Mićunović, M. (2017). Reconstructing recent beach morphological changes by repeat photography: example of Zogon Beach on the Island of Hvar (Central Adriatic). *Geoadria*, 22 (2), 165-192. <https://doi.org/10.15291/geoadria.1412>
37. Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote sensing*, 12(15), 2447.
38. Ford, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135, 130-140.
39. Forlani, G., Diotri, F., Cella, U. M. D., & Roncella, R. (2019). Indirect UAV strip georeferencing by on-board GNSS data under poor satellite coverage. *Remote sensing*, 11(15), 1765.
40. Fox, W. T., & DAVIS JR, R. A. (1978). Seasonal variation in beach erosion and sedimentation on the Oregon coast. *Geological Society of America Bulletin*, 89(10), 1541-1549.
41. Glavačević, K., Marić, I., Šiljeg, A. (2023): Accuracy Assessment of Direct Georeferencing Using UAV Matrice 210 RTK V2 on Gully Santiš, Island of Pag (Croatia), In: *In Proceedings of the 9th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2023)*, 184-191.

42. Goksel, C., Senel, G., & Dogru, A. O. (2020). Determination of shoreline change along the Black Sea coast of Istanbul using remote sensing and GIS technology. *Desalin. Water Treat.*, 177, 1.
43. Gonçalves, J. A., Bastos, L., Pinho, J., & Granja, H. (2011, June). Digital aerial photography to monitor changes in coastal areas based on direct georeferencing. In *Proceedings of the 5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Prague, Czech Republic* (pp. 1-3).
44. Hengl, T., & Reuter, H. I. (Eds.). (2008). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Newnes.
45. Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide* (No. 2018-1179). US Geological Survey.
46. Hinkel, J., Nicholls, R. J., Tol, R. S., Wang, Z. B., Hamilton, J. M., Boot, G., ... & Klein, R. J. (2013). A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary change*, 111, 150-158.
47. Hossen, M. F., & Sultana, N. (2023). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100943.
48. Hugenholtz, C., Brown, O., Walker, J., Barchyn, T., Nesbit, P., Kucharczyk, M., & Myshak, S. (2016). Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. *Geomatica*, 70(1), 21-30.
49. James, L. A., Hodgson, M. E., Ghoshal, S., & Latiolais, M. M. (2012). Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 137(1), 181-198.
50. Jayson-Quashigah, P. N., Addo, K. A., Amisigo, B., & Wiafe, G. (2019). Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned Aerial Vehicles (Drone). *Ocean & Coastal Management*, 182, 104952.
51. Jaud, M., Le Dantec, N., Ammann, J., Grandjean, P., Constantin, D., Akhtman, Y., ... & Merminod, B. (2018). Direct georeferencing of a pushbroom, lightweight hyperspectral system for mini-UAV applications. *Remote Sensing*, 10(2), 204.
52. Kana, T. W. (1977). Beach erosion during minor storm. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 103(4), 505-518.

53. Klemas, V. (2011). Beach profiling and LIDAR bathymetry: An overview with case studies. *Journal of Coastal Research*, 27(6), 1019-1028.
54. Komar, P. D. (1977). Beach processes and sedimentation.
55. Kranjec, M., & Pavasović, M. (2006). Primjena inercijalnih navigacijskih sustava u geodeziji. *Ekscentar*, (8), 54-57.
56. Krause, G. (2004). The “Emery-method” revisited performance of an inexpensive method of measuring beach profiles and modifications. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 340-346. DIVA. *Global and Planetary change*, 111, 150-158.
57. Kulenović, N. (2023). Povijesna karakterizacija krajolika Općine Poveljana primjenom geoprostornih tehnologija, Doktorska disertacija, Jadran - poveznica među kontinentima, Sveučilište u Zadru, Zadar.
58. Łabuz, T. A. (2015). Environmental impacts—coastal erosion and coastline changes. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*, 381-396.
59. Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., & Rosebery, D. (2019).
60. Limber, P. W., & Murray, A. B. (2015). Sea stack formation and the role of abrasion on beach-mantled headlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 559-568.
61. Lin, Y. C., Cheng, Y. T., Zhou, T., Ravi, R., Hasheminasab, S. M., Flatt, J. E., ... & Habib, A. (2019). Evaluation of UAV LiDAR for mapping coastal environments. *Remote Sensing*, 11(24), 2893
62. Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry* (Vol. 1). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
63. Liu, X., Lian, X., Yang, W., Wang, F., Han, Y., & Zhang, Y. (2022). Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, 6(2), 30.
64. Lončar, N. (2009). Geomorfološka regionalizacija srednjeg i južnog dijela otoka Paga. *Geoadria*, 14 (1), 5-25. <https://doi.org/10.15291/geoadria.556>.
65. Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.
66. Ma, S., Qiu, H., Hu, S., Yang, D., & Liu, Z. (2021). Characteristics and geomorphology change detection analysis of the Jiangdingya landslide on July 12, 2018, China. *Landslides*, 18, 383-396.
67. Magaš, D. (2011). Zemljopisna obilježja otoka Paga u funkciji upoznavanja njegove toponimije. *Toponimija otoka Paga*, 5-49.

68. Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote sensing*, 5(12), 6880-6898.
69. Marić, I. (2020). *Razvoj višekriterijskog modela održivog upravljanja na području sedrotvornih vodotokova-primjer Skradinskog buka* (Doctoral dissertation, University of Zadar).
70. Marić, I., Šiljeg, A., Domazetović, F. (2019): Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine—primjer utvrde Fortica na otoku Pagu. *Geodetski glasnik*, 50, 19-44.
71. Masselink, G., & Pattiaratchi, C. B. (2001). Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Marine Geology*, 172(3-4), 243-263.
72. McLachlan, A., & Erasmus, T. (Eds.). (2013). *Sandy Beaches as Ecosystems: Based on the Proceedings of the First International Symposium on Sandy Beaches, Held in Port Elizabeth, South Africa, 17–21 January 1983* (Vol. 19). Springer Science & Business Media.
73. Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., & Borghini, S. (2015). Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 40(1), 397.
74. Mićunović, M., Faivre, S., & Gašparović, M. (2021). Assessment of Remote Sensing Techniques Applicability for Beach Morphology Mapping: A Case Study of Hvar Island, Central Adriatic, Croatia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1407.
75. Mohamed Rashidi, A. H., Jamal, M. H., Hassan, M. Z., Mohd Sendek, S. S., Mohd Sopie, S. L., & Abd Hamid, M. R. (2021). Coastal structures as beach erosion control and sea level rise adaptation in malaysia: A review. *Water*, 13(13), 1741.
76. Munk, W. H., & Traylor, M. A. (1947). Refraction of ocean waves: a process linking underwater topography to beach erosion. *The Journal of Geology*, 55(1), 1-26.
77. Mutaqin, B. W. (2017). Shoreline changes analysis in kuwaru coastal area, yogyakarta, Indonesia: An application of the digital shoreline analysis system (DSAS). *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(7), 1203-1214.
78. Neverman, A. J., Fuller, I. C., & Procter, J. N. (2016). Application of geomorphic change detection (GCD) to quantify morphological budgeting error in a New Zealand gravel-bed

- river: A case study from the Makaroro river, Hawke's bay. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 45-63.
79. Nyandwi, N. (2001). Survey of the extent of human-induced beach erosion problems in Tanzania.
 80. O'Connor, J., Smith, M. J., & James, M. R. (2017). Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data. *Progress in Physical Geography*, 41(3), 325-344.
 81. Oniga, VE, Breaban, AI, Pfeifer, N. i Chirila, C. (2020.). Određivanje prikladnog broja zemaljskih kontrolnih točaka za georeferenciranje slika UAS-a različitim brojem i prostornom distribucijom. *Daljinska detekcija* , 12 (5), 876.
 82. Oyedotun, T. D. (2014). Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. *Geomorphological techniques*, 3(2.2), 1-12.
 83. Padró, J. C., Muñoz, F. J., Planas, J., & Pons, X. (2019). Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 75, 130-140.
 84. Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., & Vassilopoulos, A. (2009). *Mapping geomorphological environments*. Springer Science & Business Media.
 85. Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. *Developments in soil science*, 33, 3-30.
 86. Perez, B., Magalhães, A., Gonçalves, J. A., & Bastos, L. (2010). Monitoring of beaches and sand dunes using digital aerial photography with direct georeferencing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives*.
 87. Prasad, D. H., & Kumar, N. D. (2014). Coastal erosion studies—a review. *International Journal of Geosciences*, 2014.
 88. Rajčić, S. T., Faivre, S., & Buzjak, N. (2010). Promjene žala na području Medića i Mimica od kraja šezdesetih godina 20. stoljeća do danas. *Hrvatski geografski glasnik*, 72(2), 27-48.
 89. Revollo, N. V., Delrieux, C. A., & Perillo, G. M. (2016). Automatic methodology for mapping of coastal zones in video sequences. *Marine Geology*, 381, 87-101.
 90. Riverscapes Consortium (2020). Geomorphic Change Detection Software. Preuzeto sa <https://gcd.riverscapes.net/> (25.5.2023.)

91. Rizaldy, A., & Firdaus, W. (2012). Direct georeferencing: A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B1), 5-9.
92. Russell, P. E. (1993). Mechanisms for beach erosion during storms. *Continental Shelf Research*, 13(11), 1243-1265.
93. Ružić, I., Benac, Č., Ilić, S., & Krvavica, N. (2018). Geomorfološke promjene minijaturnog žala na kršu. *Hrvatske vode*, 26(103), 27-34.
94. Quang, D. N., Ngan, V. H., Tam, H. S., Viet, N. T., Tinh, N. X., & Tanaka, H. (2021). Long-term shoreline evolution using dsas technique: A case study of Quang Nam province, Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1124.
95. Salameh, E., Frappart, F., Almar, R., Baptista, P., Heygster, G., Lubac, B., ... & Laignel, B. (2019). Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: A review. *Remote Sensing*, 11(19), 2212.
96. Salas López, R., Terrones Murga, R. E., Silva-López, J. O., Rojas-Briceño, N. B., Gómez Fernández, D., Oliva-Cruz, M., & Taddia, Y. (2022). Accuracy Assessment of Direct Georeferencing for Photogrammetric Applications Based on UAS-GNSS for High Andean Urban Environments. *Drones*, 6(12), 388.
97. Salghuna, N. N., & Bharathvaj, S. A. (2015). Shoreline change analysis for northern part of the coromandel coast. *Aquatic Procedia*, 4, 317-324.
98. Senechal, N., & de Alegría-Arzaburu, A. R. (2020). Seasonal imprint on beach morphodynamics. *Sandy Beach Morphodynamics*, 461-486.
99. Shaw, L., Helmholz, P., Belton, D., & Addy, N. (2019). Comparison of UAV Lidar and imagery for beach monitoring. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 589-596.
100. Sousa, P. H., Siegle, E., & Tessler, M. G. (2013). Vulnerability assessment of Massaguaçu beach (SE Brazil). *Ocean & coastal management*, 77, 24-30.
101. Splinter, K. D., Harley, M. D., & Turner, I. L. (2018). Remote sensing is changing our view of the coast: Insights from 40 years of monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. *Remote Sensing*, 10(11), 1744.
102. Stanica, A., & Ungureanu, V. G. (2010). Understanding coastal morphology and sedimentology. *Terre et Environnement*, 88, 105-111.
103. Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., & Gerke, M. (2017). Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The*

International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 355.

104. Stott, E., Williams, R. D., & Hoey, T. B. (2020). Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an RTK-GNSS unmanned aerial vehicle and SfM photogrammetry. *Drones*, 4(3), 55.
105. Šiljeg, A., Barada, M., & Marić, I. (2018). *Digitalno modeliranje reljefa*. Alfa.
106. Tătui, F., Pîrvan, M., Popa, M., Aydogan, B., Ayat, B., Görmüş, T., ... & Saprykina, Y. (2019). The Black Sea coastline erosion: Index-based sensitivity assessment and management-related issues. *Ocean & Coastal Management*, 182, 104949.
107. Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change* (No. 2008-1278). US Geological Survey.
108. Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., & Maiga, A. S. (2019). Shoreline detection using optical remote sensing: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 75.
109. Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114, 19-24.
110. Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528.
111. Xiong, L., Wang, G., Bao, Y., Zhou, X., Wang, K., Liu, H., ... & Zhao, R. (2019). A rapid terrestrial laser scanning method for coastal erosion studies: A case study at Freeport, Texas, USA. *Sensors*, 19(15), 3252.
112. Yuan, X., & Zhang, X. P. (2008). Theoretical accuracy of direct georeferencing with position and orientation system in aerial photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Sci*, 617-622.
113. Zanutta, A., Lambertini, A., & Vittuari, L. (2020). UAV photogrammetry and ground surveys as a mapping tool for quickly monitoring shoreline and beach changes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 52.
114. Zhang, K., Douglas, B. C., & Leatherman, S. P. (2001). Beach erosion potential for severe nor'easters. *Journal of Coastal Research*, 309-321.
115. Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2019). Evaluating the potential of PPK direct georeferencing for UAV-SfM photogrammetry and precise topographic mapping. *Earth Surf. Dyn. Discuss*, 7, 807-827.

IZVORI

URL 1 <https://geographyrevisionalevel.weebly.com/4a-waves-and-beach-morphology.html>
(20.3.2023.)

URL 2 <https://www.eionet.europa.eu/gemet/hr/concept/1519> (23.3.2023.)

URL 3 <https://adriaticsea.hhi.hr/public-stations/station?id=5&designation=ZD0> (5.4.2023.)

URL 4 <https://seagrant.unh.edu/sites/default/files/media/2021-06/beach-profiling-methods.pdf>
(10.4.2023.)

URL 5 <https://fcit.usf.edu/florida/teacher/science/mod2/resources/emery.board.pdf>
(10.4.2023.)

URL 6

[https://uk.news.yahoo.com/hemsby-dramatic-pictures-over-30-years-show-britains-eroding-coastline-](https://uk.news.yahoo.com/hemsby-dramatic-pictures-over-30-years-show-britains-eroding-coastline-145236474.html?guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAKdCZOBCN-CGZY4-ownbj3s9YdXHslTja5CnvPRvPbbcoG9J0pvPK5gWPSiL9oAwKL_iM-1AC0voHvaJPT_pwhhuEoehkSADaoiWdRjS2AeBO599Syv82hokTCZ8eEI8c2AEluwLPSAsmRW5RpgvjRiurJhE_MG7n6JT7q0vplR&guccounter=2)

[145236474.html?guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAKdCZOBCN-CGZY4-ownbj3s9YdXHslTja5CnvPRvPbbcoG9J0pvPK5gWPSiL9oAwKL_iM-1AC0voHvaJPT_pwhhuEoehkSADaoiWdRjS2AeBO599Syv82hokTCZ8eEI8c2AEluwLPSAsmRW5RpgvjRiurJhE_MG7n6JT7q0vplR&guccounter=2](https://uk.news.yahoo.com/hemsby-dramatic-pictures-over-30-years-show-britains-eroding-coastline-145236474.html?guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAKdCZOBCN-CGZY4-ownbj3s9YdXHslTja5CnvPRvPbbcoG9J0pvPK5gWPSiL9oAwKL_iM-1AC0voHvaJPT_pwhhuEoehkSADaoiWdRjS2AeBO599Syv82hokTCZ8eEI8c2AEluwLPSAsmRW5RpgvjRiurJhE_MG7n6JT7q0vplR&guccounter=2) (25.4.2023.)

URL 7 https://gradri.uniri.hr/files/Rjecinik_pojmova_u_opcoj_i_primijenjenoj_geologiji.pdf
(3.5.2023.)

URL 8 https://catalyst.earth/catalyst-system/files/help/COMMON/concepts/ExteriorOrientation_explainEO.html (25.4.2023.)

URL 9

https://www.google.com/search?rlz=1C1BNSD_enHR959HR959&sxsrf=APwXEdd_39vTfBvxYivdv5NogTYf2tHbUA:1688040657458&q=%C4%8Didar+na%C4%8Din+rada&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiZ9oO-uej_AhVGgv0HHTsGBNQQ0pQJegQIChAB&biw=1536&bih=656&dpr=1.25#imgsrc=aCFMKmHMLBgdM&imgdii=KFmwrucGW_8IDM (25.4.2023.)

URL 10 <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm> (20.4.2023.)

URL 11 <https://help.propelleraero.com/en/Data-Capture-&-Surveys/Best-Practices-for-Drone-Surveying/206> (7.4.2023.)

URL 12

https://www.researchgate.net/post/Is_autofocus_leading_to_worse_results_in_photogrammetry/1 (13.4.2023.)

URL 13 <https://www.cmcc.it/data-services-and-products/forecasting-systems> (5.6.2023.)

URL 14 <https://www.cmcc.it/research-organization/research-divisions/ocean-predictions-and-applications> (5.6.2023.)

URL 15 <https://adri.cmcc.it/> (5.6.2023.)

Popis grafičkih priloga

Slika 1. (A) Geografski smještaj otoka Paga u RH; (B) geografski smještaj žala Sušac na poluotoku Metajna; (C) visokorezolucijski DOF žala	15
Slika 2. Jaruga nastala na flišnim naslagama poluotoka Metajna	17
Slika 3. (A) Šire područje istraživanja i (B) granice užeg područja istraživanja	19
Slika 4. Sediment na žalu Sušac	20
Slika 5. Manji akumulacijski oblici na žalu	23
Slika 6. A) Uočeno kretanje morske struje na terenskom istraživanju; B) primjer kretanja morskih struja za šire područje poluotoka Metajne; C) užji prostor istraživanja	24
Slika 7. Povremeni površinski tokovi	25
Slika 8. Primjeri negativnih posljedica obalne erozije	27
Slika 9. Usporedba klasičnog i izravnog georeferenciranja	31
Slika 10. Princip rada zračnog LiDAR-a	33
Slika 11. Primjer praćenja morfoloških promjena žala pomoću video nadzora	34
Slika 12. Komponente aerofotogrametrijskog sustava	37
Slika 13. Proces ručnog dodavanja veznih točaka	38
Slika 14. Grubo georeferncirani snimci	38
Slika 15. Vezne točke korištene za georeferenciranje intervalnih snimaka	41
Slika 16. Prostorna distribucija točaka korištenih za provjeru modela	43
Slika 17. Različite razine plime i oseke	45
Slika 18. Princip rada DSAS ekstenzije	47
Slika 19. (A) Šire područje istraživanja; (B) lokacija uzlijetanja UAV-a	49
Slika 20. Označavanje i prikupljanje orijentacijskih točaka	52
Slika 21. Prostorni raspored orijentacijskih točaka	53
Slika 22. Koraci u procesu obrade podataka u Agisoft Metashape-u	54
Slika 23. Izvedeni rijetki oblak točaka (studen, 2022.)	55
Slika 24. Primjer označavanja markera	56
Slika 25. Gradualna selekcija veznih točaka	56

Slika 26. Primjer gustog oblaka točaka	57
Slika 27. Primjer generiranog 3D modela šireg područja	57
Slika 28. Primjer generiranog DMP-a	58
Slika 29. Drenažna mreža šireg područja Meatajne	60
Slika 30. Preliminarni model linearnih pomaka obalne linije žala Sušac	63
Slika 31. (A) lokacije CP-a i procijenjene pogreške za studeni, 2022 (11 CP); te (B) lokacije CP-a i procijenjene pogreške za lipanj, 2023 (11 CP)	69
Slika 32. Dinamika obalne linije od 1959. do 2023.	70
Slika 33. Linearne prostorno-vremenske promjene u razdoblju od 1959. do 2023.	71
Slika 34. Neto kretanje obalne linije u razdoblju od 1959. do 2023.	72
Slika 35. Kretanje obane linije (SCE) u razdoblju od 1959. do 2023.	73
Slika 36. Promjene obalne linije i obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023.	74
Slika 37. Kretanje površine obalnog područja u razdoblju od 1959 do 2023. godine	75
Slika 38. Razlog složenog oblika obalnog područja za 2014. godinu.....	76
Slika 39. Detektirane volumetrijske promjene žala Sušac	78
Slika 40. Površinski (A); volumetrijski (B) i visinski (C) pokazatelji prostorno-vremenskih promjena žala	79
Slika 41. Utjecaj povremenog površinskog toka na preoblikovanje materijala uz područje istraživanja	79
Slika 42. Histogram šestomjesečnih prostorno-vremenskih promjena	80
Slika 43. Ruža vjetrova za meteorološke postaje Rab i Mali Lošinj.....	81
Slika 44. Ruža vjetrova za meteorološku postaju Zadar te ukupno	82
Slika 45. Indeks zaklona od vjetra (A) bura i (B) lebić.....	83
Slika 46. Primjer efekta križanja valova	85
Slika 47. Promjena morfologije žala uvjetovana površinskim otjecanjem	87
Slika 48. Primjer morfoloških promjena žala uzrokovanih površinskim otjecanje	88
Slika 49. Primjer podataka o (A) periodu vala; (B) visini vala; (C) razini mora te (D) kretanju i brzini morskih struja u Jadranskom moru	89
Slika 50. Poteškoće prilikom UAV snimanja.....	90

Popis tabličnih prikaza

Tablica 1. Broj veznih točaka korišten za geometrijsku transformaciju intervalnih snimaka	40
---	----

Tablica 2. Postavke misija leta	50
Tablica 3. Koordinate prikupljenih točaka u HTRS96TM i WGS84 koordinatnom sustavu	52
Tablica 4. Rezultati procjene točnosti intervalnih modela za sve točke	64
Tablica 5. Rezultati procjene točnosti intervalnih modela za točke na obali	65
Tablica 6. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (9 GCP i 3 CP) - studeni, 2022.....	66
Tablica 7. Točnost modela izvedenog klasičnim pristupom (9 GCP i 3 CP) - lipanj, 2023.	66
Tablica 8. Točnost modela izvedenih izravnim georeferenciranjem (studenj, 2022.) za sve scenarije.....	67
Tablica 9. Točnost modela izvedenog izravnim georeferenciranjem (lipanj, 2023) za sve scenarije.....	68
Tablica 10. Deskriptivna statistika obalnog područja u razdoblju od 1959. do 2023.	75